



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS TRINDADE / CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ELIANA DE JESUS LOPES

**PROPOSTA DE GESTÃO INTEGRADA E SUSTENTÁVEL DE DISPOSITIVOS
MÉDICOS DURÁVEIS: DIRETRIZES ESTRATÉGICAS E PLANO DE
IMPLEMENTAÇÃO PARA HOSPITAIS PÚBLICOS**

FLORIANÓPOLIS

2025

ELIANA DE JESUS LOPES

**PROPOSTA DE GESTÃO INTEGRADA E SUSTENTÁVEL DE DISPOSITIVOS
MÉDICOS DURÁVEIS: DIRETRIZES ESTRATÉGICAS E PLANO DE
IMPLEMENTAÇÃO PARA HOSPITAIS PÚBLICOS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Engenharia de Produção.

Orientadora: profa. Dra. Marina Bouzon.

FLORIANÓPOLIS

2025

Lopes, Eliana de Jesus

Proposta de gestão integrada e sustentável de dispositivos médicos duráveis : diretrizes estratégicas e plano de implementação para hospitais públicos / Eliana de Jesus Lopes ; orientadora, Marina Bouzon, 2025.

320 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção. 2. Economia Circular. 3. Sustentabilidade Hospitalar. 4. Tecnologias da Indústria 4.0. 5. Dispositivos Médicos Duráveis. I. Bouzon, Marina. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Título.

Eliana de Jesus Lopes

Proposta de gestão integrada e sustentável de dispositivos médicos duráveis: diretrizes estratégicas e plano de implementação para hospitais públicos

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 23 de setembro de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Marina Bouzon, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Caroline Rodrigues Vaz, Dra.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Diego de Castro Fettermann, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ricardo Chalmeta Rosaleñ, Dr.
Universidad Jaume I

Prof.(a) Paula Santos Ceryno, Dra.
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutora em Engenharia de Produção.

 Documento assinado digitalmente Enzo Morosini Frazzon Data: 03/12/2025 23:22:05-0300 CPF: ***.696.429-** Verifique as assinaturas em https://v.ufsc.br Coordenação do Programa de Pós-Graduação	 Documento assinado digitalmente Marina Bouzon Data: 04/12/2025 05:01:32-0300 CPF: ***.725.139-** Verifique as assinaturas em https://v.ufsc.br Prof.(a) Marina Bouzon, Dra. Orientadora

Florianópolis, 2025.

AGRADECIMENTOS

Esta seção sempre me emociona, pois é o momento de pausar e refletir sobre cada passo desta trajetória, lembrando das pessoas que fizeram parte dessa caminhada.

Primeiramente, agradeço a Deus, pela vida, pela força nos momentos de fragilidade e pela esperança renovada a cada desafio. Aos meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado, dedico minha mais profunda gratidão. Em especial, à minha mãe, que tantas vezes se sacrificou para que seus filhos estudassem e alcançassem oportunidades que ela não teve. Mesmo sem compreender todos os significados acadêmicos, soube reconhecer o valor de cada conquista e se orgulhar genuinamente da filha mestra e agora doutora, entendendo que essa vitória é também dela.

Ao meu esposo, companheiro de 18 anos de jornada, agradeço pelo cuidado constante, pelo apoio incondicional e por estar ao meu lado em todos os momentos – nos sorrisos, nas lágrimas e nas escolhas. Agradeço a Deus por ter você em minha vida.

Neste momento, recordo também o início da minha caminhada, quando muitas dificuldades poderiam ter me feito desistir, mas encontrei mãos estendidas. À minha madrinha, Simone Leal, que acreditou no poder transformador da educação, e ao meu pai, Francisco, que, mesmo sem conhecer todas as áreas da engenharia, sempre dizia que queria ver sua filha engenheira. Ele hoje me olha do céu, certo de que a escolha que fiz honra seu desejo.

Agradeço aos amigos que fiz na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Instituto Federal do RN (IFRN), Centro Universitário Inta (UNINTA), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) – na Educação a Distância (EaD) e na Educação Presencial – e até mesmo em concursos. Pessoas que começaram como colegas e se tornaram irmãos de vida. Agradeço também às mulheres negras que me inspiraram e continuam sendo referências de força, resistência e beleza: Aline Dantas, Miriam Rocha, Fernanda Pereira, Izete Celestina e Ana Helena da Silva.

Aos professores e professoras que me acompanharam ao longo da formação, deixo meu reconhecimento. Neste ciclo final, destaco minha gratidão à Dra. Marina Bouzon, orientadora que foi muito além do papel acadêmico: obrigada pela paciência, pelo rigor científico, pelas orientações firmes e, sobretudo, pela humanidade com que conduziu este processo. Sua confiança me fortaleceu nos momentos mais difíceis e suas palavras firmaram em mim a certeza de que estava no caminho certo. Minha gratidão é imensa por ter aprendido com sua sabedoria, dedicação e generosidade.

Também sou profundamente grata aos professores e professoras do Programa de Pós-

Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP) da UFSC, que enriqueceram minha trajetória acadêmica com seus ensinamentos e orientações. Em especial, registro meu reconhecimento à Dra. Francielly Hedler Staudt, ao PhD. Carlos Manuel Taboada Rodriguez, ao Dr. Diego de Castro Fettermann, à Dra. Sandra Rolim Ensslin, ao Dr. Guilherme Luz Tortorella, à Dra. Gisele de Lorena Diniz Chaves e à Dra. Caroline Rodrigues Vaz. Cada um, à sua maneira, contribuiu para o amadurecimento científico e humano que carrego desta etapa, seja compartilhando conhecimentos, inspirando pela seriedade com que conduzem a pesquisa ou incentivando a busca por excelência.

Ao PPGEP/UFSC, agradeço pela oportunidade de formação em um ambiente de elevado rigor acadêmico, marcado pela pluralidade de ideias e pela busca por inovação. Ao Laboratório de Desempenho Logístico (LDL) e a seus membros, expresso minha gratidão pelas discussões científicas que ampliaram minha visão de pesquisa e pelas experiências de cooperação que vivenciei. Em especial, agradeço à Leandra Silvestre e à Alejandra Bonilla, pela amizade construída e pelo apoio constante que fizeram da jornada mais leve e enriquecedora.

Aos avaliadores da banca, Dr. Diego de Castro Fettermann, Dra. Caroline Rodrigues Vaz, Dra. Paula Santos Ceryno e Dr. Ricardo Chalmeta-Rosaleñ, expresso minha sincera gratidão pela disponibilidade em integrar este momento tão especial da minha trajetória acadêmica. A generosidade em aceitar o convite e dedicar tempo a esta tese demonstra o compromisso de cada um com a formação de novos pesquisadores e com o avanço da ciência. Sei que suas observações e contribuições não apenas enriquecerão este trabalho, mas também ampliarão meus horizontes como pesquisadora e docente. Receber a atenção e o olhar crítico de profissionais de tamanha competência e reconhecimento é, para mim, motivo de honra e orgulho.

Estendo meus agradecimentos às instituições de saúde que colaboraram com este estudo e a seus representantes, que compreenderam a relevância do tema e gentilmente abriram suas portas para a pesquisa. Registro também minha gratidão ao Grupo de Pesquisa Gestão e Inovação em Saúde, sob a liderança do Prof. Hélio Roberto Hékis, pela mobilização de pesquisadores e engenheiros clínicos que contribuíram de maneira significativa para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, estiveram presentes nesta caminhada – seja oferecendo palavras de incentivo, gestos de amizade, apoio técnico ou científico. Cada contribuição, por menor que parecesse, teve importância fundamental para que esta conquista se tornasse possível.

“Você não sabe o quanto eu caminhei
Pra chegar até aqui
Percorri milhas e milhas antes de dormir
Eu nem cochilei
Os mais belos montes escalei (...)”

Toni Garrido - Cidade Negra

“Não é o mais forte da espécie que sobrevive nem o mais inteligente, mas sim aquele que
melhor se adapta às mudanças”.

Charles Darwin (Cientista fundador da teoria da evolução)

“O SUS é um patrimônio do povo brasileiro. Defender o SUS é defender a vida.”

Sistema Único de Saúde do Brasil – SUS.

“Quando a transformação digital é feita corretamente, é como uma lagarta se transformando
em uma borboleta, mas, quando feita de forma errada, tudo o que você tem é uma lagarta que
se movimenta mais rápido.”

*George Westerman (Co-presidente do MIT Sloan, CIO Leadership Awards e Consultor da
OMS)*

RESUMO

A gestão sustentável de Dispositivos Médicos Duráveis (DMDs) representa um dos maiores desafios contemporâneos para os sistemas de saúde, dado o alto consumo de recursos, a complexidade tecnológica e o impacto ambiental associado ao seu ciclo de vida. Nos hospitais brasileiros, esses desafios são agravados por barreiras institucionais, carência de infraestrutura, limitações regulatórias e insuficiência de políticas de incentivo, o que compromete a eficiência da gestão e restringe a adoção de práticas circulares. Nesse contexto, a presente tese teve como objetivo propor um *framework* estratégico para a gestão de DMDs em hospitais públicos brasileiros, integrando os princípios da Economia Circular (EC) às tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0). Para alcançar esse objetivo, foi adotada uma abordagem metodológica abrangente e articulada, que incluiu revisões integrativa e sistemáticas da literatura, análises conceituais e estudos empíricos apoiados em métodos multicritério (DEMATEL e BWM). Como resultados, foram identificados os DMDs prioritários (equipamentos de suporte respiratório, de diagnóstico e de terapia), bem como aqueles de menor relevância para retorno econômico e ambiental (equipamentos de monitoramento, instrumentos cirúrgicos reutilizáveis e dispositivos implantáveis). Também foram mapeadas e categorizadas 55 barreiras e 51 impulsionadores, revelando barreiras estruturais e regulatórias como as mais críticas, e políticas públicas, inovação tecnológica e alinhamento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) como vetores decisivos de transformação. Além disso, a análise priorizou tecnologias da I4.0 com maior potencial para apoiar a circularidade hospitalar, destacando-se dentre elas a Internet das Coisas, Inteligência Artificial, Computação em Nuvem, Big Data & Analytics, Machine Learning e Sensores Inteligentes, com papel central na rastreabilidade, interoperabilidade de sistemas e manutenção preditiva. Os achados demonstram que a superação de barreiras como resistência institucional e carência de infraestrutura, associada ao fortalecimento de *drivers* como inovação tecnológica e governança pública, é condição essencial para viabilizar a transição circular nos hospitais. A partir dessa integração, a tese consolidou um *framework* conceitual e aplicado, materializado em uma proposta de Plano Diretor de Gestão de DMDs direcionado ao perfil gerencial do Ministério da Saúde, estruturado em eixos de governança, padronização, rastreabilidade digital, estratégias de circularidade, formação técnica e mecanismos de monitoramento. A contribuição é dupla: de um lado, fornece subsídios práticos para gestores e formuladores de políticas públicas na definição de prioridades e estratégias de implementação; de outro, avança no campo teórico ao estabelecer conexões inéditas entre EC, I4.0 e gestão hospitalar. Conclui-se que a integração entre circularidade e essas tecnologias pode transformar a gestão de DMDs no Sistema Único de Saúde, promovendo eficiência operacional, responsabilidade socioambiental e alinhamento aos ODS. Contudo, sua efetiva implementação dependerá de esforços coordenados entre governo, hospitais, universidades, empresas parceiras e sociedade civil.

Palavras-chave: Economia Circular. Sustentabilidade Hospitalar. Engenharia Clínica. Tecnologias da Indústria 4.0. Dispositivos Médicos Duráveis.

RESUMEN

La gestión sostenible de los Dispositivos Médicos Durables (DMD) representa uno de los mayores desafíos contemporáneos para los sistemas de salud, debido al alto consumo de recursos, la complejidad tecnológica y el impacto ambiental asociado a su ciclo de vida. En los hospitales brasileños, estos desafíos se agravan por barreras institucionales, carencia de infraestructura, limitaciones regulatorias e insuficiencia de políticas de incentivo, lo que compromete la eficiencia de la gestión y restringe la adopción de prácticas circulares. En este contexto, esta tesis tuvo como objetivo proponer un *framework* estratégico para la gestión de los DMD en hospitales públicos brasileños, integrando los principios de la Economía Circular (EC) con las tecnologías de la Industria 4.0 (I4.0). Para alcanzar este objetivo, se adoptó un enfoque metodológico amplio y articulado, que incluyó revisiones integrativa y sistemáticas de la literatura, análisis conceptuales y estudios empíricos apoyados en métodos multicriterio (DEMATEL y BWM). Como resultados, se identificaron los DMD prioritarios (equipos de soporte respiratorio, de diagnóstico y de terapia), así como aquellos de menor relevancia para el retorno económico y ambiental (equipos de monitoreo, instrumentos quirúrgicos reutilizables y dispositivos implantables). También se mapearon y categorizaron 55 barreras y 51 impulsores, revelando las barreras estructurales y regulatorias como las más críticas, y las políticas públicas, la innovación tecnológica y la alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como vectores decisivos de transformación. Además, el análisis priorizó las tecnologías de la I4.0 con mayor potencial para apoyar la circularidad hospitalaria, destacándose entre ellas el Internet de las Cosas, la Inteligencia Artificial, la Computación en la Nube, el *Big Data & Analytics*, el *Machine Learning* y los Sensores Inteligentes, con un papel central en la trazabilidad, la interoperabilidad de sistemas y el mantenimiento predictivo. Los resultados demuestran que superar barreras como la resistencia institucional y la falta de infraestructura, asociadas al fortalecimiento de impulsores como la innovación tecnológica y la gobernanza pública, constituye una condición esencial para viabilizar la transición circular en los hospitales. A partir de esta integración, la tesis consolidó un *framework* conceptual y aplicado, materializado en una propuesta de Plan Maestro de Gestión de DMD orientado al perfil gerencial del Ministerio de Salud, estructurado en ejes de gobernanza, estandarización, trazabilidad digital, estrategias de circularidad, formación técnica y mecanismos de monitoreo. La contribución es doble: por un lado, proporciona insumos prácticos para gestores y formuladores de políticas públicas en la definición de prioridades y estrategias de implementación; por otro, avanza en el campo teórico al establecer conexiones inéditas entre EC, I4.0 y gestión hospitalaria. Se concluye que la integración entre circularidad y estas tecnologías puede transformar la gestión de los DMD en el Sistema Único de Salud, promoviendo eficiencia operativa, responsabilidad socioambiental y alineación con los ODS. Sin embargo, su implementación efectiva dependerá de esfuerzos coordinados entre el gobierno, los hospitales, las universidades, las empresas asociadas y la sociedad civil.

Palabras clave: Economía Circular. Sostenibilidad Hospitalaria. Ingeniería Clínica. Tecnologías de la Industria 4.0. Dispositivos Médicos Duraderos.

ABSTRACT

The sustainable management of Durable Medical Devices (DMDs) represents one of the greatest contemporary challenges for health systems, given the high consumption of resources, technological complexity, and environmental impact associated with their life cycle. In Brazilian hospitals, these challenges are aggravated by institutional barriers, lack of infrastructure, regulatory limitations, and insufficient incentive policies, which compromise management efficiency and restrict the adoption of circular practices. In this context, this thesis aimed to propose a strategic framework for the management of DMDs in Brazilian public hospitals, integrating the principles of the Circular Economy (CE) with Industry 4.0 (I4.0) technologies. To achieve this objective, a comprehensive and articulated methodological approach was adopted, encompassing integrative and systematic literature reviews, conceptual analyses, and empirical studies supported by multicriteria methods (DEMATEL and BWM). As results, the research identified the priority DMDs (respiratory support, diagnostic, and therapy equipment), as well as those of lower relevance for economic and environmental return (monitoring equipment, reusable surgical instruments, and implantable devices). Furthermore, 55 barriers and 51 drivers were mapped and categorized, revealing structural and regulatory barriers as the most critical, while public policies, technological innovation, and alignment with the Sustainable Development Goals (SDGs) emerged as decisive vectors of transformation. The analysis also prioritized I4.0 technologies with the greatest potential to support hospital circularity, highlighting among them the Internet of Things, Artificial Intelligence, Cloud Computing, Big Data & Analytics, Machine Learning, and Smart Sensors, all playing a central role in traceability, systems interoperability, and predictive maintenance. The findings demonstrate that overcoming barriers such as institutional resistance and lack of infrastructure, combined with strengthening drivers such as technological innovation and public governance, is essential to enable the circular transition in hospitals. From this integration, the thesis consolidated a conceptual and applied framework, materialized in a proposal for a Master Plan for DMD Management directed to the managerial profile of the Ministry of Health, structured around axes of governance, standardization, digital traceability, circularity strategies, technical training, and monitoring mechanisms. The contribution is twofold: on one hand, it provides practical guidance for managers and policymakers in defining priorities and implementation strategies; on the other, it advances the theoretical field by establishing unprecedented connections between CE, I4.0, and hospital management. It is concluded that the integration between circularity and these technologies can transform DMD management within Brazil's Unified Health System, promoting operational efficiency, socio-environmental responsibility, and alignment with the SDGs. However, its effective implementation will depend on coordinated efforts among government, hospitals, universities, partner companies, and civil society.

Keywords: Circular Economy. Hospital Sustainability. Clinical Engineering. Industry 4.0 Technologies. Durable Medical Devices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Framework Teórico	24
Figura 2 – Estrutura da Tese	32
Figura 3 – Procedimentos metodológicos, passos e produtos da tese	34
Figura 4 – Processo de seleção do portfólio com base no PRISMA	49
Figura 5 – Produção Científica Nacional x Produção Científica Internacional sobre Tecnologias da Indústria 4.0 na Economia Circular	52
Figura 6 – Mapa temático sobre EC e I4.0 no Contexto Brasileiro e no Contexto Global	56
Figura 7 – Percepção de maior relevância Econômica e Ambiental dos DMDs	60
Figura 8 – Percepção de menor relevância Econômica e Ambiental dos DMDs	61
Figure 9 – Literature Selection Process	90
Figure 10 – Framework of Drivers and Barriers to CEH Implementation and Their Relationship to Urban Sustainability and the SDGs	97
Figure 11 – Causal diagram of barriers and drivers to CE implementation in hospitals	104
Figure 12 – Literature selection process: I4.0 technologies in circular management in hospitals	121
Figure 13 – Technological applications in sustainable healthcare.	129
Figure 14 – Digital Transformation Framework in Healthcare Management.	130
Figure 15 – Life cycle of DMDs in Municipal Hospitals/ECUs from acquisition to disposal	150
Figure 16 – Life cycle of DMDs in Municipal Hospitals/ECUs from acquisition to disposal	152
Figure 17 – Average weights associated with the criteria for selecting I4.0 technologies that can contribute to the sustainable management of DMDs	153
Figura 18 – Diretrizes Estratégicas para a Gestão Sustentável e Digital de DMDs	173
Figura 19 – Eixos do Plano Diretor de Gestão de DMDs estruturados no ciclo PDCA	177
Figura 20 – Matriz de Responsabilidades do PDGDMD	181
Figura 21 – Cronograma de implementação do PDGDMD	200
Figura 22 – Framework Gestão Digital e Sustentável de DMD para hospitais públicos	217

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Instrumentos de coleta de dados empíricos aplicados na pesquisa	35
Quadro 2 – Matriz de amarração metodológica da tese	37
Quadro 3 – Caracterização dos participantes da pesquisa	50
Quadro 4 – Principais segmentos investigados em pesquisas sobre EC e I4.0 no contexto Nacional e Internacional	52
Quadro 5 – Principais outputs da pesquisa	64
Quadro 6 – Instrumentos estratégicos e normativos que fundamentam o PDGDMD	168
Quadro 7 – Níveis e principais responsabilidades dos atores envolvidos no PDGDMD	181
Quadro 8 – Planos por eixo estratégico	184
Quadro 9 – Riscos versus mitigação por eixo estratégico	193
Quadro 10 – Roadmap Estratégico de Implementação do PDGDMD com Aplicação de Tecnologias da Indústria 4.0 (2026–2028)	202
Quadro 11 – Matriz de potenciais parceiros e seu papel em cada eixo estratégico do PDGDMD	207
Quadro 12 – Síntese dos resultados e contribuições dos capítulos 3 a 8.2	214

LISTA DE TABELAS

Table 1 – Characteristics of the experts participating in the research	91
Table 2 – Evaluation scale of influences in the DEMATEL method	92
Table 3 – Direct-Relation Matrix of drivers for CEH	98
Table 4 – Normalized Matrix (N) of drivers	98
Table 5 – Total Influence Matrix (T) of drivers	99
Table 6 – Cause and effect values for drivers	100
Table 7 – Direct-Relation Matrix of barriers for CEH	101
Table 8 – Normalized Matrix (N) of barriers	101
Table 9 – Total Influence Matrix (T) of barriers	102
Table 10 – Cause and effect values for barriers	102
Table 11 – Research protocol: I4.0 technologies in circular management in hospitals	120
Table 12 – I4.0 Technologies and their Contribution to Circularity in Hospitals	125
Table 13 – Structural and functional characterization of the healthcare units analyzed	147
Table 14 – Characterization of the specialists participating in the study	148
Table 15 – BWM Prioritization Matrix: consolidated weights of the evaluation criteria for I4.0 technologies applied to DMD management	154
Table 16 – Ranking of I4.0 digital technologies for DMD management	154
Tabela 17 – Critérios da matriz GUTRIC	178
Tabela 18 – Critérios de avaliação da Gravidade (G) e da Urgência (U)	178
Tabela 19 – Critérios de avaliação da Tendência (T) e da Retorno (R)	179
Tabela 20 – Critérios de avaliação da Investimento (I) e da Complexidade (C)	180

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIMO – Associação Brasileira da Indústria de Dispositivos Médicos

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AI – Artificial Intelligence / Inteligência Artificial

ANPD – Autoridade Nacional de Proteção de Dados

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

BDA – Big Data Analytics

BDTD – Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações

BI – Business Intelligence

BWM – Best Worst Method

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CC – Cloud Computing / Computação em Nuvem

CE – Circular Economy

CEH – Circular Economy in Healthcare

CIT – Comissão Intergestores Tripartite

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CONASEMS – Conselho Nacional de Secretarias Municipais de Saúde

CONASS – Conselho Nacional de Secretários de Saúde

DATASUS – Departamento de Informática do SUS

DEMATEL – Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory

DMD(s) – Dispositivo(s) Médico(s) Durável(is)

Ebserh – Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares

EC – Economia Circular

ECU(s) – Emergency Care Unit(s) / Unidade(s) de Pronto Atendimento

Embrapii – Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial

ENGd – Estratégia Nacional de Governo Digital

ESD – Estratégia de Saúde Digital

FNS – Fundo Nacional de Saúde

GS1 – Global Standards 1

GUTRIC – Gravidade, Urgência, Tendência, Retorno, Investimento e Complexidade

HL7/FHIR – Health Level Seven / Fast Healthcare Interoperability Resources

I4.0 – Indústria 4.0

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICTs – Instituições Científicas e Tecnológicas

IEC – International Electrotechnical Commission

IFs – Institutos Federais

INMSD – Índice Nacional de Maturidade em Saúde Digital

IoT – Internet of Things / Internet das Coisas

ISO – International Organization for Standardization

LGPD – Lei Geral de Proteção de Dados

LOA – Lei Orçamentária Anual

MASP – Método de Análise e Solução de Problemas

MEC – Ministério da Educação

ML – Machine Learning / Aprendizado de Máquina

MS – Ministério da Saúde

OCDE – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

OMS – Organização Mundial da Saúde

ONG(s) – Organização(ões) Não Governamental(is)

ONU – Organização das Nações Unidas

PCC – Population, Concept and Context (estrutura da pergunta de pesquisa)

PDCA – Plan, Do, Check, Act

PDGDMD – Plano Diretor de Gestão de Dispositivos Médicos Duráveis

PET-Saúde – Programa de Educação pelo Trabalho para a Saúde

PNIS – Política Nacional de Informação e Informática em Saúde

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PPA – Plano Plurianual

PRISMA – Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

Qlik – Plataforma de Business Intelligence

RNDS – Rede Nacional de Dados em Saúde

SBEB – Sociedade Brasileira de Engenharia Biomédica

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

SERPRO – Serviço Federal de Processamento de Dados

SIASG – Sistema Integrado de Administração de Serviços Gerais

SIGEM – Sistema de Gestão de Materiais

SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção

SOBRAC – Sociedade Brasileira de Acústica

SUS – Sistema Único de Saúde

TI – Tecnologia da Informação

UDI – Unique Device Identification

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFs – Unidades Federativas

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UNA-SUS – Universidade Aberta do SUS

UnB – Universidade de Brasília

UPA(s) – Unidade(s) de Pronto Atendimento

USP – Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E PROBLEMA.....	18
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.2.1 Objetivo geral	20
1.2.2 Objetivos específicos.....	20
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	21
1.4 LENTES TEÓRICAS DA TESE	23
1.4.1 Teorias das Capacidades Dinâmicas.....	24
1.4.2 Teorias da Complexidade/ Sistemas Complexos	25
1.4.3 Teoria Sociotécnica	25
1.4.4 Teoria Institucional.....	26
1.4.5 Visão Integrada do Arcabouço Teórico.....	27
1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	30
1.5.1 Delimitação teórica.....	30
1.5.2 Delimitação metodológica.....	31
1.5.3 Delimitação empírica.....	31
1.5.4 Delimitação geográfica.....	33
1.5.5 Recorte Temporal	33
1.5.6 Marco Normativo e de Planejamento	33
1.6 ESTRUTURA DA TESE.....	35
2 MÉTODOS.....	38
2.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA	38
2.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	39
2.2.1 Procedimentos metodológicos para a produção do Capítulo 3.....	44
2.2.2 Procedimentos metodológicos para a produção do Capítulo 4.....	44
2.2.3 Procedimentos metodológicos para a produção do Capítulo 5.....	45
2.2.4 Procedimentos metodológicos para a produção do Capítulo 6.....	45
2.2.5 Procedimentos metodológicos para a produção do Capítulo 7.....	45
2.2.6 Procedimentos metodológicos para a produção do Capítulo 8.....	45
2.3 ASPECTOS ÉTICOS	46
COMPÊNDIO DE ARTIGOS.....	47

3 ARTIGO 1 - GESTÃO SUSTENTÁVEL DE DISPOSITIVOS MÉDICOS DURÁVEIS COM TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0: UM ENSAIO EMPÍRICO NO SETOR HOSPITALAR.....	48
4 ARTIGO 2 - CIRCULAR ECONOMY IN HOSPITALS: DRIVERS, BARRIERS, AND KEY CONCEPTS FOR IMPLEMENTATION	92
5 ARTIGO 3 - DIGITAL INNOVATIONS IN HEALTHCARE: HOW INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES ENABLE CIRCULARITY IN HOSPITALS	124
6 ARTIGO 4 - FROM LIFECYCLE MAPPING TO DIGITAL TRANSFORMATION: INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES IN DURABLE MEDICAL DEVICE MANAGEMENT IN BRAZILIAN PUBLIC HOSPITALS.....	146
PROPOSTAS E CONCLUSÕES DA TESE	169
7 PROPOSTA DE PLANO DIRETOR PARA GERENCIAMENTO DE DISPOSITIVOS MÉDICOS DURÁVEIS	170
8 PROPOSTA DE FRAMEWORK ESTRATÉGICO E CONCLUSÕES DA TESE ...	220
8.1 SÍNTESE DOS PRINCIPAIS ACHADOS DA PESQUISA	220
8.2 PROPOSTA DE <i>FRAMEWORK</i>	223
8.3 ANÁLISES E DISCUSSÕES SOBRE O FRAMEWORK.....	225
8.4 CONCLUSÕES	228
8.4.1 Objetivos da tese alcançados	229
8.4.2 Limitações e pesquisas futuras	231
REFERÊNCIAS	233
APÊNDICES	264
APÊNDICE A – Roteiro de Observação.....	265
APÊNDICE B – Questionário Estruturado para o Estudo de Caso.....	267
APÊNDICE C – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido Questionário de Análise de Barreiras e Fatores Impulsionadores (Método DEMATEL)	276
APÊNDICE D – Questionário de Análise de Barreiras e Fatores Impulsionadores (Método DEMATEL).....	279
APÊNDICE E – Mensagem de Convite aos Participantes (Questionário – DEMATEL)	285
APÊNDICE F – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido Questionário para identificação das Tecnologias da I4.0 mais relevante no contexto de Gestão Sustentável em Hospitais (BWM)	286
APÊNDICE G – Questionário para identificação das Tecnologias da I4.0 mais relevante no contexto de Gestão Sustentável em Hospitais (BWM)	289

APÊNDICE H – Mensagem de Convite aos Participantes (Questionário – BWM das Tecnologias da Indústria 4.0)	316
APÊNDICE I – Termo de Consentimento e Livre Esclarecido – Estudo de Caso	317

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA E PROBLEMA

A Agenda 2030 das Nações Unidas e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) refletem o reconhecimento global de que a humanidade atravessa uma fase crítica marcada por mudanças climáticas, degradação ambiental, pressão sobre os recursos naturais e desigualdades sociais persistentes (Schroeder; Anggraeni; Weber, 2019). Esses desafios interdependentes impactam diretamente a saúde coletiva e a sustentabilidade dos sistemas sociais, exigindo novos paradigmas de produção, consumo e gestão capazes de equilibrar desenvolvimento econômico, preservação ambiental e justiça social (Macneill et al., 2020).

Nesse cenário, torna-se urgente superar o modelo linear tradicional de produção e descarte, cuja lógica intensifica impactos ambientais e econômicos e compromete a resiliência das organizações. Govindan e Hasanagic (2018) destacam que a Economia Circular (EC) se apresenta como alternativa estratégica, ao propor a reorganização dos fluxos de materiais e produtos por meio da redução, reutilização, remanufatura e reciclagem (Elroi et al., 2023; Theeraworawit; Suriyankietkaew; Hallinger, 2022). Além de mitigar externalidades negativas, a EC fortalece a capacidade adaptativa das instituições e contribui para o alinhamento aos ODS, consolidando-se como um caminho essencial para a sustentabilidade em escala global (Palsodkar; Koltharkar, 2024; Patyal et al., 2022; Schroeder; Anggraeni; Weber, 2019).

Apesar de amplamente aplicada em setores industriais e de manufatura, a transição para a EC no setor da saúde permanece incipiente, ainda que os hospitais estejam entre os maiores consumidores de energia, água e insumos, além de figurarem como grandes geradores de resíduos complexos e perigosos (Dixit; Dutta, 2024; Macneill et al., 2020). Essa lacuna é particularmente grave no Brasil, no qual o sistema público de saúde atende mais de 75% da população (Guzzo et al., 2020), pressionando instituições de saúde que já enfrentam limitações financeiras, estruturais e tecnológicas. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2024), apenas 36% dos municípios brasileiros destinam adequadamente os resíduos de saúde, o que demonstra a distância entre a prática atual e as metas previstas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), que projeta a recuperação de 50% dos resíduos sólidos urbanos nas próximas duas décadas (Brasil, 2022a).

Nesse contexto, os Dispositivos Médicos Duráveis (DMDs) assumem papel estratégico, pois representam investimentos de alto valor agregado e são indispensáveis para a atenção de

média e alta complexidade, como é o caso de ventiladores pulmonares (Toscas et al., 2023) e monitores multiparamétricos (Tortorella et al., 2022), por exemplo. Sua aquisição, manutenção e descarte envolvem custos significativos e impactos ambientais expressivos (Hoveling et al., 2024; Kheirabadi; Sheikhi, 2022).

Embora os DMDs sejam candidatos naturais à adoção de práticas circulares, como remanufatura, reutilização e extensão de ciclo de vida, essas estratégias ainda são raramente implementadas nos hospitais brasileiros, em grande parte pela ausência de diretrizes específicas e por barreiras técnicas, regulatórias e culturais (Daú et al., 2019).

Paralelamente, a transformação digital e as tecnologias associadas à Indústria 4.0 oferecem instrumentos promissores para responder a esses desafios, viabilizando a rastreabilidade de ativos, manutenção preditiva, monitoramento de ciclo de vida e gestão inteligente de estoques (Benzidia; Makaoui; Bentahar, 2021; Leppälä; Vornanen; Savinen, 2023; Liu; Song; Liu, 2023).

No entanto, a realidade do sistema hospitalar público brasileiro evidencia uma adoção ainda incipiente dessas tecnologias, marcada por deficiências em infraestrutura tecnológica, baixa informatização de prontuários e falta de integração entre sistemas de manutenção e gestão (Abdel-Basset et al., 2024; Trindade et al., 2022). Iniciativas de telemedicina, por exemplo, só ganharam visibilidade durante a pandemia de COVID-19 e ainda apresentam desigualdades de acesso e estrutura (Bevere; Faccilongo, 2024). Muitos hospitais ainda operam em transição da Indústria 3.0 para a 4.0, o que limita a consolidação de ambientes digitais integrados e sustentáveis (Koşti, 2025).

Nos últimos anos, políticas públicas como o Programa SUS Digital instituído pelas Portarias GM/MS nº 3.232/2024 e 3.233/2024, e o Índice Nacional de Maturidade em Saúde Digital (INMSD), pela Portaria 3.727/2024 (Brasil, 2024a, 2024b, 2024c), representam esforços relevantes do governo brasileiro para fomentar interoperabilidade e digitalização no setor. Além disso, o Plano Nacional de Saúde para o período de 2024 a 2027 já preconiza o uso eficiente dos recursos e a digitalização para a melhoria da gestão de suas unidades (Brasil, 2024d)

Em paralelo, a Anvisa retomou em 2025 a divulgação de dados de preços de dispositivos médicos por meio de sua plataforma de *Business Intelligence*, evidenciando a centralidade desses ativos e a necessidade de maior transparência regulatória (ApexBrasil, 2024). Soma-se a isso o fortalecimento da indústria nacional de dispositivos médicos, com exportações que cresceram 24,6% em 2024, ampliando a relevância do Brasil no cenário internacional. Esses avanços, entretanto, ainda convivem com fragilidades de infraestrutura, desigualdade de acesso

e ausência de diretrizes específicas para a gestão sustentável dos DMDs, o que revela a distância entre o potencial transformador das tecnologias digitais e circulares e a realidade concreta da saúde pública brasileira.

Diante desse cenário, torna-se urgente a formulação de abordagens integradoras que conectem os princípios da Economia Circular às possibilidades abertas pela Indústria 4.0, superando barreiras estruturais e institucionais que dificultam a implementação de modelos mais sustentáveis. A ausência de diretrizes estratégicas claras e de frameworks aplicáveis à realidade hospitalar pública brasileira constitui a lacuna central desta pesquisa.

Assim, a questão de pesquisa que orienta este estudo é: *quais diretrizes estratégicas e framework podem ser propostos, a partir da integração entre Indústria 4.0 e Economia Circular, para a gestão sustentável de dispositivos médicos duráveis em hospitais públicos brasileiros?*

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta tese é propor um *framework* estratégico para a gestão sustentável de dispositivos médicos duráveis em hospitais públicos brasileiros, integrando os princípios da Economia Circular e as tecnologias da Indústria 4.0.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos para conduzir o desenvolvimento deste estudo:

- a) Descrever os processos de gestão do ciclo de vida útil de DMDs em hospitais públicos;
- b) Mapear os DMDs que possam integrar práticas da Economia Circular;
- c) Analisar os processos de aquisição, uso e descarte de DMDs em hospitais públicos;
- d) Analisar a relevância e a interrelação das barreiras e os fatores motivadores para a adoção da EC em DMDs;
- e) Identificar as tecnologias da I4.0 que podem apoiar o gerenciamento e a implementação da EC em DMDs no contexto brasileiro;
- f) Propor diretrizes estratégicas para a implementação de uma gestão digital e sustentável

de DMDs, organizadas em eixos de ação e apoiadas por tecnologias da I4.0.

Esses objetivos específicos oferecem uma base consistente para o desenvolvimento desta tese, conduzindo a investigação desde o mapeamento e a análise dos processos de aquisição, uso e descarte de dispositivos médicos em hospitais públicos até a proposição de diretrizes que possam favorecer a transição para práticas de Economia Circular. Ao integrar a análise de barreiras e fatores motivadores com a identificação das tecnologias da I4.0 mais relevantes ao contexto hospitalar, a pesquisa busca fornecer subsídios concretos para gestores, pesquisadores e formuladores de políticas públicas. O framework resultante configura-se como uma ferramenta estratégica e abrangente, orientando a adoção coordenada dos princípios da Economia Circular, dos 3R's da sustentabilidade e das tecnologias da I4.0, de modo a promover maior eficiência e sustentabilidade na gestão hospitalar brasileira.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A presente pesquisa justifica-se pela escassez de estudos que articulem a EC e as tecnologias da I4.0 no setor da saúde, sobretudo no contexto hospitalar público brasileiro. Enquanto há vasta literatura sobre práticas circulares na indústria e na manufatura (Elroi et al., 2023; Govindan; Hasanagic, 2018), a aplicação desses conceitos em hospitais ainda é incipiente, configurando uma lacuna tanto acadêmica quanto prática (Dixit; Dutta, 2024; Macneill et al., 2020). Em particular, não foram identificados frameworks consolidados para a gestão sustentável de DMDs, o que evidencia o ineditismo desta tese.

A escolha do segmento da saúde decorre de sua relevância estratégica: trata-se de um setor intensivo em consumo de energia, insumos e recursos tecnológicos, além de ser um dos principais geradores de resíduos complexos e perigosos (Guzzo et al., 2020; Schroeder; Anggraeni; Weber, 2019). Os hospitais, especialmente os públicos, concentram altos custos operacionais e enfrentam crescentes pressões por eficiência, qualidade e sustentabilidade, o que os torna campo prioritário para estudos de gestão inovadora.

Do ponto de vista setorial, os Resíduos de Serviços de Saúde (RSS) configuram um desafio expressivo no Brasil. Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, em 2023, foram geradas aproximadamente 293 mil toneladas de RSS oriundos de internações e procedimentos cirúrgicos, o que representou uma redução de 4,7% em comparação a 2022, quando a geração ultrapassou 307 mil toneladas (ABRELPE, 2024). Essa redução está relacionada à queda nas hospitalizações por Covid-19, que em 2022 ainda representavam alto

volume de resíduos emergenciais. Além disso, este relatório aponta que, regionalmente, o Sudeste se manteve como o maior gerador, com 66,5% do total de RSS gerados no país, seguido do Nordeste com 14,9%, enquanto o Norte respondeu por apenas 3,9% (ABRELPE, 2024). Esses dados não apenas confirmam a magnitude do problema, como também evidenciam desigualdades regionais que impactam diretamente a capacidade de gestão e tratamento adequado dos resíduos hospitalares.

Em perspectiva global, a literatura recente demonstra que o setor da saúde responde por cerca de 4,4% das emissões líquidas globais de Gases de Efeito Estufa (GEE), com predomínio das emissões de escopo 3 (emissões indiretas que ocorrem na sua cadeia de valor tanto à montante como à jusante), vinculadas à cadeia de suprimentos e ao consumo de materiais hospitalares (Karliner et al., 2019; Sergeant et al., 2024). Esses dados reforçam a centralidade da gestão de ativos e fluxos hospitalares na agenda climática e de circularidade, sobretudo em países em desenvolvimento, onde a infraestrutura de gestão de resíduos permanece deficitária. No caso brasileiro, a taxa de reciclagem de resíduos sólidos urbanos secos foi de apenas 8,3% em 2023, evidenciando o quão desafiador é avançar em modelos circulares sem diretrizes operacionais específicas voltadas para hospitais (ABRELPE, 2024). Destaca-se ainda que, parte significativa dos RSS possui caráter perigoso, o que exige classificação técnica rigorosa, rastreabilidade e uso de tecnologias da I4.0 que garantam maior controle de risco.

No plano regulatório, 2024 marcou a atualização da ABNT NBR 10004, que passou a alinhar a classificação nacional de resíduos aos referenciais internacionais e ao Sistema Globalmente Harmonizado de Classificação e Rotulagem de Produtos Químicos (GHS) (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024a, 2024b). Essa atualização trouxe impactos diretos sobre rotulagem, Fichas com Dados de Segurança de Resíduos (FDSRs) e sobre os Planos de Gerenciamento de Resíduos de Serviços de Saúde (PGRSS), exigindo maior integração entre a gestão ambiental e hospitalar. Em paralelo a isto, o Ministério da Saúde estruturou o Programa SUS Digital, com portarias específicas e manual instrutivo que orientam diagnósticos situacionais e a avaliação da maturidade digital por macrorregião (Brasil, 2024b, 2024c).

Embora representem avanços relevantes, esses instrumentos regulatórios não contemplam a governança do ciclo de vida dos DMDs, evidenciando a lacuna prática e científica que esta tese se propõe a preencher. Torna-se, assim, essencial o desenvolvimento de diretrizes que articulem EC e tecnologias da I4.0, incluindo rastreabilidade, manutenção preditiva, reprocessamento e conformidade regulatória.

Diante desse cenário, o foco nos DMDs se justifica por seu elevado valor agregado,

longa vida útil potencial e papel crítico na atenção de média e alta complexidade (Hoveling et al., 2024; Kheirabadi; Sheikhi, 2022). Apesar disso, a literatura aponta que parte significativa desses equipamentos permanece subutilizada, fora de operação ou descartada prematuramente por falhas de manutenção, ausência de rastreabilidade e lacunas normativas (Moyimane; Matlala; Kekana, 2017). Assim, os DMDs representam um campo privilegiado para a integração de práticas circulares e digitais, com forte impacto econômico, ambiental e social.

A decisão por analisar hospitais de média e alta complexidade no Nordeste brasileiro responde a duas razões principais. Primeiramente, tais unidades concentram maior demanda por DMDs e são responsáveis por procedimentos críticos que dependem fortemente desses equipamentos. Em segundo lugar, a literatura nacional e internacional privilegia estudos em grandes centros urbanos e hospitais de referência, negligenciando realidades regionais e interioranas (Macneill et al., 2020). O mapeamento realizado em hospitais nordestinos, portanto, confere maior representatividade à pesquisa, ao incluir cenários ainda pouco explorados, mas fundamentais para a compreensão da sustentabilidade hospitalar no SUS.

Dessa forma, esta tese justifica-se pela necessidade de propor soluções inovadoras que combinem princípios da Economia Circular e tecnologias da I4.0, superando barreiras estruturais e institucionais que limitam a gestão eficiente dos DMDs. O estudo se destaca por oferecer contribuições científicas, ao preencher lacunas teóricas; práticas, ao propor diretrizes aplicáveis à realidade hospitalar; econômicas, ao indicar caminhos de racionalização de custos; e ambientais, ao incentivar o prolongamento do ciclo de vida de equipamentos e a redução da geração de resíduos hospitalares.

Além de responder às demandas atuais do sistema hospitalar, esta tese se antecipa às tendências da Indústria 5.0, que reposiciona o ser humano, a sustentabilidade e a resiliência como elementos centrais da transformação digital (Koşti, 2025). Assim, a pesquisa posiciona-se estrategicamente para oferecer soluções inovadoras, escaláveis e aderentes às necessidades dos hospitais públicos brasileiros, contribuindo para a construção de sistemas de saúde mais sustentáveis, inteligentes e socialmente responsáveis.

1.4 LENTES TEÓRICAS DA TESE

As teorias organizacionais constituem um importante alicerce para compreender fenômenos complexos de gestão, pois oferecem lentes diversas para interpretar práticas, processos e interações institucionais (Govindan et al., 2024). No campo da gestão hospitalar e

da integração entre sustentabilidade e transformação digital, o uso de múltiplas teorias amplia a capacidade de análise, permitindo considerar simultaneamente dimensões estratégicas, sociotécnicas, humanas e institucionais (Ghobakhloo et al., 2021; Harikannan; Vinodh, 2025; Qureshi et al., 2024; Yadav et al., 2020b).

Nesta tese, a fundamentação teórica está centrada em quatro teorias que oferecem lentes complementares para a análise da gestão digital e sustentável de Dispositivos Médicos Duráveis (DMDs) em hospitais: a Teoria das Capacidades Dinâmicas, que explica a mobilização, adaptação e reconfiguração de recursos organizacionais em ambientes complexos; a Teoria da Complexidade, que permite compreender a natureza dinâmica, adaptativa e interdependente dos sistemas hospitalares; a Teoria Sociotécnica, que evidencia a necessidade de alinhamento entre componentes sociais e técnicos para alcançar desempenho organizacional sustentável; e a Teoria Institucional, que explicita o papel das pressões coercitivas, normativas e miméticas na conformidade organizacional e na busca por legitimidade diante de marcos regulatórios, políticas públicas e expectativas sociais. Essa estruturação encontra respaldo na literatura recente, que tem demonstrado a utilidade da abordagem multiteórica para analisar a adoção de tecnologias da I4.0 e práticas sustentáveis (Bai; Orzes; Sarkis, 2022; Beltrami et al., 2021; Ghobakhloo et al., 2021; Govindan et al., 2024).

1.4.1 Teorias das Capacidades Dinâmicas

A Teoria das Capacidades Dinâmicas explica como os ativos, competências e conhecimentos das organizações constituem a base para o alcance de vantagem competitiva e para a sustentação de processos de transformação (Govindan et al., 2024). No contexto da saúde, essa teoria permite compreender como recursos tangíveis e intangíveis, quando adequadamente geridos e reconfigurados, contribuem para práticas mais eficientes, digitais e sustentáveis no gerenciamento de dispositivos médicos duráveis (DMDs).

Essa abordagem sustenta que a vantagem competitiva de longo prazo depende da habilidade da organização em integrar, reconfigurar e renovar recursos diante de ambientes dinâmicos (Aichouni; Silva; Ferreira, 2024; Piening, 2013; Zhang et al., 2023a). Na gestão de DMDs, essa lente teórica contribui para explicar como hospitais podem desenvolver capacidades de aprendizagem, inovação e flexibilidade para responder a pressões regulatórias, adotar tecnologias da I4.0 e avançar em práticas de economia circular.

1.4.2 Teorias da Complexidade/ Sistemas Complexos

A Teoria da Complexidade oferece uma lente abrangente para compreender como sistemas organizacionais se estruturam a partir de interações dinâmicas entre pessoas, práticas, processos e tecnologias (Burnes, 2005; Pomeroy et al., 2023). No contexto hospitalar, essa teoria é essencial para analisar a gestão de DMDs, uma vez que tal processo não depende apenas de recursos tangíveis, mas também de fluxos de informação, relações de trabalho, práticas de coordenação e do alinhamento entre atores humanos e elementos técnicos (Westover, 2024).

Essa teoria parte do princípio de que as organizações funcionam como sistemas dinâmicos, caracterizados por interações não lineares, emergência de padrões e adaptação contínua (Burnes, 2005; Westover, 2024). No contexto dos hospitais, a Teoria da Complexidade explica como múltiplos atores (gestores, profissionais de saúde, fornecedores e órgãos reguladores) interagem em redes complexas que moldam os processos de aquisição, uso e descarte dos DMDs (Johannessen, 2022; Westover, 2024). Essa lente permite interpretar as dificuldades de padronização e controle em ambientes de alta incerteza e reforça a importância de mecanismos de aprendizagem e resiliência para lidar com mudanças.

Além disso, ao reconhecer a natureza sistêmica dessas interações, a teoria possibilita compreender as barreiras e os drivers como elementos interdependentes que se manifestam em sistemas hospitalares complexos, influenciando-se mutuamente em diferentes níveis de gestão. Esse entendimento justifica a aplicação de métodos multicritério, como o DEMATEL, que permite mapear a intensidade e a direção das relações entre barreiras e drivers, identificando quais exercem maior influência e quais são mais dependentes. Dessa forma, a abordagem da complexidade, articulada ao DEMATEL, contribui para uma análise robusta das dinâmicas que dificultam ou potencializam a gestão sustentável dos DMDs, fornecendo uma base teórica consistente para a formulação de estratégias de intervenção nos hospitais.

1.4.3 Teoria Sociotécnica

A Teoria Sociotécnica constitui uma das principais lentes para compreender o desempenho organizacional em ambientes complexos, ao sustentar que os resultados só são alcançados de forma sustentável quando há integração equilibrada entre subsistemas sociais (pessoas, cultura, relações de trabalho) e subsistemas técnicos (tecnologias, processos, equipamentos) (Bakhuis et al., 2024; Savaget et al., 2019).

No contexto hospitalar, essa teoria é particularmente relevante para a gestão de Dispositivos Médicos Duráveis (DMDs), pois evidencia que tais dispositivos, enquanto elementos técnicos, precisam estar em harmonia com práticas de capacitação, rotinas de gestão e colaboração entre profissionais de saúde. Essa perspectiva reforça que a adoção de tecnologias da I4.0, como sistemas de rastreabilidade, sensores inteligentes e plataformas de interoperabilidade, somente gera benefícios efetivos quando acompanhada de mudanças sociais e organizacionais, incluindo treinamento, engajamento das equipes e práticas de governança participativa.

Dessa forma, a Teoria Sociotécnica amplia a compreensão de que a sustentabilidade na gestão de DMDs não se limita ao desempenho operacional, mas depende da articulação entre inovação tecnológica, cultura organizacional e valorização das práticas humanas, assegurando eficiência, segurança do paciente e legitimidade institucional. Essa perspectiva estabelece ainda a base conceitual que dialoga com os capítulos 5 e 6 desta tese, nos quais as tecnologias da I4.0 são, respectivamente, identificadas na literatura como instrumentos de circularidade hospitalar e validadas empiricamente a partir dos critérios que orientam sua adoção no contexto do SUS.

1.4.4 Teoria Institucional

A Teoria Institucional oferece uma perspectiva fundamental para compreender como normas, regulamentos e expectativas sociais moldam as práticas organizacionais (Aksom; Tymchenko, 2020; David; Tolbert; Boghossian, 2019). Diferentemente de abordagens centradas apenas na eficiência técnica ou no uso de recursos, essa teoria enfatiza que as organizações frequentemente adotam práticas, estruturas e tecnologias não apenas por critérios de desempenho, mas pela necessidade de atender exigências legais, conquistar legitimidade perante a sociedade e alinhar-se às pressões institucionais predominantes (Govindan et al., 2024).

No contexto hospitalar, a Teoria Institucional é particularmente relevante para analisar a gestão de DMDs, uma vez que esses processos estão diretamente submetidos a marcos regulatórios, como a Lei nº 14.133/2021 (Nova Lei de Licitações e Contratos) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010). Além disso, órgãos reguladores, instâncias de controle e pressões da sociedade civil atuam como forças normativas que influenciam a forma como os hospitais conduzem a aquisição, manutenção, uso e descarte de DMDs.

Essa teoria distingue três tipos de pressões institucionais que impactam diretamente a

gestão hospitalar: pressões coercitivas, relacionadas às obrigações legais e regulamentares; pressões normativas, associadas a padrões profissionais, protocolos clínicos e auditorias; e pressões miméticas, derivadas da tendência de replicar modelos adotados por hospitais de referência ou considerados mais legítimos. Tais elementos ajudam a explicar a adoção de tecnologias digitais e práticas de sustentabilidade mais pela busca de legitimidade do que por critérios puramente técnicos ou econômicos.

Dessa forma, a Teoria Institucional complementa as demais lentes desta tese ao evidenciar que a transformação digital e sustentável dos hospitais depende não apenas da reconfiguração de recursos, da adaptação a sistemas complexos ou do equilíbrio sociotécnico, mas também da capacidade de responder às pressões institucionais que condicionam a atuação organizacional. A lente orienta a análise empírica nos Capítulos 3, 4, 5 e 6 e fundamenta diretrizes de governança, implementação e monitoramento no Capítulo 7 e 8, com foco em legitimidade, conformidade regulatória, rastreabilidade e *accountability*.

1.4.5 Visão Integrada do Arcabouço Teórico

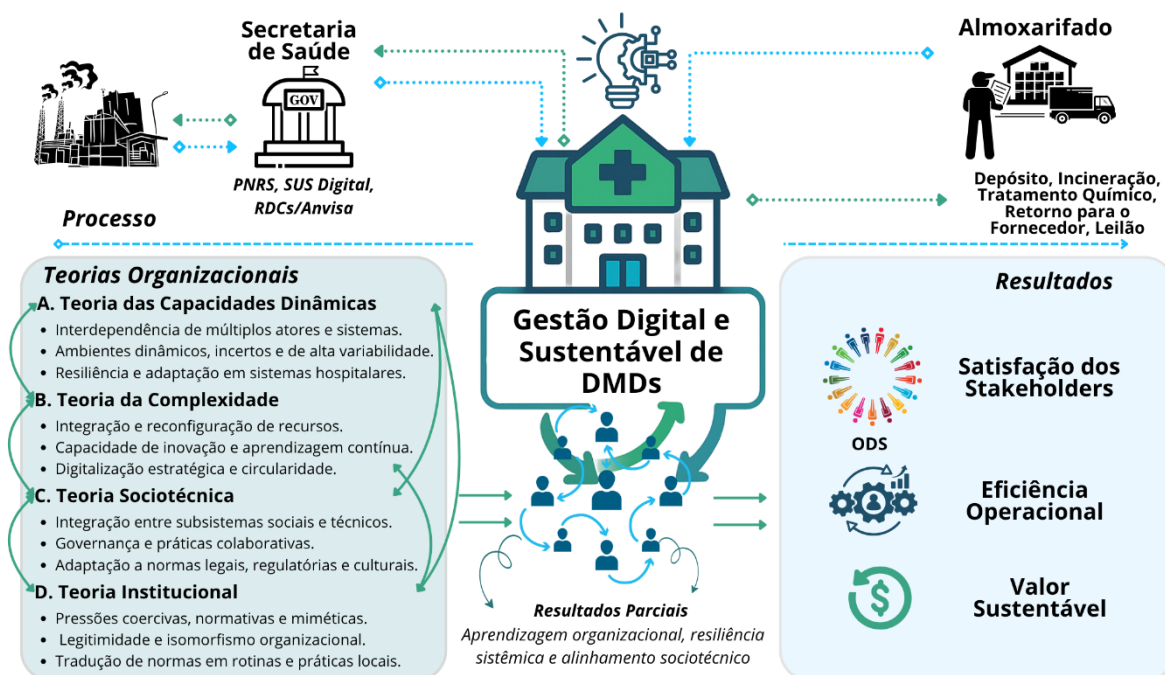
A integração das quatro lentes teóricas selecionadas (Capacidades Dinâmicas, Complexidade, Sociotécnica e Teoria Institucional) conforma o arcabouço teórico desta tese, que sustenta a análise da gestão digital e sustentável de DMDs em hospitais. Cada teoria contribui com pressupostos analíticos específicos e complementares, permitindo compreender o fenômeno em múltiplas dimensões: recursos organizacionais e sua reconfiguração, sistemas complexos e adaptativos, a integração equilibrada entre componentes técnicos e sociais, as pressões do ambiente externo e as pressões normativas e institucionais que condicionam as práticas de gestão.

Enquanto as teorias das Capacidades Dinâmicas, da Complexidade e Sociotécnica explicam os mecanismos internos de adaptação, integração e aprendizagem, a Teoria Institucional amplia o escopo analítico ao situar tais mecanismos sob a influência de pressões externas de legitimidade, conformidade e isomorfismo. Essa combinação permite compreender o hospital como um sistema sociotécnico-institucional aberto, cuja capacidade de adaptação depende simultaneamente da inovação interna e da resposta às exigências do ambiente regulatório, tecnológico e social.

A Figura 1 apresenta o *framework* teórico proposto, no qual a gestão dos DMDs é situada como processo central, articulando entradas institucionais e organizacionais,

mecanismos intermediários de aprendizagem, adaptação e resultados orientados à sustentabilidade e aos ODS. Os fluxos representados na figura diferenciam entradas institucionais (pressões externas, dispositivos médicos e diretrizes de políticas públicas), saídas de resultados e retroalimentação (dispositivos médicos, informações, documentos) e interações colaborativas (processos de aprendizagem e inovação contínua).

Figura 1 – Framework Teórico



Fonte: Elaboração própria (2025).

Legenda:

- ◆.....▶ (Setas Azuis Claro tracejadas): Fluxos de *inputs* institucionais no gerenciamento de DMD.
- ◆.....▶ (Setas Verdes tracejadas): Fluxos de *outputs* institucionais no gerenciamento de DMD.
- ▶ (Setas Verdes): Fluxos de colaboração, aprendizados e resultados.

A composição gráfica do *framework* sintetiza um sistema hospitalar aberto, adaptativo e legitimado, em que entradas institucionais são reinterpretadas internamente por meio de mecanismos sociotécnicos e capacidades dinâmicas, resultando em respostas organizacionais complexas e sustentáveis. Essa lógica de integração expressa visualmente um sistema de gestão robusto e complexo, que articula múltiplos atores (institucionais, organizacionais e humanos) em torno de um objetivo comum: assegurar a disponibilidade e o uso eficiente dos DMDs, contribuindo para a prestação de um serviço de saúde de qualidade.

A Figura 1 evidencia que o hospital ocupa a posição central como lócus das práticas de

gestão, mas conectado a múltiplos elementos do ecossistema: de um lado, a Secretaria de Saúde e as políticas públicas e regulatórias (PNRS, SUS Digital, RDCs/Anvisa), que condicionam práticas e impõem pressões externas; de outro, o almoxarifado e a rede logística (depósito, tratamento, retorno ao fornecedor, incineração, leilão), que representam a materialidade do ciclo de vida dos DMDs.

No lado esquerdo do *framework*, destacam-se as quatro teorias organizacionais que sustentam a análise:

- A Teoria das Capacidades Dinâmicas oferece a base para compreender como hospitais conseguem integrar, reconfigurar e renovar recursos para lidar com ambientes em constante transformação. Ela justifica a necessidade de capacidades de inovação, digitalização estratégica e circularidade, fundamentais para que instituições de saúde respondam a pressões regulatórias e tecnológicas sem comprometer sua eficiência (Bai; Orzes; Sarkis, 2022; Bai; Zhou; Sarkis, 2023; Beltrami et al., 2021).
- A Teoria da Complexidade amplia a visão, explicando que os hospitais operam em ambientes incertos, de alta variabilidade e interdependência sistêmica. Essa lente ajuda a interpretar por que os processos de aquisição, manutenção e descarte de DMDs estão sujeitos a fatores imprevistos e não lineares, e destaca a relevância da resiliência organizacional como estratégia de adaptação em cenários de instabilidade (Ghobakhloo et al., 2021).
- A Teoria Sociotécnica, por sua vez, assegura que a análise não se restrinja aos equipamentos ou às tecnologias digitais, mas contemple também os atores humanos, a cultura organizacional e os arranjos de governança. Essa teoria sustenta que apenas o alinhamento entre componentes sociais e técnicos permite alcançar resultados sustentáveis, integrando segurança do paciente, eficiência operacional e legitimidade institucional (Beltrami et al., 2021; Govindan et al., 2024).
- A Teoria Institucional elucida como as pressões externas do campo organizacional moldam as práticas hospitalares. Ela explica que a adoção de tecnologias e processos de gestão de DMDs não decorre apenas de uma escolha racional por eficiência, mas também da busca por legitimidade frente a órgãos reguladores, associações profissionais e à sociedade. Essa lente teórica é crucial para entender a influência de forças coercitivas (leis), miméticas (imitação de práticas de sucesso) e normativas (profissionalização) na conformação das estratégias de gestão (DiMaggio; Powell, 1983; Scott, 2008; Jepperson; Meyer, 2021).

Na base do *framework*, são destacados os resultados parciais: aprendizagem

organizacional, resiliência sistêmica e alinhamento sociotécnico. Esses elementos funcionam como mediadores teóricos, traduzindo em práticas concretas os pressupostos das quatro lentes e preparando o terreno para os resultados finais.

À direita da figura, estão representados os resultados esperados do *framework*: satisfação dos *stakeholders*, eficiência operacional e valor sustentável, em alinhamento com os ODS. Esses resultados não são vistos apenas como metas organizacionais, mas como respostas adaptativas do sistema hospitalar, que retroalimentam o ambiente institucional e fortalecem a coevolução entre políticas públicas, práticas de gestão e inovação tecnológica.

Dessa forma, a Figura 1 sintetiza como a gestão digital e sustentável de DMDs emerge da interação entre recursos organizacionais, sistemas adaptativos e integração sociotécnica, sob a regulação das políticas públicas e pressões externas. O *Framework* Teórico, portanto, robustece a tese ao demonstrar que a implementação de práticas de economia circular e tecnologias da I4.0 em hospitais não pode ser compreendida por uma única lente, mas requer uma visão integrada capaz de articular transformação digital, sustentabilidade e legitimidade institucional. Essa integração fornece um arcabouço analítico inovador, que amplia as fronteiras da literatura ao propor uma visão sistêmica da gestão hospitalar orientada à sustentabilidade.

1.5 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

A delimitação desta pesquisa é essencial para explicitar o escopo da investigação, destacando os critérios adotados para circunscrever o campo de análise e reconhecer as limitações inerentes ao estudo. Nesse sentido, a delimitação foi estruturada em quatro dimensões principais: teórica, metodológica, empírica e geográfica/temporal. Essa classificação permite maior clareza sobre os limites do estudo, evitando generalizações indevidas e orientando a interpretação adequada dos resultados (Oliveira, 2023; Rodrigues, 2023).

1.5.1 Delimitação teórica

A revisão bibliográfica concentrou-se nas bases *Scopus*, *Web of Science* e *PubMed*, que são reconhecidas pela abrangência e rigor acadêmico, complementadas por fontes “cinzentas”, como Google Acadêmico, e anais de congressos nacionais em Engenharia de Produção, como SIMPEP e ENEGEP, por exemplo. Foram considerados trabalhos publicados nos últimos dez anos, disponíveis em inglês, português e espanhol, excluindo-se publicações em outros idiomas.

Ainda assim, reconhece-se que a literatura analisada pode não refletir integralmente o estado da arte, sobretudo no Brasil, dado que nem todas as produções não indexadas foram incorporadas. Essa delimitação assegura rigor, mas evidencia a possibilidade de lacunas teóricas.

1.5.2 Delimitação metodológica

A etapa empírica desta pesquisa foi conduzida por meio de questionários estruturados, cada um com finalidades distintas e complementares. O primeiro questionário, aplicado in loco durante as visitas técnicas, mas compartilhado com os respondentes por meio de formulário eletrônico para garantir o anonimato da fonte, teve caráter exploratório, buscando mapear os processos de gestão de DMDs a partir da percepção e do conhecimento dos gestores hospitalares. Os participantes dessa etapa compreendem apenas a região nordeste do Brasil.

O segundo questionário utilizou o método *Decision Making Trial and Evaluation Laboratory* (DEMATEL), com o objetivo de identificar e analisar as relações de influência entre as barreiras e os fatores impulsionadores para a implementação da EC no contexto hospitalar, sendo encaminhado a gestores de todo o Brasil, assim como o terceiro questionário, que por sua vez, aplicou o método *Best-Worst Method* (BWM) para validar os critérios considerados mais relevantes no processo de escolha das tecnologias da I4.0, possibilitando, em seguida, hierarquizar as tecnologias que se mostraram mais alinhadas ao critério de maior evidência.

Essa combinação metodológica se justifica pela capacidade de integrar tanto a análise exploratória inicial quanto a validação estruturada de critérios e relações de influência, oferecendo uma visão abrangente e consistente do fenômeno investigado. Ainda assim, cabe destacar que a pesquisa não contemplou entrevistas abertas, análises qualitativas em profundidade ou métodos financeiros de avaliação de viabilidade econômica, o que restringe a captura de percepções subjetivas mais amplas e análises de retorno de investimento. Além disso, a utilização de instrumentos eletrônicos pode ter limitado a participação de profissionais com menor familiaridade com ferramentas digitais.

1.5.3 Delimitação empírica

O estudo concentra-se exclusivamente em hospitais públicos brasileiros de média e alta

complexidade, uma vez que essas instituições concentram o maior volume e diversidade de DMDs, além de apresentarem maior complexidade operacional e desafios de gestão quando comparadas a outras modalidades de serviços de saúde. A escolha desse recorte também se justifica pelo fato de tais hospitais possuírem papel central na rede assistencial do SUS, sendo responsáveis pela maior parte dos atendimentos de alta tecnologia e pelo uso intensivo de equipamentos médicos de grande porte (Gadelha, 2022; Govindan et al., 2024). Foram excluídos hospitais privados, unidades básicas de saúde e instituições de baixa complexidade, cujo perfil de equipamentos é restrito, de menor sofisticação tecnológica e pouco representativo para a análise da circularidade e da transformação digital em larga escala (Beltrami et al., 2021).

No que se refere ao objeto de estudo, a investigação delimita-se aos Dispositivos Médicos Duráveis, definidos como equipamentos de elevado valor agregado, longa vida útil e potencial de reaproveitamento em ciclos de manutenção, reuso e destinação final. São exemplos desse grupo ventiladores pulmonares, monitores multiparamétricos, bombas de infusão, equipamentos de anestesia, eletrocardiógrafos e aparelhos de hemodiálise. A exclusão de dispositivos descartáveis ou semi-duráveis deve-se ao fato de possuírem menor relevância estratégica em termos de gestão de ativos, baixo potencial de reaproveitamento e ciclos de vida predominantemente curtos, o que inviabiliza sua associação com práticas robustas de economia circular (Johannessen, 2022; Westover, 2024). Esse recorte privilegia os DMDs por sua importância tanto na sustentabilidade financeira dos hospitais quanto no cumprimento das exigências regulatórias e ambientais do setor da saúde (Bai; Orzes; Sarkis, 2022).

Ainda que a discussão conceitual e classificatória detalhada dos DMDs esteja apresentada no Artigo 4 desta tese, nesta seção o objetivo é reforçar o recorte empírico que orienta a análise e deixar claro que os DMDs estudados constituem o núcleo de maior impacto na intersecção entre eficiência hospitalar, sustentabilidade e transformação digital.

Além disso, a pesquisa contemplou a aplicação de três questionários distintos (Apêndice B, D e G), elaborados para públicos complementares: gestores hospitalares, especialistas em tecnologias da I4.0, especialistas em gestão sustentável e pesquisadores/*policymakers* da área da saúde. Essa diferenciação assegura diversidade de perspectivas e maior aderência do estudo à realidade hospitalar, fortalecendo a triangulação das evidências obtidas. Tal estratégia metodológica confere robustez à investigação ao combinar percepções práticas, tecnológicas e institucionais, ampliando o alcance analítico e a validade dos resultados (Harikannan; Vinodh, 2025; Qureshi et al., 2024).

1.5.4 Delimitação geográfica

A investigação empírica concentrou-se em hospitais públicos de média e alta complexidade localizados na região Nordeste do Brasil. Essa escolha reflete uma realidade que combina limitações estruturais e orçamentárias com reconhecidas práticas inovadoras em gestão pública, permitindo analisar de forma aprofundada um contexto ainda pouco explorado pela literatura, tradicionalmente centrada em grandes centros urbanos e instituições privadas.

1.5.5 Recorte Temporal

O recorte temporal desta pesquisa está situado entre os anos de 2024 e 2027, período em que vigoram os principais instrumentos estratégicos de planejamento do Estado brasileiro, com ênfase no Plano Plurianual (PPA 2024-2027) e no Plano Nacional de Saúde (PNS 2024-2027) (Brasil, 2024d; Brasil, 2024a). Ambos orientam a formulação de políticas públicas e a execução das ações governamentais, incluindo diretrizes para a saúde, sustentabilidade, digitalização e eficiência no uso de recursos. Dessa forma, a tese dialoga diretamente com a conjuntura normativa e programática vigente, garantindo aderência institucional e relevância prática às propostas formuladas.

1.5.6 Marco Normativo e de Planejamento

A fundamentação desta pesquisa encontra respaldo em um conjunto de normativos legais e instrumentos estratégicos que orientam a gestão pública no Brasil. Eles são organizados em três eixos principais: Instrumentos Estratégicos de Planejamento Federal, Instrumentos Estratégicos de Saúde Digital e Normativos Sanitários da ANVISA Aplicáveis a DMDs.

a) Instrumentos Estratégicos de Planejamento Federal

- Plano Plurianual (Lei nº 14.820/2024) – define programas e ações estruturantes para o período 2024–2027.
- Plano Nacional de Saúde (PNS 2024–2027) – estabelece diretrizes, objetivos e metas da política de saúde no Brasil.
- Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) – regulamenta a gestão integrada de resíduos, incluindo reuso e reciclagem.

- Lei de Licitações e Contratos da Administração Pública (Lei nº 14.133/2021) – regula a gestão de compras e contratações públicas.
- Lei Geral de Proteção de Dados (Lei nº 13.709/2018) – orienta a proteção de dados pessoais, especialmente relevantes para a saúde digital.

b) Instrumentos Estratégicos de Saúde Digital

- Estratégia de Saúde Digital para o Brasil 2020–2028 (ESD28) – orienta a transformação digital no setor saúde.
- Política Nacional de Informação e Informática em Saúde (PNIIS/2021) – estabelece fundamentos para interoperabilidade e segurança de dados.
- Programa SUS Digital (Portaria GM/MS nº 3.232/2024) – define diretrizes para a digitalização do SUS.
- Índice Nacional de Maturidade em Saúde Digital (INMSD/2021) – ferramenta de diagnóstico da capacidade digital das instituições de saúde.

c) Normativos Sanitários da ANVISA Aplicáveis a DMDs

- RDC nº 751/2022 – dispõe sobre classificação de risco, registro, rotulagem e conformidade dos dispositivos médicos, incluindo rastreabilidade e revalidação.
- RDC nº 156/2006 – regulamenta o registro, rotulagem e reprocessamento de produtos médicos duráveis, estabelecendo requisitos para reutilização segura.
- RDC nº 67/2009 – estabelece Boas Práticas de Reprocessamento de produtos médicos reutilizáveis.
- RDC nº 579/2021 – regula especificamente dispositivos médicos usados ou recondicionados, com protocolos diferenciados de validação, limpeza e esterilização.

A sistematização desses normativos reforça a pertinência da tese ao situá-la no cruzamento entre saúde digital, sustentabilidade e gestão de dispositivos médicos duráveis (DMDs). Além de atender aos parâmetros legais e estratégicos vigentes, a proposta contribui para preencher lacunas ainda pouco exploradas pela literatura e pela prática hospitalar, especialmente no contexto dos hospitais públicos brasileiros. Dessa forma, o framework elaborado neste estudo não apenas responde a demandas acadêmicas, mas também oferece subsídios aplicáveis à formulação e execução de políticas públicas alinhadas à transformação digital e à economia circular em saúde.

1.6 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese foi organizada no formato de compêndio de artigos científicos, conforme previsto na Resolução nº 002/PPGEP/2018, aprovada em 7 de novembro de 2018. Esse formato permite que a tese seja composta por artigos publicados, aceitos ou submetidos a periódicos científicos qualificados, desde que conectados por uma linha argumentativa coerente e articulados com os objetivos gerais e específicos da pesquisa. A referida resolução está disponível no site do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSC (<https://ppgep.ufsc.br/resolucoes-e-outros/>).

A estrutura da tese está dividida em nove capítulos. Os capítulos 3 a 8 correspondem aos artigos científicos que compõem o compêndio. Alguns artigos foram redigidos em português e outros em inglês, em conformidade com as exigências dos periódicos aos quais foram submetidos. Os demais capítulos — introdução, metodologia, proposta aplicada e considerações finais — foram elaborados em português, atendendo à norma culta da língua e à formatação ABNT. Essa opção bilíngue segue as diretrizes da Resolução supracitada e contribui para a internacionalização da produção acadêmica.

Ao final, constam as Referências e os Apêndices, que reúnem os instrumentos de coleta de dados, documentos de aprovação ética e materiais complementares de suporte metodológico. A seguir, apresenta-se a organização dos capítulos .

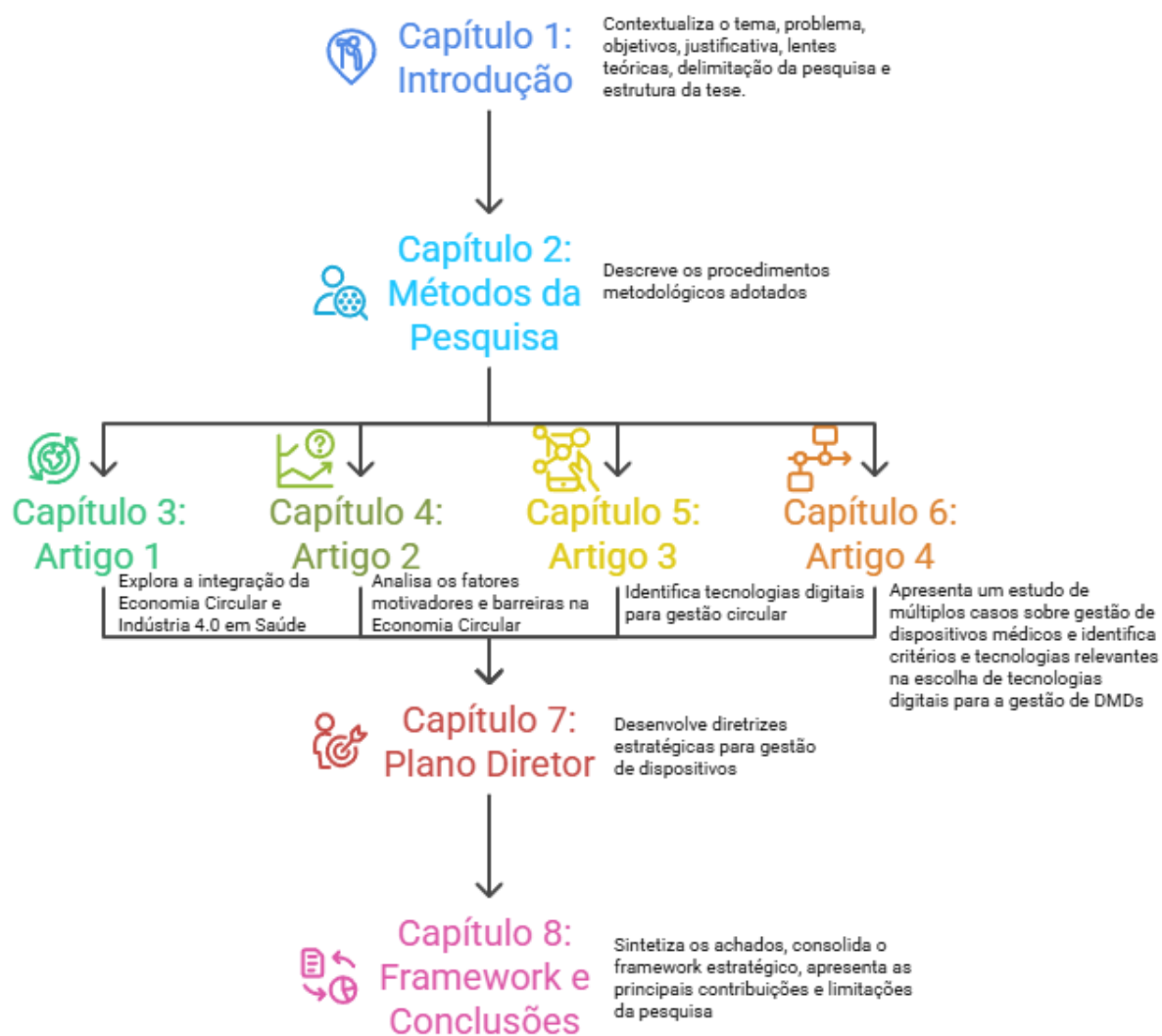
- Capítulo 1 – Introdução: apresenta a contextualização do tema, a delimitação do problema de pesquisa e os objetivos geral e específicos. Expõe a justificativa do estudo e descreve a estrutura da tese.
- Capítulo 2 – Métodos da Pesquisa: Detalha os procedimentos metodológicos adotados, incluindo revisão sistemática, métodos multicritérios, questionários exploratórios e aspectos éticos da pesquisa.
- Capítulo 3 – Gestão Sustentável de Dispositivos Médicos Duráveis com Tecnologias da Indústria 4.0: Um Ensaio Empírico no Setor Hospitalar (Artigo 1 do compêndio de artigos): Apresenta uma revisão sistemática integrativa que mapeia lacunas sobre a integração entre Economia Circular e Indústria 4.0 no contexto hospitalar. Complementa com questionário aplicado a gestores para identificar DMDs relevantes, barreiras, impulsionadores e tecnologias empregadas.
- Capítulo 4 – *Circular economy in hospitals: drivers, barriers, and key concepts for implementation* (Artigo 2 do compêndio de artigos): desenvolve uma revisão sistemática de literatura com análise conceitual e aplicação do *Decision Making Trial*

and Evaluation Laboratory (DEMATEL) para aprofundar a compreensão das relações entre barreiras e fatores motivadores. Oferece um vocabulário comum e um mapa causal para orientar intervenções em EC em hospitais.

- Capítulo 5 – *Digital Innovations in Healthcare: How Industry 4.0 Technologies Enable Circularity in Hospitals* (Artigo 3 do compêndio de artigos): realiza revisão sistemática da literatura para identificar tecnologias da I4.0 aplicáveis à gestão circular de DMDs. Discute mecanismos de habilitação (rastreadibilidade, interoperabilidade e análise de dados) e implicações gerenciais.
- Capítulo 6 – *From lifecycle mapping to digital transformation: industry 4.0 technologies in durable medical device management in Brazil's public hospitals* (Artigo 4 do compêndio de artigos): Apresenta estudo de múltiplos casos com mapeamento de ciclo de vida (processos de aquisição, uso e destinação final) de DMDs. Integra análise multicritério pela aplicação do *Best-Worst Method* (BWM) para identificar tecnologias relevantes para integrar a transformação digital da saúde pública brasileira.
- Capítulo 7 – Proposta de Plano Diretor de Gestão de Dispositivos Médicos Duráveis para o Ministério da Saúde brasileiro: consolida evidências dos artigos em uma proposta com diretrizes estratégicas para a gestão sustentável e digital de DMDs. Define princípios, eixos, metas, indicadores e diretrizes de implementação.
- Capítulo 8 – Proposta de *Framework* e Conclusões da Tese: consolida os principais achados da pesquisa e apresenta a proposta de *framework* teórico e conceitual para a gestão sustentável e digital de DMDs. Explica detalhadamente os elementos que compõem o *framework*, discute-o em diálogo com a literatura científica e sistematiza as conclusões da tese, destacando o cumprimento dos objetivos, as contribuições teóricas, práticas e gerenciais, bem como as limitações do estudo e direções para pesquisas futuras.

Essa organização garante a coerência entre os artigos, os objetivos da pesquisa e o produto final da tese, fortalecendo a robustez metodológica e a aplicabilidade dos resultados.

Figura 2 – Estrutura da Tese



Fonte: Elaboração própria (2025), utilizando o aplicativo Napikin.

Essa organização garante a coerência entre os artigos, os objetivos da pesquisa e o produto final da tese, fortalecendo a robustez metodológica e a aplicabilidade dos resultados. Na seção de Métodos, apresenta-se de forma mais detalhada como os artigos se interrelacionam e como contribuem para alcançar os objetivos traçados nesta tese.

2 MÉTODOS

2.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Conforme a tipologia proposta por Gil (2022), esta investigação caracteriza-se como aplicada, pois busca propor soluções práticas para a gestão de dispositivos médicos duráveis em hospitais públicos, integrando os princípios da Economia Circular (EC) às tecnologias da I4.0. Seu propósito é reduzir impactos ambientais, otimizar recursos e contribuir para a sustentabilidade e a eficiência operacional hospitalar.

No que se refere aos objetivos, o estudo apresenta um caráter exploratório e descritivo (GIL, 2022). O caráter exploratório se expressa na investigação de barreiras pouco abordadas na literatura e na identificação de tecnologias digitais aplicáveis ao contexto hospitalar. O aspecto descritivo fundamenta-se na análise de políticas públicas, legislações e práticas de gestão existentes. Além disso, há também um viés explicativo, evidenciado na análise das relações de causa e efeito entre barreiras e fatores motivadores, conduzida pelo método DEMATEL.

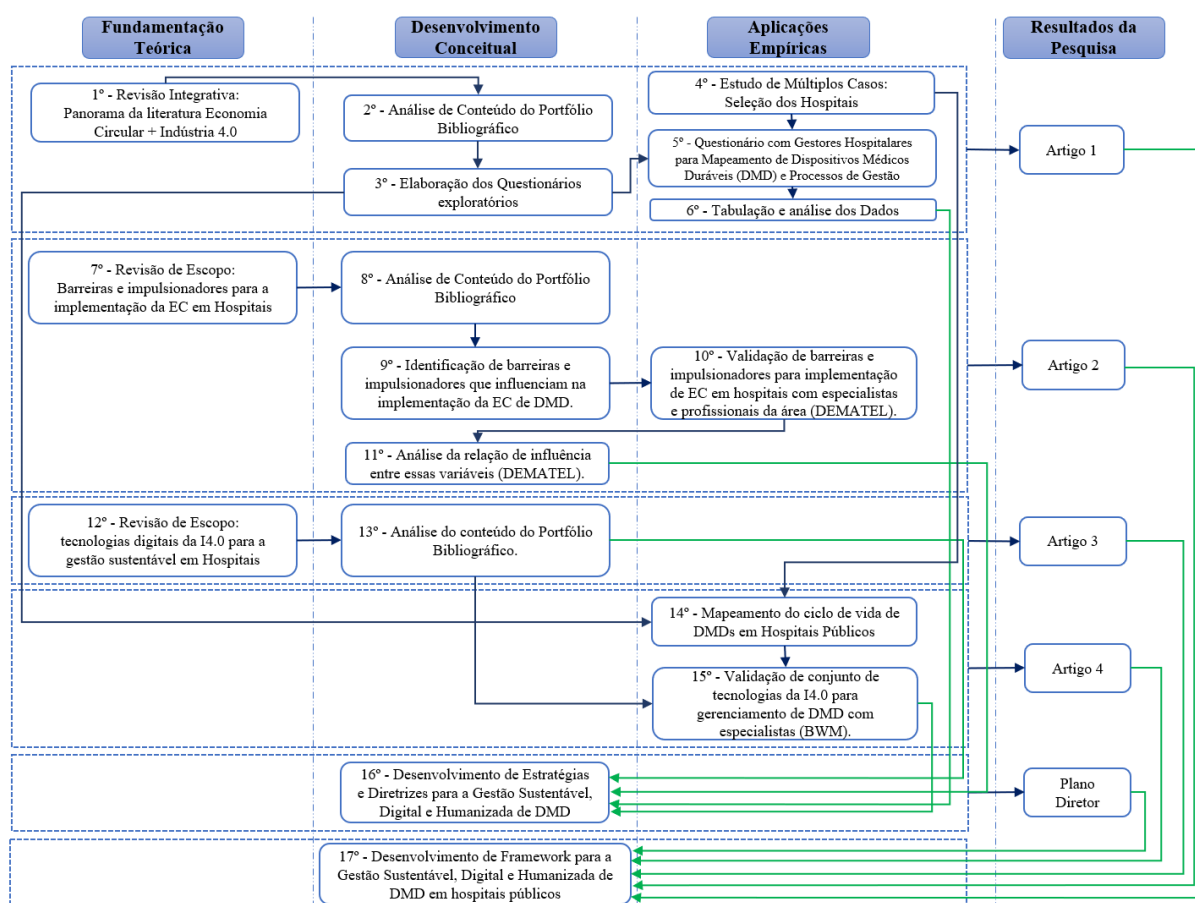
A abordagem metodológica segue uma estratégia mista, combinando componentes qualitativos e quantitativos, conforme a classificação de Marconi e Lakatos (2021). O componente qualitativo envolve a análise de documentos legais, normativos e políticas públicas, bem como a interpretação das percepções de gestores hospitalares sobre barreiras e oportunidades da EC. O componente quantitativo contempla a aplicação de questionários estruturados, a hierarquização de critérios e tecnologias por meio do BWM e a análise de inter-relações entre variáveis por meio do DEMATEL.

Finalmente, quanto ao método de pesquisa, inicia-se com um levantamento bibliográfico e documental, incluindo uma revisão sistemática de literatura baseada em Moher et al. (2009) para consolidar conceitos, barreiras, drivers e tecnologias. Em seguida, procede-se à análise de conteúdo das políticas e legislações relacionadas à gestão de dispositivos médicos. Por fim, a etapa empírica contempla a aplicação de questionários junto a profissionais de hospitais públicos, permitindo validar barreiras, identificar prioridades e sustentar a proposição de diretrizes práticas. Essa combinação metodológica proporciona uma visão abrangente e robusta, fortalecendo a integração entre sustentabilidade, digitalização e eficiência hospitalar.

2.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A presente tese está estruturada em 17 passos metodológicos, organizados em três grandes eixos (Fundamentação Teórica, Desenvolvimento Conceitual e Aplicações Empíricas) que se articulam de forma progressiva até a elaboração de um plano diretor e na construção de um framework conceitual para a gestão sustentável e digital de DMDs de hospitais públicos. A Figura 3 apresenta uma visão geral do processo investigativo, reunindo as principais etapas e procedimentos adotados ao longo da pesquisa.

Figura 3 – Procedimentos metodológicos, passos e produtos da tese



Fonte: Elaboração própria (2025) com base em modelo do Laboratório de Desempenho Logístico UFSC.

O percurso metodológico inicia-se com uma revisão integrativa e duas de sitemáticas. A primeira consiste em um mapeamento bibliográfico que integra literatura sobre EC e I4.0 (Passo 1). Em seguida, é realizada a revisão voltada para as barreiras e os impulsionadores para a implementação da EC em hospitais (Passo 7), e posteriormente a revisão sobre as tecnologias da I4.0 aplicáveis à gestão sustentável em hospitais (Passo 12).

Essas revisões foram complementadas por análises de conteúdo do portfólio

bibliográfico (Passos 2, 8 e 13) e pela elaboração dos questionários exploratórios (Passo 3), que deram suporte ao componente empírico. Os três instrumentos de coleta elaborados encontram-se sintetizados no Quadro 1, que apresenta os principais instrumentos de coleta de dados empíricos para a construção da tese.

Quadro 1 – Instrumentos de coleta de dados empíricos aplicados na pesquisa

Questionário	Capítulo	Público-alvo	Objetivo principal	Contribuição para a tese
Questionário 1	4	Gestores hospitalares de média e alta complexidade	Identificar práticas de gestão de DMDs, barreiras enfrentadas e tecnologias digitais utilizadas	Fornecer a perspectiva prática da gestão hospitalar e mapear a relevância dos DMDs no ciclo de vida
Questionário 2	5	Pesquisadores e especialistas em gestão sustentável e políticas públicas de saúde	Validar barreiras, drivers para a gestão sustentável de DMDs	Garantir robustez conceitual e aderência institucional às propostas da tese
Questionário 3	7	Especialistas em tecnologias da I4.0	Avaliar o potencial de diferentes tecnologias para apoiar a gestão sustentável de DMDs	Subsidiar a análise multicritério (BWM) para priorização de tecnologias alinhadas ao contexto de gestão sustentável de DMDs
Roteiro de observação	7	Processos hospitalares de aquisição, uso, manutenção e destinação de DMDs	Mapear empiricamente o ciclo de vida dos dispositivos e identificar práticas reais de gestão	Complementar os dados declarados nos questionários com evidências observacionais, fortalecendo a validade do estudo

Fonte: Elaboração própria (2025).

Na sequência, realizou-se o estudo de múltiplos casos em hospitais públicos (Passo 4), contemplando a seleção das instituições e a aplicação de questionários junto aos gestores hospitalares (Passo 5). Essa etapa permitiu compreender a gestão dos DMDs, identificar aqueles considerados mais relevantes para uma gestão sustentável, mapear os mecanismos de gerenciamento dos DMDs e de seus resíduos, bem como levantar as tecnologias utilizadas nesse processo ao longo do ciclo de vida dos equipamentos nos hospitais. Por fim, os dados coletados foram tabulados e analisados (Passo 6).

Com base nesses resultados (Passo 5) e nos resultados da revisão (Passo 8), foram identificadas barreiras e impulsionadores relevantes à implementação da EC em DMDs (Passo 9), seguidas pela validação dessas variáveis junto a especialistas por meio do método DEMATEL (Passo 10), permitindo a análise de relações de influência (Passo 11). Em paralelo, desenvolveu-se o mapeamento detalhado do ciclo de vida de DMDs em hospitais públicos (Passo 14) e a validação, do conjunto de tecnologias da I4.0 com apoio do método BWM (Passo 15).

As etapas subsequentes consistiram no desenvolvimento de estratégias e diretrizes para a gestão sustentável e digital de DMDs (Passo 16) e na formulação de um *framework* integrado (Passo 17), consolidando as evidências conceituais e empíricas obtidas. Esses produtos finais estão organizados de forma a oferecer contribuições científicas, práticas e políticas, incluindo o Plano Diretor para a Gestão Sustentável de DMDs em hospitais públicos.

Os resultados foram sistematizados em quatro artigos científicos, que derivam de diferentes fases do processo investigativo, além do Plano Diretor e do *framework* conceitual. Ressalta-se que o *framework* não foi validado empiricamente, constituindo uma contribuição teórica que poderá orientar futuras pesquisas e aplicações no campo da EC e da I4.0 em saúde.

Os detalhes de cada fase estão descritos nas seções 3.2.1 à 3.2.8 e o Quadro 2 apresenta a matriz de amarração metodológica, ilustrando a organização dos capítulos que compõem os resultados da pesquisa e como cada um contribui para a tese.

Quadro 2 – Matriz de amarração metodológica da tese

Capítulo	Etapa	Título	Método Empregado	Objetivo(s) Específico(s) atendido(s)	Disseminação dos Resultados	Submetido? (Sim/ Não)	Periódico/ Congresso (enviado/a enviar)
3	Fundamentação Teórica e Aplicações Empíricas	Gestão Sustentável de Dispositivos Médicos Duráveis com Tecnologias da Indústria 4.0: Um Ensaio Empírico rumo à Indústria 5.0 no Setor Hospitalar	Revisão integrativa da literatura + questionário exploratório	a) Descrever os processos de gestão do ciclo de vida útil de DMDs em hospitais públicos;	Artigo 1	Não	Ciência e Saúde Coletiva
4	Fundamentação Teórica, Desenvolvimento Conceitual e Aplicações Empíricas	<i>Circular economy in hospitals: drivers, barriers, and key concepts for implementation</i>	Revisão Sistemática da Literatura + análise conceitual + análise multicritério (DEMATEL)	d) Analisar a relevância e a interrelação das barreiras e os fatores motivadores para a adoção da EC em DMDs	Artigo 2	Não	Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade (a enviar)
5	Fundamentação Teórica e Desenvolvimento Conceitual	<i>Digital Innovations in Healthcare: How Industry 4.0 Technologies Enable Circularity in Hospitals</i>	Revisão Sistemática da Literatura + análise conceitual	e) Identificar as tecnologias da I4.0 que podem apoiar o gerenciamento e a implementação da EC em DMDs no contexto brasileiro	Artigo 3	Sim	<i>Journal of Production</i> (em avaliação)
6	Aplicações Empíricas	<i>From Lifecycle Mapping to Digital Transformation: Industry 4.0 Technologies in Durable Medical Device Management In Brazil's Public Hospitals</i>	Estudo de múltiplos casos + questionário exploratório + análise multicritério (BWM)	b) Mapear DMD que possam integrar práticas da EC; c) Analisar os processos de aquisição, uso e descarte de DMDs em hospitais públicos; e) Identificar as tecnologias da I4.0 que podem apoiar uma gestão sustentável de DMDs no contexto brasileiro	Artigo 4	Não	Ciência e Saúde Coletiva (a enviar)
7	Desenvolvimento Conceitual	Proposta de Plano Diretor de Gestão de Dispositivos Médicos Duráveis para o Ministério da Saúde brasileiro	Síntese integrada (resultados conceituais + resultados empíricos)	f) Propor diretrizes estratégicas para a implementação de uma gestão digital e sustentável de dispositivos médicos duráveis, organizadas em eixos de ação e apoiadas por tecnologias da I4.0	Plano Diretor	Não	Ministério da Saúde e Secretaria de Informação e Saúde Digital (SEIDIGI)

8	Desenvolvimento Conceitual	<i>Framework</i> para Gestão Sustentável e Digital de Dispositivos Médicos Duráveis em Hospitais Públicos	Consolidação teórico-empírica (<i>Framework</i> conceitual)	f) Propor diretrizes estratégicas para a implementação de uma gestão digital e sustentável de dispositivos médicos duráveis, organizadas em eixos de ação e apoiadas por tecnologias da I4.0	Proposta de <i>Framework</i>	-	-

Fonte: Elaboração própria (2025).

A seguir, são apresentados de forma sucinta os procedimentos metodológicos adotados em cada artigo do compêndio. Os detalhes dos procedimentos estão presentes em cada capítulo.

2.2.1 Procedimentos metodológicos para a produção do Capítulo 3

O Capítulo 3 corresponde ao artigo 1, intitulado “*Gestão Sustentável de Dispositivos Médicos Duráveis com Tecnologias da Indústria 4.0: Um Ensaio Empírico no Setor Hospitalar*”. Sua metodologia baseou-se em uma revisão integrativa da literatura. Foram utilizadas bases indexadas (*Scopus, Web of Science, PubMed*) e literatura cinzenta (Google Scholar e congressos da área), a partir de critérios de inclusão e exclusão previamente definidos. Em seguida, foram aplicados questionários com gestores hospitalares, em hospitais públicos de média a alta complexidade, buscando conhecer as possíveis lacunas em relação ao gerenciamento sustentável e digital de DMDs.

O tamanho da amostra para o envio dos questionários, tanto neste capítulo quanto nos capítulos 4 e 6, será definido utilizando-se o critério da amostragem probabilística estratificada, adotando um erro de 5%, desta forma, o n obtido é de 400 hospitais. No entanto, a amostra será corrigida considerando o “Cenário dos Hospitais no Brasil” publicado pelo Cadastro Nacional de Estabelecimentos de Saúde (CNES) do Ministério da Saúde, utilizando o quantitativo de 2.625 hospitais públicos em 2024 (CNES, 2024). Sendo assim, os estratos serão as Regiões do Brasil e o tamanho amostral total será de 352 hospitais públicos distribuídos em: 159 (Nordeste); 80 (Sudeste); 44 (Centro-Oeste); 52 (Norte) e 17 (Sul).

2.2.2 Procedimentos metodológicos para a produção do Capítulo 4

O Capítulo 4 apresenta o artigo 2, intitulado “*Circular economy in hospitals: drivers, barriers, and key concepts for implementation*”, foi desenvolvido por meio de uma revisão sistemática de literatura, fundamentada nas recomendações de Moher et al. (2009), complementadas pelo PRISMA (Cochrane, 2024). Foram mapeados estudos que tratam dos fatores que motivam ou dificultam a adoção da EC em hospitais. Posteriormente, realizou-se análise de conteúdo do portfólio bibliográfico, classificando barreiras e fatores motivadores e discutindo sua inter-relação. Em etapa complementar, aplicou-se o método multicritério DEMATEL para analisar as relações de influência entre as variáveis, com validação junto a especialistas.

2.2.3 Procedimentos metodológicos para a produção do Capítulo 5

O Capítulo 5 apresenta o artigo 3, intitulado “*Digital Innovations in Healthcare: How Industry 4.0 Technologies Enable Circularity in Hospitals*”, utilizou como abordagem uma revisão sistemática de literatura, também orientada pelo protocolo PRISMA. Nessa etapa foram identificadas as tecnologias da I4.0 com maior potencial para apoiar a gestão circular em hospitais. Após a identificação, procedeu-se à análise crítica quanto à aplicabilidade e viabilidade dessas tecnologias no contexto brasileiro.

2.2.4 Procedimentos metodológicos para a produção do Capítulo 6

O Capítulo 6, corresponde ao artigo 4, intitulado “*From Lifecycle Mapping to Digital Transformation: Industry 4.0 Technologies in Durable Medical Device Management In Brazil’s Public Hospitals*”. Essa etapa contou com um estudo de casos múltiplos em hospitais públicos, envolvendo: (a) seleção das instituições; (b) mapeamento dos dispositivos médicos e de seus processos de aquisição, uso e descarte; (c) aplicação de questionários estruturados com gestores hospitalares; e (d) análise dos dados obtidos. Os resultados foram triangulados com as revisões anteriores. Em seguida, utilizou-se do método multicritério (BWM) para identificar os critérios mais relevantes para selecionar tecnologias I4.0 em uma gestão circular, assim como foram identificadas as tecnologias mais promissoras segundo os especialistas.

2.2.5 Procedimentos metodológicos para a produção do Capítulo 7

O Capítulo 7, apresenta a “*Proposta de Plano Diretor de Gestão de Dispositivos Médicos Duráveis para o Ministério da Saúde brasileiro*”. O plano foi elaborado por meio de uma síntese integrada, reunindo evidências empíricas e conceituais das fases anteriores. Foram estruturados eixos de ação, metas, estratégias e indicadores, compondo um guia estratégico de gestão sustentável e digital de DMDs no âmbito hospitalar.

2.2.6 Procedimentos metodológicos para a produção do Capítulo 8

O Capítulo 8, traz a “*Proposta de Framework Integrado para a Implementação da Economia Circular com Apoio da Indústria 4.0*”. Essa síntese final foi construída a partir da

consolidação dos achados dos capítulos anteriores e do Plano Diretor, resultando em um modelo conceitual robusto que articula os pilares de sustentabilidade, digitalização e eficiência para a gestão de DMDs. O framework é apresentado como contribuição teórica e prática, embora não validado empiricamente nesta pesquisa.

2.3 ASPECTOS ÉTICOS

Esta pesquisa cumpre integralmente os requisitos éticos estabelecidos pelas Resoluções do Conselho Nacional de Saúde e pela legislação brasileira vigente, incluindo a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD). O projeto foi submetido ao Comitê de Ética em Pesquisa (CEP) e aprovado sob o protocolo CAAE 86351325.8.0000.0121, garantindo que todas as etapas da investigação respeitem os princípios de autonomia, beneficência, não maleficência e justiça.

Ressalta-se que a participação dos respondentes ocorreu de forma voluntária, mediante aceite do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), assegurando anonimato, confidencialidade e uso exclusivo dos dados para fins acadêmicos e científicos. Dessa forma, a pesquisa atende plenamente às exigências éticas e reforça seu compromisso social com a melhoria da gestão hospitalar e com a sustentabilidade no SUS.

COMPÊNDIO DE ARTIGOS

3 ARTIGO 1 - GESTÃO SUSTENTÁVEL DE DISPOSITIVOS MÉDICOS DURÁVEIS COM TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0: UM ENSAIO EMPÍRICO NO SETOR HOSPITALAR

Artigo aguardando submissão

Eliana de Jesus Lopes, Marina Bouzon

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

Resumo

A crescente pressão por sustentabilidade na gestão pública hospitalar tem intensificado a busca por soluções inovadoras que promovam eficiência, rastreabilidade e redução de impactos ambientais. Nesse contexto, os Dispositivos Médicos Duráveis (DMDs) assumem papel estratégico, pois representam ativos de alto valor agregado, longa vida útil potencial e forte impacto nos custos operacionais e na geração de resíduos hospitalares. Diante desse cenário, este estudo teve por objetivo analisar a produção científica nacional e internacional dos últimos dez anos sobre a articulação entre Economia Circular (EC) e Indústria 4.0 (I4.0) no setor de saúde e, em seguida, confrontar esses achados com evidências empíricas obtidas por meio da percepção e experiência de gestores hospitalares diretamente envolvidos na gestão de DMDs, com foco em lacunas de gestão do ciclo de vida, práticas circulares e uso de tecnologias digitais. Realizou-se uma revisão integrativa com critérios sistemáticos de busca, seleção e análise em bases nacionais e internacionais, complementada por um estudo de campo de caráter exploratório. Os resultados indicaram que embora a integração EC-I4.0 esteja avançada em setores industriais, sua aplicação hospitalar permanece incipiente e raramente orientada à gestão de DMDs. As evidências empíricas convergem ao apontar fragmentação do gerenciamento ao longo do ciclo de vida, baixa rastreabilidade e limitada integração tecnológica. Entre as barreiras destacam-se lacunas normativas, restrições orçamentárias, governança de dados e capacitação; entre os impulsionadores, racionalização de custos, disponibilidade de ativos, segurança do paciente, conformidade e metas de sustentabilidade. A originalidade do estudo reside na combinação entre a análise teórica e evidências empíricas reais, apontando caminhos para a formulação de diretrizes públicas e estratégias de gestão sustentáveis. Conclui-se, portanto, que, embora incipiente, a adoção de práticas circulares apoiadas pela digitalização é viável e necessária, sendo os DMDs uma porta de entrada estratégica para a construção de uma gestão hospitalar orientada por sustentabilidade, inovação tecnológica e responsabilidade social, além de delinear caminhos para diretrizes, frameworks e estratégias que fortaleçam a transformação digital na gestão em saúde.

Palavras-Chave: Dispositivos médicos duráveis; Economia circular; Indústria 4.0; Gestão hospitalar; Transformação digital.

1 Introdução

Viver no século XXI é testemunhar o colapso de um modelo civilizatório que, por

décadas, operou sob a lógica da extração ilimitada, do consumo desmedido e do descarte como regra. Emergências climáticas, pandemias, crises humanitárias e desigualdades extremas já não podem ser vistas como desvios de percurso, mas como sintomas crônicos de uma arquitetura socioeconômica que esgotou suas bases ecológicas e éticas (Manganda; Sehnem; Lara, 2024; Sehnem et al., 2025).

O Brasil, como uma das maiores economias emergentes e guardião de uma biodiversidade estratégica, tem intensificado sua presença no debate climático e ambiental (Viola; Gonçalves, 2019). O país é signatário de compromissos internacionais, como o Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, sendo protagonista na realização da COP 30 em Belém do Pará, além do anúncio de que sediará a próxima cerimônia do Earthshot Prize (Dantas et al., 2021a; Sakharov, 2024). Esses eventos ampliam a visibilidade global do país em temas ambientais, mas não se sustentam sem mudanças estruturais, especialmente em setores de alta sensibilidade socioambiental como o da saúde.

A sustentabilidade, portanto, já não pode ocupar o lugar de apêndice ou mera retórica institucional, pois constitui uma condição estruturante para qualquer estratégia de desenvolvimento (Lopes; Colombo; Da Silva, 2024). No setor da saúde, por exemplo, essa transição ainda não se concretizou plenamente, apesar da crescente pressão internacional por modelos mais sustentáveis e resilientes (Global Green And Healthy Hospitals, 2024).

Paradoxalmente, os hospitais, ao mesmo tempo em que são instituições voltadas à preservação da vida, figuram entre os maiores emissores institucionais de carbono e geradores de resíduos perigosos, os quais são frequentemente manejados com baixo grau de circularidade e com limitada integração entre as áreas técnicas e gerenciais (Elmassah, 2023; Jabbour et al., 2020; Teixeira; Teixeira, 2022; Zardo et al., 2025). Essa dissociação entre missão institucional e práticas operacionais não apenas revela fragilidades sistêmicas, mas também escancara a urgência de repensar a governança hospitalar sob uma perspectiva mais integrada, sustentável e digitalmente qualificada. Nesse contexto, as tecnologias emergentes associadas à Indústria 4.0 (I4.0) despontam como aliadas estratégicas para remodelar padrões operacionais, apoiar a rastreabilidade de recursos e promover práticas da Economia Circular (EC) em cadeias cada vez mais complexas (Aggarwal; Manaswi, 2022; Bai; Orzes; Sarkis, 2022; Kim et al., 2022).

Em setores como a manufatura (Santos et al., 2025; Satyro et al., 2022; Sehnem et al., 2025), o agronegócio (Aggarwal; Manaswi, 2022; Despoudi et al., 2025; Perçin; Bayraktar; Kumar, 2025) e a construção civil (Lara; El Fadel; Khalfan, 2025; Meng; Das; Meng, 2023; Thirumal et al., 2024), a integração EC-I4.0 tem produzido avanços significativos. No entanto,

quando se trata do setor hospitalar, sobretudo no Brasil, a adoção de tais tecnologias ainda é incipiente, fragmentada e pouco articulada a uma agenda de sustentabilidade institucional (Daú et al., 2019; Liu; Song; Liu, 2023).

A partir desse cenário, impõe-se uma indagação crucial: haveria, de fato, caminhos concretos para a construção de uma gestão hospitalar orientada aos princípios da I4.0 no setor público brasileiro integrado a práticas da EC? Tal questionamento se torna ainda mais pertinente à medida que a literatura internacional passa a discutir a Indústria 5.0 (I5.0) como um estágio pós-digital, marcado pela hiperpersonalização, pela simbiose entre humanos e máquinas, e por uma retomada da centralidade do fator humano nas decisões tecnológicas e organizacionais (Garrido; Muniz; Batista Ribeiro, 2024; Grabowska; Saniuk; Gajdzik, 2022; Kości, 2025).

Contudo, esse debate ainda parece distante da realidade hospitalar brasileira, onde sequer se consolidaram as bases estruturantes da I4.0 aplicadas à sustentabilidade (Daú et al., 2019a). Saltar diretamente à lógica 5.0, sem antes construir os pilares digitais e circulares da etapa anterior, significa incorrer no risco de promover inovações descoladas da realidade institucional, técnica e orçamentária que caracteriza o setor público de saúde (Kości, 2025). A lacuna entre o discurso e a prática revela-se ainda mais evidente diante da escassez de propostas estruturadas que operacionalizem essa transição de forma adaptada às especificidades do ambiente hospitalar público.

Diante dessa conjuntura, torna-se imperativo questionar: a produção científica nacional tem oferecido bases teóricas, metodológicas e estratégicas suficientemente robustas para sustentar a integração entre EC e I4.0 no setor de saúde? Como essa articulação tem sido abordada nos estudos existentes? E em que medida essas proposições dialogam com os desafios concretos, as percepções dos gestores e as oportunidades latentes nos hospitais públicos brasileiros?

Com base nessas provocações, este artigo tem como objetivo analisar a produção científica nacional e internacional dos últimos dez anos sobre a integração entre EC e I4.0 no setor de saúde e, em seguida, confrontar esses achados com evidências empíricas obtidas a partir da percepção de gestores hospitalares diretamente envolvidos na gestão de Dispositivos Médicos Duráveis (DMDs). A intenção é identificar avanços, entraves e caminhos possíveis para a consolidação de estratégias de gestão hospitalar sustentáveis, inovadoras e digitalmente orientadas.

2 Referencial Teórico

A transição para modelos de desenvolvimento mais sustentáveis tem mobilizado diferentes setores na tentativa de enfrentar os limites ecológicos e sociais do atual paradigma de produção e consumo (Mamudu et al., 2024; Oliveira Neto et al., 2025; Zardo et al., 2025). A sustentabilidade, nesse cenário, consolida-se como uma diretriz estruturante para organizações públicas e privadas, ultrapassando a abordagem compensatória tradicional e buscando redesenhar processos com base em princípios regenerativos, circulares e colaborativos (Dachry et al., 2024). Nesse contexto, o conceito de Economia Circular emerge como resposta crítica aos modelos lineares, propondo a reinserção de materiais nos ciclos produtivos, o prolongamento da vida útil de produtos e o redesenho sistêmico das cadeias de suprimento (Korhonen; Honkasalo; Seppälä, 2018; Leissner; Ryan-Fogarty, 2019).

Embora as ideias de circularidade possam ser associadas a práticas milenares de reaproveitamento e simbiose entre sistemas, a formulação moderna da EC ganha destaque com Pearce e Turner (1990), sendo popularizada pela Ellen MacArthur Foundation (EMF, 2024), que enfatizam sua natureza multidimensional e sua aplicabilidade em diferentes níveis da atividade econômica. No entanto, sua incorporação nos sistemas organizacionais tem encontrado barreiras de natureza técnica, cultural e institucional, sobretudo em setores altamente regulados ou sensíveis do ponto de vista sanitário, como o hospitalar (Govindan; Hasanagic, 2018; Jabbour et al., 2020; Zardo et al., 2025).

Paralelamente, o avanço da digitalização e da automação impulsionado pela chamada I4.0 tem promovido uma reconfiguração das capacidades produtivas. Com base em tecnologias como Internet das Coisas (IoT), sistemas ciberfísicos (CPS), Big Data, inteligência artificial, manufatura aditiva e blockchain, a I4.0 inaugura um novo paradigma industrial voltado à integração inteligente de processos e ao uso intensivo de dados em tempo real (Hassan et al., 2024; Kumar; Mangla; Kumar, 2024; Oliveira Neto et al., 2025). Seu potencial para fomentar a circularidade tem sido amplamente discutido, principalmente por sua capacidade de rastrear fluxos de materiais, otimizar recursos e antecipar falhas (Atif, 2023; Oláh et al., 2020).

A convergência entre EC e I4.0 tem sido objeto de crescente atenção na literatura internacional, com destaque para estudos que propõem frameworks conceituais (Aggarwal; Manaswi, 2022; Chauhan; Sharma; Singh, 2019; Dolci et al., 2024), modelagens de integração tecnológica e estudos de caso em setores como manufatura (Alsaoudi; Acquaye; Khalfan, 2024; Cezarino et al., 2019; Despoudi et al., 2025; Duarte et al., 2024), cadeia agroalimentar (Perçin; Bayraktar; Kumar, 2025; Varella et al., 2024), energia (Simioni et al., 2024), construção civil

(Guilhem; Klein, 2024; Lara; El Fadel; Khalfan, 2025) e indústria automotiva (Vido et al., 2024; Zhao et al., 2025). No entanto, no campo da saúde, essa sinergia ainda é pouco explorada, tanto na literatura nacional quanto global, apesar do reconhecido impacto ambiental do setor hospitalar (Daú et al., 2019; Jabbour et al., 2022; Liu; Song; Liu, 2023).

O estudo de Daú et al. (2019) é pioneiro no Brasil ao abordar ambos os temas, EC e tecnologias I4.0, no qual realiza o reprocessamento de dispositivos médicos termossensíveis e de uso único, descrevendo as etapas envolvidas no ciclo de reprocessamento, os controles de biossegurança e os ganhos econômicos obtidos. O foco do estudo está centrado na viabilidade técnica e econômica da prática, apontando a importância de normas de rastreabilidade, validação e controle, mas sem avançar sobre um modelo de gestão sistêmica baseado em circularidade ou tecnologias digitais avançadas.

Já no contexto internacional, o estudo de Liu, Song e Liu (2023) adota uma abordagem mais voltada à aplicação tecnológica, ao propor uma cadeia de suprimentos hospitalar sustentável baseada em blockchain, com integração de sensores IoT, modelos preditivos e arquitetura orientada à rastreabilidade de medicamentos e dispositivos médicos. Apesar de inovador no uso de tecnologias da I4.0 para sustentabilidade hospitalar, o estudo ainda mantém foco operacional e logístico, sem propor reconfigurações institucionais ou de governança baseadas em princípios da EC e sem dialogar com os pressupostos da gestão hospitalar como sistema complexo.

Embora ambos os estudos representem contribuições relevantes, nenhum deles aborda a proposta de uma Indústria 5.0 (I5.0) hospitalar, conceito que começa a ganhar espaço na literatura recente a partir das discussões sobre os limites da I4.0 e da necessidade de reintegrar o elemento humano, social e ambiental às decisões organizacionais (Garrido; Muniz; Ribeiro, 2024; Košti, 2025).

A I5.0 propõe uma superação do modelo anterior por meio de uma colaboração harmônica entre pessoas e máquinas, promovendo soluções resilientes, sustentáveis e centradas no bem-estar social (Kannan et al., 2024). No entanto, percebe-se que sua aplicação em ambientes hospitalares ainda é embrionária, com ênfase quase exclusiva na personalização do cuidado e na experiência do paciente, como aponta Košti (2025). A I5.0, no contexto hospitalar permite uma abordagem mais holística e organizacional, que compreende os hospitais como ecossistemas sociotécnicos, cujas decisões devem articular sustentabilidade, inovação e ética institucional (Chrusciak et al., 2025). Nesse sentido, a gestão hospitalar deixa de ser vista apenas como função administrativa para se tornar espaço estratégico de transformação.

A literatura nacional ainda carece de estudos que explorem essa abordagem aplicada à

gestão de DMDs, que se destacam como uma via promissora para inserir os hospitais na lógica da circularidade, por apresentarem alto valor agregado, potencial de rastreamento e capacidade de reuso e remanufatura com ganhos econômicos e ambientais (Dixit; Dutta, 2024; Espinosa et al., 2021; Saha; Rathore, 2024).

Vale destacar que o setor hospitalar apresenta complexidades adicionais quando comparado a outros setores industriais, sobretudo no que tange à gestão de resíduos (Macneill et al., 2020; Moreira; Günther, 2013). Boa parte dos resíduos gerados é classificada como perigosa, exigindo tratamento específico, infraestrutura adequada e controle rigoroso de biossegurança (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024a, 2024b; Brasil, 2010, 2022).

Esse cenário limita a aplicação direta de modelos circulares convencionais, exigindo soluções adaptadas à realidade sanitária e normativa do setor. O desafio, portanto, consiste em identificar fluxos e componentes passíveis de circularidade segura, sendo os DMDs uma alternativa estratégica para viabilizar esse movimento, por apresentarem menor risco biológico e maior ciclo de vida (Espinosa et al., 2021).

Desse modo, ao integrar pelo menos os princípios da EC com as tecnologias da I4.0, abre-se espaço para uma reconfiguração da governança hospitalar, voltada à sustentabilidade sistêmica. Essa perspectiva exige, entretanto, o desenvolvimento de diretrizes específicas, que contemplem os aspectos normativos, tecnológicos, operacionais e humanos envolvidos na gestão dos DMDs, contribuindo para um modelo organizacional mais eficiente, resiliente e alinhado aos compromissos globais de desenvolvimento sustentável.

3 Metodologia

A revisão sistemática conduzida neste estudo seguiu o protocolo *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) (Moher et al., 2009), com o objetivo de identificar, organizar e analisar publicações que abordam, de forma integrada, os temas Economia Circular e Indústria 4.0, conforme recomendação de (Govindan; Hasanagic, 2018).

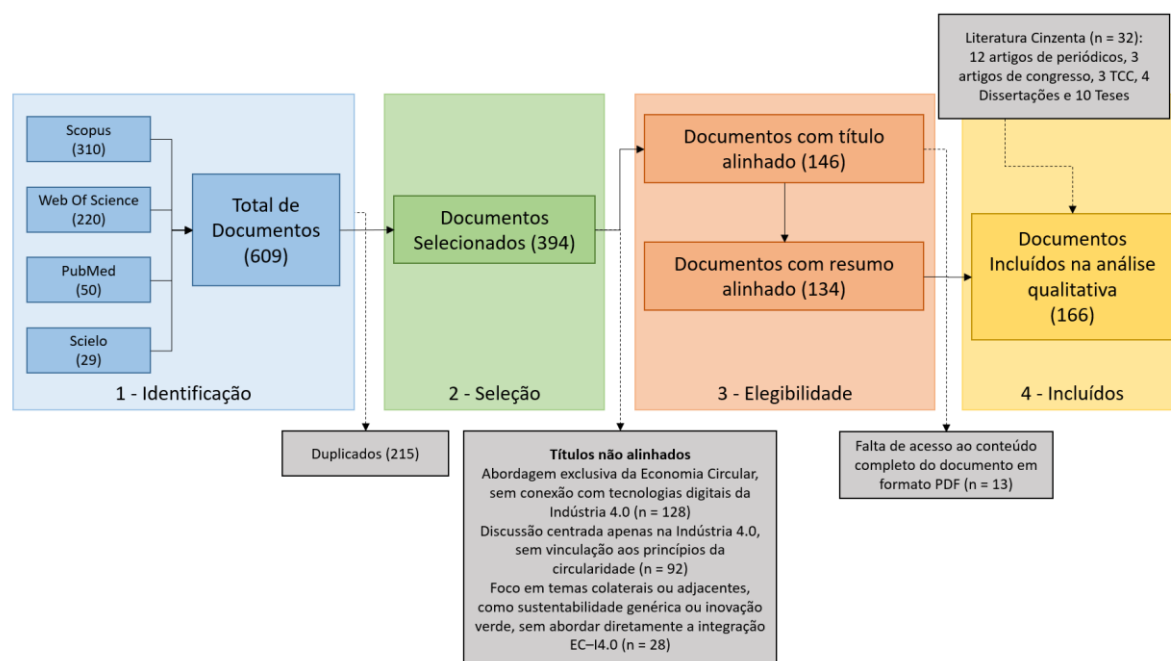
Foram selecionadas quatro bases de dados com reconhecimento internacional por sua abrangência e relevância científica: Scopus, Web of Science, PubMed e SciELO. A busca foi realizada entre maio e julho de 2025, utilizando combinações de termos relacionados à Economia Circular (*circular economy, circular model, circularity, circular supply chain*) e à Indústria 4.0 (*industry 4.0, digital technologies, cyber-physical systems, smart manufacturing, advanced manufacturing, digital transformation*). O filtro temporal abrangeu o período de 2016

a 2025, contemplando documentos em inglês, português e espanhol, com acesso integral ao conteúdo em formato PDF.

Foram considerados elegíveis artigos publicados em periódicos científicos, artigos completos de eventos acadêmicos, capítulos de livros, livros, monografias, dissertações e teses. A seleção dos documentos ocorreu em etapas sequenciais: (i) identificação dos registros nas bases de dados; (ii) triagem inicial por leitura de títulos e resumos; (iii) aplicação dos critérios de elegibilidade; (iv) leitura integral dos textos selecionados; (v) extração de informações relevantes; e (vi) sistematização dos dados para análise temática e categorial.

Complementarmente, realizou-se uma busca em literatura cinzenta, por meio dos anais dos principais congressos nacionais das áreas de Engenharia de Produção e Administração (ENEGEP, SIMPEP, EnANPAD e ADMpg), além da Base de Teses e Dissertações Brasileiras (BDTD) e da plataforma Google Acadêmico. O processo de seleção está detalhado na Figura 1.

Figura 4 – Processo de seleção do portfólio com base no PRISMA



Fonte: Elaboração própria (2025).

Os critérios de inclusão envolveram publicações que abordssem simultaneamente os dois temas centrais do estudo, com foco em aplicações organizacionais, produtivas ou gerenciais. Foram excluídos documentos que tratassem apenas de um dos dois temas, textos com acesso restrito ou ausentes, e publicações de natureza opinativa, como editoriais ou

resenhas. A triagem foi realizada manualmente, com o apoio do *software Mendeley* para organização das referências, enquanto o processo de extração, classificação e análise dos dados foi executado com o auxílio de planilhas eletrônicas e do ambiente estatístico *RStudio*.

Para complementar a análise teórica desenvolvida a partir da revisão de literatura, foi conduzido um estudo empírico com o objetivo de explorar a realidade da gestão de DMDs em hospitais públicos brasileiros, a partir da perspectiva de profissionais diretamente envolvidos com o tema, seguindo as recomendações de (Souza et al., 2025). Para isso, foi elaborado um questionário semiestruturado, com perguntas abertas e fechadas, encaminhado por meio eletrônico a participantes previamente selecionados por sua experiência na área (Link do questionário: <https://forms.gle/dmbdXVsF472rPr1K7>).

Os critérios de seleção contemplaram profissionais com atuação comprovada em áreas como Engenharia Clínica, Direção Hospitalar, Gestão de Patrimônio e Manutenção Hospitalar, além de pesquisadores acadêmicos com foco em EC e gestão hospitalar sustentável. O instrumento foi estruturado para capturar três dimensões centrais: (i) identificar os DMDs utilizados nas instituições e aqueles considerados mais importantes para uma gestão sustentável; (ii) compreender o atual cenário de gestão, descarte e práticas de sustentabilidade desses dispositivos nas unidades públicas de saúde; e (iii) mapear o estágio de digitalização e o uso de tecnologias da I4.0 aplicadas à gestão desses equipamentos.

Ao todo, 15 profissionais participaram da pesquisa, a maioria com atuação direta na gestão de DMDs e ampla experiência no setor público hospitalar, conforme detalhado no Quadro 1.

Quadro 3 – Caracterização dos participantes da pesquisa

Área de Atuação:	Tempo de Experiência na Área:	Qual o curso de Formação?	Nível de Escolaridade
Diretor(a) hospitalar	3 anos a 5 anos	Enfermagem	Pós-Graduação
	5 a 10 anos	Gestão Hospitalar	Graduação
	Mais de 10 anos	Enfermagem	Pós-Graduação
	Mais de 10 anos	Medicina	Pós-Graduação
	Mais de 10 anos	Enfermagem Gineco-obstétrica	Pós-Graduação
Engenheiro Clínico	Menos de 1 ano	Ciências e Tecnologia com ênfase em Engenharia Biomédica	Graduação
	1 ano a 3 anos	Engenharia Biomédica	Pós-Graduação

	5 a 10 anos	Engenharia Biomédica	Pós-Graduação
	5 a 10 anos	Engenharia Clínica	Pós-Graduação
	5 a 10 anos	Engenharia Biomédica	Pós-Graduação
Gestor(a) hospitalar (Manutenção)	Mais de 10 anos	Mestrado em Engenharia de Produção	Pós-Graduação
Patrimônio	3 anos a 5 anos	Gestão Hospitalar	Graduação
Pesquisador(a) em Engenharia produção	1 ano a 3 anos	Mestrado em Engenharia de Produção	Pós-Graduação
Pesquisador(a) ou acadêmico(a) em EC/ sustentabilidade hospitalar	5 a 10 anos	Engenharia de Produção	Pós-Graduação
Profissional da saúde	Mais de 10 anos	Enfermagem dermatológica	Pós-Graduação

Fonte: Dados da Pesquisa (2025).

A amostra reuniu profissionais de diferentes áreas e formações, enriquecendo a análise com múltiplas perspectivas sobre a gestão sustentável de DMDs. Mais da metade possui mais de cinco anos de experiência e todos têm formação superior, com predominância de pós-graduação. A variedade de cursos, como Enfermagem, Medicina, Engenharia Biomédica e Engenharia de Produção, favoreceu uma abordagem multidisciplinar do tema.

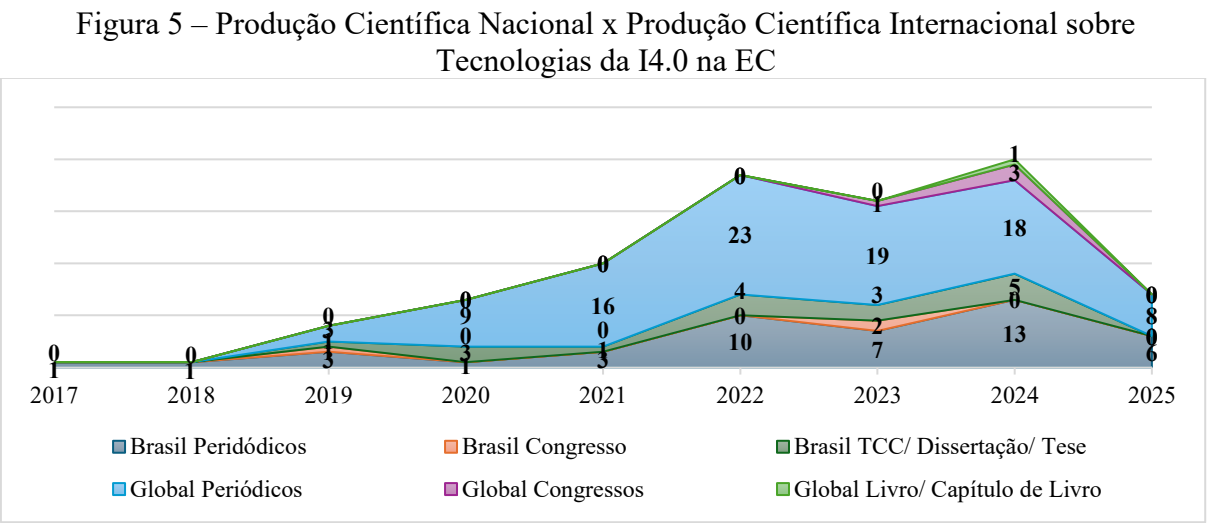
4 Resultados e Discussões

4.1 Mapeamento da produção científica em EC e I4.0: um olhar para a gestão hospitalar

A análise do portfólio bibliográfico permitiu mapear o avanço da produção científica sobre a integração entre EC e I4.0 nos últimos anos. O portfólio final reuniu 166 documentos, organizados em dois núcleos para comparar a produção nacional e internacional, a partir da afiliação institucional dos autores. Desse total, 101 compõem o núcleo global e 65 o núcleo nacional.

O Figura 5 mostra a distribuição temporal das publicações entre 2017 e 2025, com crescimento acentuado a partir de 2020 e pico em 2022. A tendência acompanha a ampliação do interesse por sustentabilidade e digitalização nas agendas de pesquisa, impulsionada pela pandemia da COVID-19. O aumento expressivo de artigos internacionais a partir de 2021 sugere que o debate sobre a sinergia entre EC e I4.0 já estava consolidado em países com

políticas industriais e tecnológicas mais estruturadas.



Fonte: Dados da Pesquisa (2025).

A Figura 5 evidencia um crescimento consistente da produção científica sobre EC e I4.0 a partir de 2019, com pico global em 2022 e destaque para a ascensão brasileira em 2023 e 2024. Embora a produção nacional permaneça numericamente inferior, observa-se aumento gradual, sobretudo em eventos científicos e trabalhos de pós-graduação, enquanto a produção global é amplamente concentrada em artigos de periódicos indexados, refletindo maior maturidade e difusão internacional.

A diversidade de formatos no núcleo brasileiro contrasta com a homogeneidade do núcleo global, revelando diferenças no estágio de consolidação do debate e indicando barreiras estruturais à internacionalização e à visibilidade científica nacional. Globalmente, o avanço das pesquisas ilustra um movimento robusto de transformação dos sistemas produtivos rumo à sustentabilidade digital, impulsionado por tecnologias avançadas e modelos circulares. Apesar disso, o foco majoritário das investigações ainda recai sobre setores industriais tradicionais, como manufatura, agronegócio, construção civil e alimentos e bebidas, conforme apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 – Principais segmentos investigados em pesquisas sobre EC e I4.0 no contexto Nacional e Internacional			
Segmento Industrial	Abordagem Setorial e Temática	Fonte	Contexto
Agronegócio / Agricultura	Análise de cadeias agroalimentares diversas, incluindo PMEs de frutas e vegetais e cadeias como a do óleo de palma. Os estudos abordam fatores facilitadores e barreiras à adoção da EC	(Abdul-Hamid et al., 2020, 2021, 2022; Aggarwal; Manaswi, 2022; Despoudi et al., 2025; Krstić et al., 2022;	Global

	e das tecnologias da I4.0, especialmente em contextos marcados por escassez de recursos naturais e altos níveis de desperdício.	Kumar; Mangla; Kumar, 2024; Perçin; Bayraktar; Kumar, 2025; Zhao et al., 2025)	
Agronegócio / Agricultura	Estudos voltados à integração de práticas circulares com tecnologias da I4.0 no setor agroindustrial brasileiro, com ênfase em segurança alimentar, reaproveitamento de resíduos e sustentabilidade. Incluem aplicações em foodtechs, AgTechs e cadeias produtivas de frutas e vegetais.	(Arns, 2024; Dalto, 2024; Manganda et al., 2024; Silva; Sehnem, 2022, 2024b, 2024a, 2024c, 2025; Souza, 2023; Varella et al., 2024; Varella, 2022)	Brasil
Alimentos e Bebidas	Aplicações de estratégias de EC em cadeias globais de alimentos e bebidas, com foco em modelos de negócio sustentáveis, reconfiguração das cadeias de suprimento e integração com tecnologias I4.0.	(Ada et al., 2021; Farrukh Shahzad; Liu; Zahid, 2025)	Global
Alimentos e Bebidas	Implementação da EC em processos industriais alimentícios, com ênfase nos segmentos de cerveja artesanal e carnes (suína e avícola), utilizando tecnologias I4.0 para rastreabilidade, controle de resíduos e eficiência produtiva.	(Gruba et al., 2022; Pereira; Motta, 2020; Soares et al., 2024; Zardo et al., 2025)	Brasil
Atacado Distribuidor	Desenvolvimento de modelos circulares aplicados à cadeia de suprimentos digitalizada	(Stocco, 2020)	Brasil
Automotiva / Autopeças	Aplicação da EC para reutilização de componentes, manutenção preditiva e manufatura digital	(Barderi, 2024; Vido et al., 2024)	Brasil
Automotiva / Autopeças	Investigação das práticas de sustentabilidade e adoção da I4.0 no setor automotivo, com ênfase em manufatura de componentes, montagem veicular e digitalização da cadeia de suprimentos.	(Akkad; Šebo; Bányai, 2022; Al-Swidi; Hair; Al-Hakimi, 2023; Kannan et al., 2024; Kumar; Singh; Kumar, 2021; Rizvi; Agrawal; Murtaza, 2023; Yadav et al., 2020a; Yu; Khan; Umar, 2022)	Global
Calçadista	Estudos sobre digitalização, rastreabilidade e retorno logístico de produtos	(Vido et al., 2024)	Brasil
Construção	Exploração das práticas sustentáveis e inovação na construção civil, incluindo materiais sustentáveis, BIM, e modelos colaborativos com foco em EC e gestão de resíduos.	(Barquete et al., 2022; Jemal et al., 2023; Lara; El Fadel; Khalfan, 2025; Meng; Das; Meng, 2023; Thirumal et al., 2024)	Global
Eletroeletrônica / Máquinas/ Equipamentos	Transição para EC com tecnologias I4.0; foco em eficiência e inovação tecnológica	(Nobre; Tavares, 2017; Pinheiro, 2020; Pinheiro et al., 2022; Soares et al., 2024; Vido et al., 2024)	Brasil
Eletroeletrônica / Máquinas/ Equipamentos	Aplicações da desmontagem autônoma, rastreamento digital e fábricas automatizadas na indústria eletrônica, com ênfase em sustentabilidade social e integração de tecnologias I4.0.	(Bai; Orzes; Sarkis, 2022; Sahoo; Jakhar, 2024)	Global
Manufatura Multissetorial	Visão ampla da manufatura com foco em tecnologias I4.0 (IoT, IA, CPS) e novos modelos circulares	(Castello Branco, 2023; De Oliveira Neto; Da Conceição Silva; Filho, 2023; Dwivedi et al., 2022; Guilhem; Klein, 2024; Jesus, 2024; Jugend et al., 2024; Santos, 2021; Santos et al., 2025; Satyro et al., 2022; Sehnem et al.,	Brasil

		2025; Silva et al., 2022; Silva, 2022; Yamashita, 2023)	
Manufatura Multissetorial	Análises intersetoriais com foco em modelos sustentáveis de produção, integração digital, logística verde e desempenho organizacional, abordando múltiplos setores de manufatura de forma comparativa.	(Chhabra; Singh, 2024; Di Maria; De Marchi; Galeazzo, 2022; Elmassah, 2023; Khan; Ahmad; Majava, 2021; Khan et al., 2021a; Liu et al., 2022; Mamudu et al., 2024; Neri et al., 2023; Palsodkar; Kolttharkar, 2024; Piyathanavong et al., 2024; Taddei et al., 2022; Viles et al., 2022)	Global
Petróleo e Gás	Iniciativas para adoção de EC com Lean, BIM e digitalização para gestão sustentável de ativos	(Nascimento, 2019)	Brasil
Plásticos	Soluções para reciclagem avançada e EC com tecnologias I4.0	(Nara et al., 2021)	Brasil
Química	Adoção de práticas circulares para reuso de materiais químicos, com suporte de tecnologias I4.0	(Genaro, 2022)	Brasil
Recursos Metálicos/Mineração	Revalorização de resíduos, reaproveitamento de materiais e mineração circular com tecnologias I4.0	(Jabbour et al., 2020; Jesus, 2024; Lanzilotti, 2022)	Brasil
Recursos Metálicos/Mineração	Estudos sobre a transição da economia linear para circular no setor de extração e transformação de metais, com foco em redução de impactos ambientais e inovação tecnológica.	(Bag; Pretorius, 2022; Junaid et al., 2024; Romero et al., 2021)	Global
Setor de Saúde	Aplicações da EC em dispositivos médicos, gestão de resíduos e tecnologias para sustentabilidade hospitalar	(Daú et al., 2019)	Brasil
Setor de Saúde	Aplicação de tecnologias I4.0 na cadeia de suprimentos de saúde, com ênfase em práticas circulares, rastreabilidade e sustentabilidade hospitalar.	(Liu; Song; Liu, 2023)	Global
Setor Florestal, Papel e Celulose	Sustentabilidade na cadeia florestal e manufatura com ênfase em digitalização e circularidade	(Sell et al., 2023; Souza, 2023)	Brasil
Têxtil e de Vestuário	Aplicação de EC para moda sustentável, rastreabilidade e reuso de materiais com suporte de I4.0	(Oliveira Neto et al., 2023, 2025; Seri, 2023)	Brasil
Têxtil e de Vestuário	Avaliação da integração de práticas circulares e tecnologias I4.0 em pequenas e médias empresas têxteis, incluindo aspectos de produção sustentável, rastreabilidade e impacto social.	(Ali et al., 2024; Alves et al., 2022; Karmaker et al., 2023; Khurshid et al., 2024)	Global

Fonte: Dados da Pesquisa (2025).

O Quadro 4 organiza os segmentos industriais e de serviços investigados nas pesquisas sobre EC e I4.0, evidenciando o escopo temático e a origem das publicações. A análise revela padrões claros: a produção científica, nacional e internacional, concentra-se em setores da indústria de transformação, como agronegócio, manufatura multissetorial, eletroeletrônica, automotivo e têxtil. No agronegócio, estudos internacionais (Aggarwal; Manaswi, 2022;

Despoudi et al., 2025; Krstić et al., 2022; Kumar; Mangla; Kumar, 2024) enfatizam a digitalização de cadeias agroalimentares como resposta à escassez de recursos e ao desperdício, enquanto pesquisas brasileiras (Manganda; Sehnem; Lara, 2024; Silva; Sehnem, 2024a, 2024b, 2024c, 2025; Varella et al., 2024) exploram rastreabilidade, sensores inteligentes e reaproveitamento de resíduos, com aplicações em Pequenas e Médias Empresas (PMEs), foodtechs e cooperativas.

Na manufatura multissetorial, o núcleo global avança em frameworks integrados e métricas de desempenho sustentável (Elmassah, 2023; Liu et al., 2022; Taddei et al., 2022), enquanto a produção brasileira foca na adoção de tecnologias como IoT e sistemas ciberfísicos, visando eficiência energética e redução de resíduos (De Oliveira Neto; Da Conceição Silva; Filho, 2023; Santos et al., 2025). Setores como construção, mineração, petróleo e gás, química e plásticos também figuram na literatura, mas com perfis distintos: internacionalmente, há maior formalização teórica e aplicação de metodologias robustas (Bai; Orzes; Sarkis, 2022; Karmaker et al., 2023; Piyathanavong et al., 2024), enquanto no Brasil predominam estudos exploratórios e descritivos, com menor densidade metodológica.

O setor de saúde é o mais subexplorado, com apenas dois estudos identificados. No Brasil, Daú et al. (2019) investigam o reprocessamento de dispositivos médicos, com foco em viabilidade operacional e econômica. No contexto global, Liu, Song e Liu (2023) propõem o uso de *blockchain* para rastreabilidade da cadeia hospitalar, priorizando transparência, mas sem avançar para modelos completos de gestão sustentável. Essa lacuna é preocupante frente ao volume de resíduos hospitalares perigosos e às restrições regulatórias, reforçando o paradoxo entre alto potencial de impacto ambiental e baixa integração às agendas digitais e circulares.

A literatura analisada, ao apontar a urgência da transição para modelos sustentáveis, como em Romero et al. (2021) e Mamudu et al. (2024), reforça o paradoxo existente entre setores com alto potencial de contribuição ambiental e sua baixa integração às agendas digitais e circulares.

Essa distribuição setorial se conecta diretamente às tendências temporais identificadas no Gráfico 1, que evidenciou a consolidação de pesquisas globais a partir de 2020, concentradas sobretudo em artigos de periódicos e setores já consolidados, enquanto a produção brasileira, mais recente e diversificada em formatos, ainda não incorporou de forma expressiva áreas estratégicas como o setor hospitalar. A ausência desse alinhamento entre crescimento quantitativo e diversificação temática reforça a necessidade de políticas científicas e investimentos orientados para áreas de alto impacto ambiental e social.

A escassez de pesquisas no setor hospitalar decorre, em parte, da complexidade

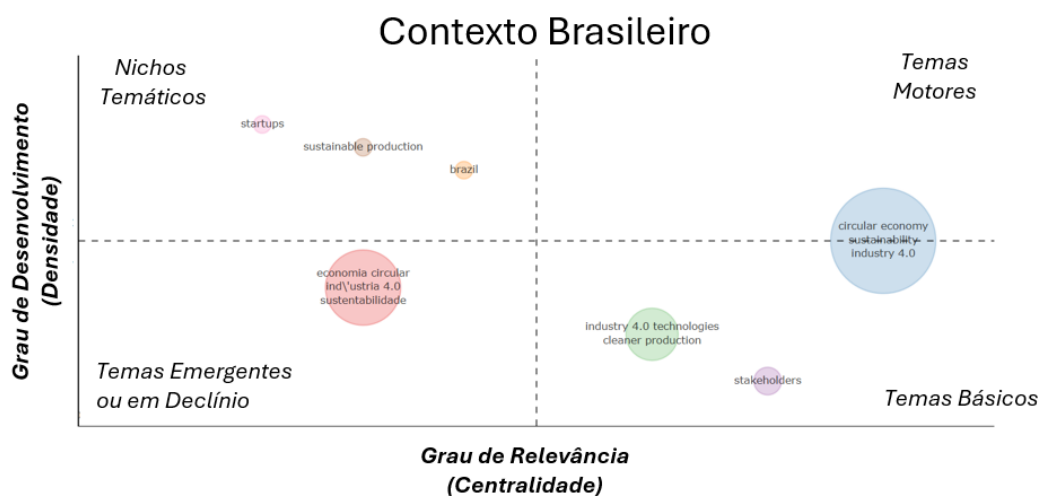
operacional (Samuel; Selvaraj; Lakshmanan, 2025), da fragmentação dos sistemas de gestão (Singh et al., 2025) e da ausência de marcos regulatórios (Silva; Sehnem, 2024c) que incentivem a circularidade de dispositivos médicos e a rastreabilidade de insumos. No entanto, tecnologias já aplicadas em setores com desafios logísticos e sanitários, como sensores, gêmeos digitais e blockchain, oferecem caminhos viáveis para superar essas barreiras (Chauhan et al., 2022; Findik; Tirgil; Özbuğday, 2023; Kim et al., 2022).

Assim, a análise aponta oportunidades estratégicas para inovação no campo da saúde, sobretudo em hospitais públicos, onde a integração de tecnologias I4.0 e práticas circulares pode contribuir para modelos mais resilientes, éticos e ambientalmente responsáveis, alinhando o setor às metas globais de sustentabilidade e consolidando a EC 4.0 no contexto brasileiro.

4.2 Mapa Temático da integração de I4.0 na EC no contexto nacional e internacional

A análise setorial apresentada no Quadro 4, ao evidenciar a concentração de estudos em determinados segmentos e a subexploração de áreas estratégicas como o setor hospitalar, reforça a necessidade de compreender não apenas onde as pesquisas se concentram, mas também como esses temas se organizam e evoluem dentro da produção científica. Para aprofundar essa compreensão, foi elaborado o mapa temático representado na Figura 6, construído a partir de análise bibliométrica que considera os contextos brasileiro e global.

Figura 6 – Mapa temático sobre EC e I4.0 no Contexto Brasileiro e no Contexto Global



Continua...

orientada. Os temas motores incluem “*big data*”, “*internet of things*”, “*blockchain*” e “*collaboration*”, associados à aplicação prática de tecnologias para rastreabilidade, automação e integração de cadeias circulares (Ali et al., 2024; Bai; Orzes; Sarkis, 2022; Sahoo; Jakhar, 2024). “*Circular economy*”, “*industry 4.0*”, “*stakeholders*” e “*technology*” permanecem como básicos, consolidando um núcleo conceitual em expansão, mas ainda em busca de maior operacionalização, conforme discutem Chhabra e Singh (2024) e Mamudu et al. (2024). Já temas emergentes como “*eco-innovation*” e “*sustainable performance*” sinalizam uma transição das abordagens ambientais tradicionais para modelos digitalizados e orientados à performance.

Comparativamente, o Brasil apresenta concentração temática restrita e de caráter mais conceitual, enquanto a literatura internacional opera com maior diversificação setorial e integração tecnológica. Essa assimetria, como apontam Elmassah (2023) e Viles et al. (2022), limita a capacidade de traduzir teoria em prática transformadora. A baixa densidade dos temas motores no Brasil reforça o hiato entre formulação e implementação, especialmente em setores estratégicos como o hospitalar, cuja ausência na literatura representa oportunidade para investigações empíricas sobre a gestão de DMDs com apoio de tecnologias digitais, visando acelerar a transição para modelos circulares.

A análise integrada do mapeamento setorial e temático evidencia que, embora a literatura sobre a convergência entre EC e tecnologias da I4.0 apresente avanços expressivos em alguns setores, o campo hospitalar permanece subexplorado, sobretudo no contexto brasileiro. As lacunas observadas dizem respeito não apenas à baixa setorialização dos estudos nacionais, mas também à ausência de abordagens que incluam de forma integrada as dimensões humanas, institucionais e sociais, elementos centrais para a construção de modelos de gestão resilientes, sustentáveis e digitais. Essa insuficiência teórica reforça a necessidade de agendas de pesquisa capazes de conectar fundamentos conceituais sólidos a propostas aplicáveis e contextualizadas. Abre-se, assim, espaço para investigações que, sem abandonar a base tecnológica e circular, avancem em direção a um paradigma mais abrangente, orientado pelo valor público da gestão hospitalar.

4.3 Panorama da gestão circular de DMD em Unidades Públicas de Saúde

A adoção de práticas sustentáveis no setor hospitalar exige, entre outras ações, uma atenção especial à gestão dos DMDs. Esses dispositivos, por sua natureza reutilizável e alto valor agregado, representam uma das principais oportunidades de alinhamento entre inovação

tecnológica e economia circular em unidades públicas de saúde. A investigação realizada junto a gestores e profissionais diretamente envolvidos na gestão de DMDs buscou identificar quais são os principais dispositivos utilizados em hospitais públicos brasileiros, fornecendo um panorama inicial sobre a diversidade, frequência e relevância desses ativos no contexto assistencial.

Os participantes deste estudo não receberam treinamento prévio ou instruções técnicas específicas antes do preenchimento do questionário. As respostas foram elaboradas com base em suas percepções profissionais, experiências acumuladas e familiaridade com as práticas de gestão hospitalar e sustentabilidade, refletindo uma avaliação subjetiva, porém informada, acerca dos fenômenos investigados. Essa opção metodológica está alinhada a abordagens perceptivas amplamente utilizadas em estudos exploratórios e descritivos sobre temas emergentes (Creswell; Creswell, 2021), nas quais o julgamento dos especialistas ou gestores é considerado um insumo válido para captar interpretações situadas e contextuais sobre práticas organizacionais complexas.

Os dados revelam alta prevalência de equipamentos de monitoramento, como oxímetros, monitores cardíacos, eletrocardiógrafos, monitores multiparamétricos e capnógrafos, mencionados por 86,7% dos respondentes, o que evidencia sua presença constante nas rotinas clínicas e assistenciais. Em seguida, destacam-se os equipamentos de diagnóstico, presentes em 80% das unidades, incluindo tomógrafos, aparelhos de ressonância magnética, endoscópios e ultrassons. Esses dispositivos são fundamentais para decisões clínicas precisas, embora impliquem custos elevados e exijam políticas consistentes de manutenção e atualização tecnológica.

Os equipamentos de terapia foram citados por 73,3% dos participantes e abrangem tecnologias como bombas de infusão, máquinas de hemodiálise e desfibriladores, que desempenham papel central na preservação da vida, mas figuram entre os principais geradores de resíduos eletroeletrônicos ao final de seu ciclo de vida. Os equipamentos de suporte respiratório, como ventiladores pulmonares e concentradores de oxigênio, apareceram em 60% das respostas, reforçando a importância da terapia respiratória em diferentes contextos hospitalares, especialmente no período pós-pandêmico.

Também foram citados instrumentos cirúrgicos reutilizáveis, mencionados por 53,3% dos respondentes, e dispositivos implantáveis, como próteses e marca-passos, apontados por 46,7%. Embora menos frequentes, esses dados indicam a complexidade e diversidade dos dispositivos médicos duráveis geridos nas instituições públicas. Além disso, uma das respostas registrou a utilização de bombas de infusão e aparelhos de raio-x portáteis, representando 6,7%

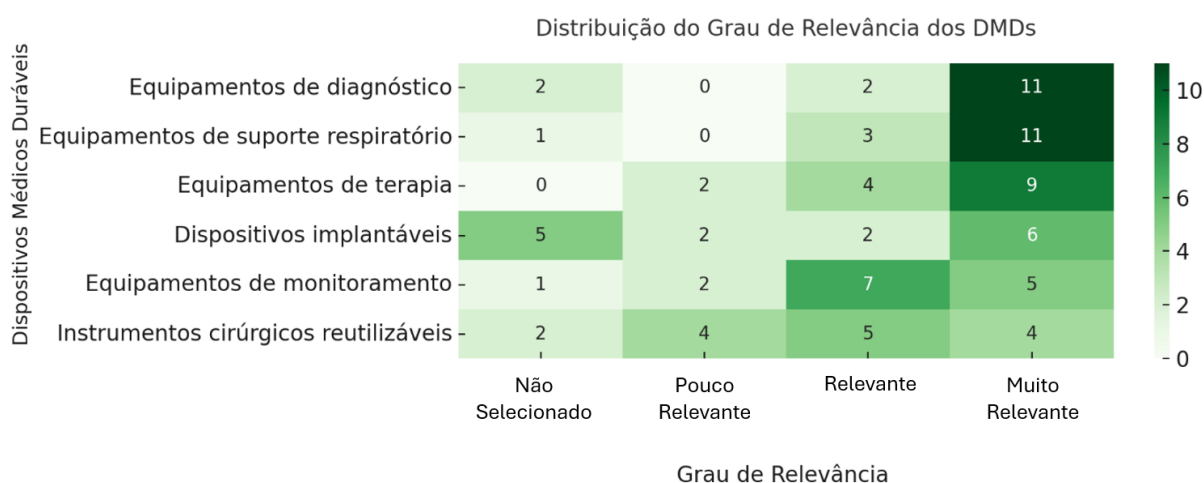
da amostra, o que reforça a heterogeneidade dos equipamentos presentes nas unidades e a inclusão de dispositivos específicos que, mesmo não listados previamente, integram o cotidiano hospitalar.

A diversidade de DMDs evidencia o desafio das unidades públicas de saúde na formulação de estratégias integradas de gestão sustentável. Conforme apontam (Daú et al., 2019), a reincorporação e o reprocessamento de dispositivos dependem não apenas de fatores técnicos, mas também de uma governança que una eficiência operacional, segurança sanitária e responsabilidade ambiental. A expressiva presença de equipamentos de alta complexidade diagnóstica e terapêutica reforça a urgência de diretrizes institucionais que abranjam todo o ciclo de vida desses ativos, da aquisição ao descarte ou reintegração.

Além de identificar os tipos mais comuns de DMDs, solicitou-se aos gestores que atribuísssem níveis de relevância econômica e ambiental para cada categoria, com o objetivo de definir quais dispositivos são prioritários em uma gestão sustentável. Esse mapeamento considerou fatores como custos de aquisição e manutenção, complexidade de descarte e potencial de reuso ou remanufatura.

A Figura 7 sintetiza essa percepção por meio de uma matriz de calor que destaca os DMDs mais relevantes econômica e ambientalmente. Os equipamentos de diagnóstico e os de suporte respiratório foram apontados por 11 respondentes como muito relevantes, confirmando sua centralidade no funcionamento hospitalar e no consumo intensivo de recursos. Essas categorias, estratégicas do ponto de vista assistencial, também concentram altos custos e desafios de manutenção e descarte, justificando seu destaque na análise.

Figura 7 – Percepção de maior relevância Econômica e Ambiental dos DMDs

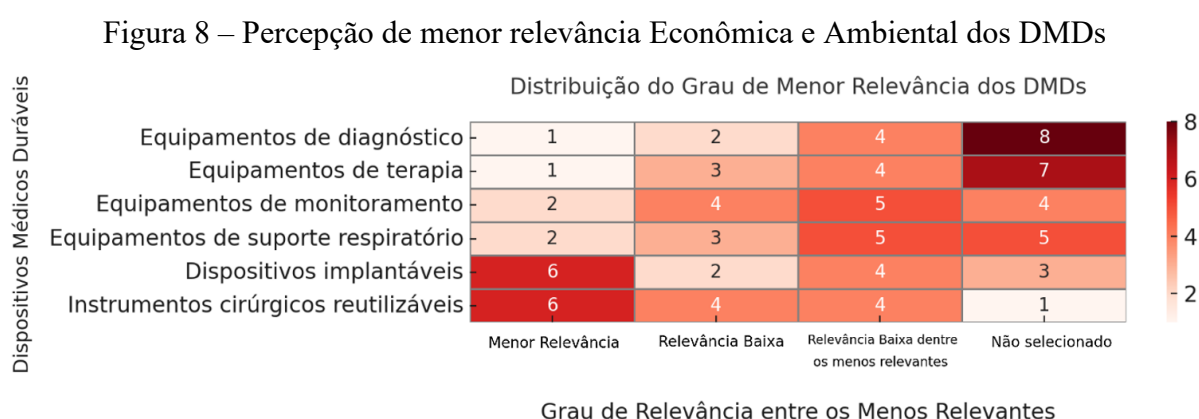


Fonte: Dados da Pesquisa (2025).

Outro ponto de destaque foi a posição dos equipamentos de terapia, que receberam 9 menções na categoria *muito relevante* , sugerindo que dispositivos como bombas de infusão e máquinas de hemodiálise são percebidos como intensivos em recursos e com potencial de impacto ambiental relevante. Em contrapartida, os dispositivos implantáveis e os instrumentos cirúrgicos reutilizáveis apresentaram menor número de menções como *muito relevantes* , com 6 e 4 menções, respectivamente, o que pode refletir uma percepção menos imediata de seu impacto ambiental, uma vez que seu uso é mais restrito ou menos visível na rotina hospitalar.

Esses dados demonstram que a percepção da relevância econômica e ambiental está fortemente associada à frequência de uso e ao papel funcional do dispositivo no cuidado clínico. A ausência de respostas ou classificações como *não selecionado* para dispositivos amplamente utilizados, como os de suporte respiratório e de terapia, sugere uma clara consciência dos gestores sobre a importância desses equipamentos no contexto da sustentabilidade hospitalar.

A Figura 8, por sua vez, apresenta os resultados relacionados aos DMDs percebidos como de *menor relevância* econômica e ambiental. Nesse caso, observa-se que os equipamentos de diagnóstico e os equipamentos de terapia aparecem com maior frequência na categoria *não selecionado* , com 8 e 7 menções, respectivamente. Essa aparente contradição, entre elevada percepção de relevância na Figura 7 e elevada frequência de *não seleção* na Figura 8, indica um grau de heterogeneidade entre os respondentes, possivelmente influenciado pela diversidade de estruturas hospitalares, funções gerenciais e níveis de maturidade da gestão de dispositivos médicos entre as unidades.



Fonte: Dados da Pesquisa (2025).

A baixa atribuição de relevância a esses dispositivos pode decorrer de uma percepção de menor volume de uso ou de sua complexidade técnica e regulatória. Dispositivos implantáveis, por exemplo, têm vida útil definida por critérios clínicos e apresentam grandes

restrições quanto ao reuso ou reprocessamento. Já os instrumentos cirúrgicos, embora reutilizáveis, são frequentemente geridos em fluxos bem estabelecidos de esterilização e controle de qualidade, o que pode transmitir a impressão de menor impacto ambiental ou menor urgência de intervenção. No entanto, a literatura destaca que essas percepções, embora legítimas, não devem desconsiderar os potenciais ganhos advindos da inovação tecnológica e da gestão integrada desses recursos (Dolci et al., 2024; Liu; Song; Liu, 2023).

A análise integrada das Figuras 7 e 8 revela uma coerência significativa nas percepções dos gestores. As escolhas de “muito relevante” e “relevante” destacaram os Equipamentos de suporte respiratório, os Equipamentos de diagnóstico e os Equipamentos de terapia como os DMDs prioritários em termos econômicos e ambientais. De modo complementar, as respostas associadas a “não selecionado” e “relevância moderada dentre os menos relevantes” corroboram esse resultado, uma vez que esses mesmos dispositivos não foram classificados entre os menos relevantes. Em contrapartida, os Equipamentos de monitoramento, os Instrumentos cirúrgicos reutilizáveis e os Dispositivos implantáveis concentraram as avaliações de menor relevância, reforçando sua posição secundária nas prioridades de gestão.

Esse alinhamento entre as duas perspectivas evidencia um consenso consistente: os dispositivos críticos para a atenção clínica e com maior potencial de retorno econômico-ambiental são claramente diferenciados daqueles de impacto mais limitado. Essa convergência fortalece a validade das respostas obtidas e orienta a formulação de estratégias que priorizem, em um primeiro momento, os DMDs de maior impacto, ao mesmo tempo em que estabelece diretrizes graduais para a incorporação dos demais em políticas de racionalização e circularidade.

Dando continuidade à análise da relevância atribuída aos diferentes DMDs, buscou-se compreender como os hospitais estruturam suas práticas de gestão desses dispositivos e quais barreiras e oportunidades são percebidas para sua integração a modelos sustentáveis, como a EC. A esse respeito, os dados revelam um cenário ainda em consolidação, com avanços pontuais e importantes limitações institucionais e tecnológicas.

Em relação ao descarte de DMDs, 46,7% dos respondentes afirmaram que suas instituições possuem diretrizes específicas para esse fim, enquanto outros 26,7% negaram essa existência e 26,7% declararam não saber informar. Essa divisão revela uma lacuna significativa na institucionalização de práticas sistematizadas de descarte, o que pode comprometer tanto a rastreabilidade quanto a adoção de estratégias sustentáveis. Entre os que afirmaram ter diretrizes, destacam-se medidas como planos de desfazimento de bens permanentes, contratos com empresas especializadas e obediência à legislação vigente, como no caso da EBSEH. No

entanto, tais iniciativas ainda são fragmentadas e pouco alinhadas a modelos circulares mais robustos, conforme apontado por autores como Ali e Kannan (2022), Silva et al. (2022) e Beltrami et al. (2021).

As principais barreiras percebidas à implementação de práticas circulares nos hospitais estão associadas à falta de capacitação e especialização técnica (60%), à resistência cultural e organizacional (53,3%), à infraestrutura tecnológica insuficiente (46,7%), e aos altos custos iniciais (46,7%). Esses achados são coerentes com os desafios relatados por Ghobakhloo et al. (2021) e Bai, Orzes e Sarkis (2022), que destacam a necessidade de políticas de incentivo, financiamento e requalificação institucional para viabilizar a transição para a circularidade em setores complexos como o hospitalar. Além disso, aspectos regulatórios e limitações na cadeia de suprimentos também aparecem como entraves relevantes, dificultando a articulação entre os atores do ecossistema da saúde.

No que se refere aos DMDs com maior dificuldade para adoção de práticas circulares, os equipamentos de diagnóstico foram os mais citados (66,7%), seguidos pelos dispositivos implantáveis (53,3%) e equipamentos de suporte respiratório (33,3%). A dificuldade pode estar associada à alta complexidade técnica, aos critérios rigorosos de segurança sanitária e à escassez de soluções tecnológicas específicas para condicionamento e rastreabilidade. Ainda assim, esses mesmos grupos de dispositivos foram identificados em análises anteriores como altamente relevantes do ponto de vista econômico e ambiental, o que indica um paradoxo entre importância percebida e viabilidade prática para reintegração ao ciclo produtivo.

Por outro lado, as principais oportunidades percebidas para viabilizar a circularidade hospitalar foram a inovação tecnológica (73,3%), os incentivos econômicos e financeiros (73,3%), e o alinhamento com políticas públicas e os ODS (53,3%). Tais respostas corroboram o crescente reconhecimento do papel das tecnologias emergentes e da governança multissetorial no fortalecimento de uma agenda hospitalar sustentável, conforme indicado por Liu et al. (2022) e Singh et al. (2025).

Ao tratar especificamente da aplicação tecnológica na gestão de DMDs, os dados revelam que apenas 20% dos hospitais utilizam sistemas digitais estruturados, enquanto 26,7% fazem uso de métodos manuais e 33,3% afirmaram não utilizar nenhuma tecnologia. Isso confirma o caráter incipiente da digitalização nessa área e sinaliza um campo promissor para o desenvolvimento de soluções baseadas em princípios da Indústria 4.0. Dentre os dispositivos que mais recebem aplicação de tecnologias, destacam-se equipamentos de monitoramento, de diagnóstico e de suporte respiratório (46,7% cada), ainda que a cobertura se mantenha restrita.

Apesar desse cenário limitado, a percepção sobre o potencial de tecnologias da I4.0 é

bastante positiva: 93,3% dos respondentes acreditam que tais tecnologias podem contribuir para uma gestão mais eficiente, sustentável e segura dos DMDs. Tecnologias como Inteligência Artificial (46,7%), Machine Learning (33,3%) e Big Data & Analytics (33,3%) foram destacadas como as mais promissoras, alinhando-se às tendências apontadas por Beltrami et al. (2023) sobre a transformação digital na área da saúde. Ainda assim, 88,7% dos participantes apontaram a falta de infraestrutura como principal barreira à adoção dessas tecnologias, seguida da falta de conhecimento técnico (53,3%) e dos custos elevados de implementação (53,3%), evidenciando um descompasso entre o entusiasmo com o potencial tecnológico e a realidade orçamentária e estrutural dos hospitais.

Por fim, 80% dos gestores consideram viável implementar práticas de EC nos hospitais, mas reforçam a necessidade de capacitação. Além disso, 66,7% enfatizam como medidas facilitadoras a necessidade de apoio financeiro governamental e 60% deles as parcerias com empresas especializadas. Essa percepção reforça a urgência de políticas públicas integradas, que promovam tanto a formação técnica quanto a articulação interinstitucional e o desenvolvimento de soluções tecnológicas acessíveis.

Esses resultados quantitativos demonstram que, embora existam importantes barreiras institucionais e estruturais, há também uma base sólida de consciência e disposição dos gestores hospitalares para evoluir em direção a uma gestão mais sustentável, desde que acompanhada por suporte técnico, normativo e tecnológico adequado. Os dados empíricos demonstram que, embora os hospitais públicos brasileiros enfrentem diversas barreiras estruturais, institucionais e tecnológicas para a implementação da EC na gestão de DMDs, existem caminhos possíveis e promissores.

O Quadro 5 sintetiza os achados centrais deste artigo, relacionando os DMDs identificados como mais relevantes pelos gestores hospitalares às principais oportunidades e desafios para sua gestão sustentável. Além disso, o quadro explicita as tecnologias associadas a esses equipamentos, assim como a forma como cada resultado contribui para a construção do *framework* final, evidenciando o vínculo entre os achados empíricos, as barreiras e impulsionadores mapeados e as diretrizes estratégicas propostas nesta tese.

Quadro 5 – Principais *outputs* da pesquisa

Principais DMDs identificados	Oportunidades	Desafios	Tecnologias I4.0 relacionadas	Contribuições potenciais para políticas e práticas
Ventiladores pulmonares;	Reuso seguro e extensão da vida útil Relevância para diagnósticos	Alto custo de manutenção; ausência de	IoT, manutenção preditiva, big data	Evidenciam necessidade de eixo de rastreabilidade e manutenção

Equipamentos de diagnóstico por imagem; Equipamentos de suporte terapêutico; Monitores multiparamétricos e instrumentos cirúrgicos reutilizáveis; Dispositivos implantáveis.	precoces; potencial de recondicionamento Potencial de economia circular com reuso e logística reversa Redução de custos com rastreamento digital e gestão de ciclo de vida Baixo potencial de circularidade, mas alta criticidade para rastreabilidade	protocolos padronizados Obsolescência precoce; falta de inventários Fragilidades regulatórias; resistência organizacional Baixa maturidade digital e resistência cultural Forte regulação e restrições sanitárias	IA, cloud computing, interoperabilidade Blockchain, sensores inteligentes RFID, sistemas de rastreamento Blockchain, UDI (<i>Unique Device Identification</i>)	Sustentam critério de eficiência operacional e eixo de classificação/padronização Apoiam eixo de circularidade e segurança sanitária Reforçam necessidade de governança digital e indicadores nacionais Evidenciam limites do escopo de circularidade, reforçando governança e normatização

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A análise sistematizada no Quadro 5 evidencia que a relevância dos DMDs ultrapassa seu valor econômico ou criticidade clínica, abrangendo também o potencial de impulsionar práticas de circularidade e inovação digital nos hospitais. Os resultados mostram oportunidades e desafios que apontam para a urgência de ações estruturadas de governança, padronização, rastreabilidade e capacitação. Essa sistematização constitui a base empírica que sustenta o *framework* proposto nesta tese, assegurando sua aplicabilidade prática para orientar gestores públicos na construção de uma gestão digital e sustentável dos DMDs no SUS.

Além disso, os dados coletados revelam que, mesmo diante de barreiras institucionais e estruturais relevantes, há também uma base sólida de consciência e disposição dos gestores hospitalares sobre a importância do tema e disposição para avançar em direção a modelos de gestão mais sustentáveis. A percepção positiva quanto à viabilidade de práticas circulares, o reconhecimento do potencial das tecnologias da I4.0 e o interesse pela digitalização dos processos indicam um terreno favorável à construção de soluções aplicáveis. Esses achados reforçam que, apesar dos desafios, há caminhos possíveis e promissores para a integração gradual da EC na gestão de DMDs em hospitais públicos brasileiros.

5 Contribuições Teóricas, Práticas e Gerenciais

Este estudo contribui para o avanço das discussões sobre sustentabilidade na gestão hospitalar ao propor um olhar sistêmico para os DMDs, compreendendo-os como elementos estratégicos na transição de hospitais públicos para modelos de gestão mais circulares, inteligentes e digitalmente integrados. Ao articular princípios da EC com potencial das tecnologias da I4.0, a proposta delineada neste trabalho oferece uma via concreta para o

fortalecimento de práticas sustentáveis em ambientes de alta complexidade e recursos limitados.

Do ponto de vista teórico, a contribuição reside na forma como o estudo articula a economia circular, a transformação digital e os desafios da gestão pública em saúde sob uma lógica integradora. A proposta reconhece que as decisões organizacionais não se dão de maneira linear, e que as práticas de gestão de DMDs envolvem múltiplas dimensões, como desempenho operacional, responsabilidade institucional e adequação normativa. Essa abordagem complexa permite interpretar os resultados empíricos à luz das tensões inerentes à gestão pública contemporânea, e abre espaço para reflexões sobre como capacidades organizacionais, arranjos institucionais e tecnologias I4.0 podem se complementar na construção de soluções mais sustentáveis e adaptativas.

Em termos práticos, a identificação de dispositivos prioritários para ações circulares, combinada à análise do nível de maturidade das práticas de reuso, rastreamento e descarte, oferece aos gestores hospitalares um diagnóstico qualificado da situação atual e um direcionamento estratégico para a tomada de decisão. Ao invés de tratar os dispositivos médicos de forma genérica, o estudo aponta caminhos específicos para o aprimoramento da gestão desses ativos, sugerindo a inclusão progressiva de tecnologias I4.0, o fortalecimento de diretrizes internas e a valorização de mecanismos de governança colaborativa.

Na perspectiva gerencial, os dados revelam que ainda há lacunas importantes na estruturação de políticas e fluxos de gestão voltados aos DMDs, mas também sinalizam a existência de práticas incipientes que podem ser fortalecidas por meio de investimento em capacitação, articulação com redes externas e acesso a tecnologias acessíveis.

A centralidade dos DMDs no funcionamento cotidiano das unidades hospitalares impõe que sua gestão não seja apenas técnica, mas estratégica, considerando não apenas a disponibilidade dos dispositivos, mas sua rastreabilidade, reprocessamento e destinação final em conformidade com os princípios da sustentabilidade e da segurança assistencial.

Sendo assim, evidencia-se que, embora ainda desafiadora, a transição para uma gestão integrada de práticas circulares e tecnologias da I4.0 de DMDs em hospitais públicos brasileiros é viável, sobretudo se ancorada em políticas públicas orientadas à inovação, em uma cultura organizacional aberta à mudança e em soluções tecnológicas adaptadas à realidade do sistema público de saúde. A proposta aqui delineada contribui para esse avanço ao oferecer um modelo analítico-prático que articula os pilares da circularidade, da digitalização e do compromisso institucional com o bem-estar coletivo.

6 Conclusões

A escassez de diretrizes específicas e a fragmentação dos esforços em torno da gestão sustentável de dispositivos médicos duráveis em hospitais públicos brasileiros não são meras constatações, mas sinais evidentes de uma negligência estrutural que se perpetua em uma das áreas mais críticas do sistema de saúde. Diante desse cenário, esta pesquisa partiu do mapeamento da literatura científica com o objetivo de compreender até que ponto as tecnologias I4.0 têm sido mobilizadas para promover a EC no setor hospitalar, ao mesmo tempo em que buscou validar, a partir de uma investigação empírica, as reais condições e percepções dos gestores sobre esse processo.

Ao cumprir esse objetivo, o estudo não apenas sistematizou os principais dispositivos médicos com potencial para práticas circulares, mas também revelou a precariedade das iniciativas existentes e a ausência de políticas estruturadas capazes de transformar intenções em práticas. A partir do cruzamento entre os dados da literatura e os achados empíricos, foi possível concluir que há, sim, caminhos para uma gestão digital e sustentável de DMDs nos hospitais públicos brasileiros, mas tais caminhos ainda são permeados por barreiras tecnológicas, institucionais e culturais que demandam ações coordenadas de curto, médio e longo prazo.

A análise integrada dos dados evidenciou que, embora algumas unidades já tenham iniciado esforços isolados de rastreabilidade, reprocessamento e descarte controlado de dispositivos, esses avanços ainda carecem de padronização, monitoramento e apoio tecnológico eficaz. A aplicação das tecnologias da I4.0, como Internet das Coisas (IoT), big data e inteligência artificial, quando presente, é frequentemente limitada à rastreabilidade básica, sem alcançar uma gestão estratégica que incorpore a lógica da circularidade. Essa constatação fortalece a premissa de que a ausência de marcos legais robustos, diretrizes operacionais e investimento em capacitação institucional são obstáculos centrais para a transição de uma gestão linear e fragmentada para um modelo orientado por princípios da EC e da I4.0.

Do ponto de vista científico, este trabalho representa uma inflexão teórica e metodológica ao propor um olhar sistêmico sobre os DMDs como vetores estratégicos de sustentabilidade hospitalar. Ao revelar lacunas na literatura nacional e indicar a incipiência do tema mesmo no plano internacional, a pesquisa contribui para tensionar as fronteiras epistemológicas que ainda tratam os dispositivos apenas como ativos técnicos e não como elementos críticos de governança, inovação e eficiência pública. O estudo ainda se destaca ao combinar evidências teóricas com dados primários provenientes da realidade brasileira, ampliando a legitimidade dos achados e sua aplicabilidade prática.

Como contribuição pública, o estudo oferece subsídios valiosos para gestores, formuladores de políticas e instituições de controle e auditoria, ao demonstrar que a adoção de tecnologias da I4.0 na gestão dos DMDs não é apenas viável, mas necessária para a melhoria da alocação dos recursos públicos, a redução do desperdício de equipamentos de alto valor agregado e o fortalecimento da infraestrutura hospitalar. Ao dar visibilidade aos equipamentos com maior potencial de circularidade e àqueles mais negligenciados, o trabalho oferece uma base concreta para intervenções regulatórias e projetos-piloto.

Entretanto, a pesquisa também reconhece suas limitações. A amostra empírica, embora composta por especialistas da área, concentra-se em uma realidade ainda fragmentada e em diferentes estágios de maturidade digital. Além disso, as barreiras sociotécnicas identificadas carecem de maior aprofundamento qualitativo para elucidar as resistências institucionais e operacionais à implementação de novos modelos de gestão. Portanto, futuras pesquisas poderão explorar tais dimensões, avançando em métodos mistos, estudos de caso comparativos e aplicação de modelos multicritério para suporte à decisão.

Por fim, é necessário reconhecer que esta investigação representa apenas o ponto de partida de uma agenda mais ampla e urgente. Os achados aqui sistematizados indicam caminhos promissores, mas também reforçam que a transição para uma gestão 4.0 de DMDs requer articulação intersetorial, engajamento político e inovação institucional. Transformar esse potencial em realidade é um imperativo não apenas técnico, mas ético, diante da missão pública de garantir um sistema de saúde mais justo, eficiente e ambientalmente responsável.

Referências

- ABDUL-HAMID, A. Q. et al. Impeding challenges on industry 4.0 in circular economy: Palm oil industry in Malaysia. **Computers and Operations Research**, v. 123, p. 105052, 2020.
- ABDUL-HAMID, A. Q. et al. The drivers of industry 4.0 in a circular economy: The palm oil industry in Malaysia. **Journal of Cleaner Production**, v. 324, n. September, p. 129216, 2021.
- ABDUL-HAMID, A. Q. et al. Industry 4.0 quasi-effect between circular economy and sustainability: Palm oil industry. **International Journal of Production Economics**, v. 253, n. July, p. 108616, 2022.
- ADA, N. et al. Analyzing barriers of circular food supply chains and proposing industry 4.0 solutions. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 12, p. 1–29, 2021.
- AGGARWAL, P.; MANASWI, K. Role of Circular Economy, Industry 4.0 and Supply Chain Management for Tribal Economy: A Systematic Review. **Journal of the Anthropological Survey of India**, v. 71, n. 2, p. 265–280, 2022.

AGRAWAL, R. et al. Progress and trends in integrating Industry 4.0 within Circular Economy: A comprehensive literature review and future research propositions. **Business Strategy and the Environment**, v. 31, n. 1, p. 559–579, 2022.

AKKAD, M. Z.; ŠEBO, J.; BÁNYAI, T. Investigation of the Industry 4.0 Technologies Adoption Effect on Circular Economy. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 19, 2022.

AL-SWIDI, A. K.; HAIR, J. F.; AL-HAKIMI, M. A. Sustainable development-oriented regulatory and competitive pressures to shift toward a circular economy: The role of environmental orientation and Industry 4.0 technologies. **Business Strategy and the Environment**, v. 32, n. 7, p. 4782–4797, 2023.

ALI, I.; KANNAN, D. Mapping research on healthcare operations and supply chain management: a topic modelling-based literature review. **Annals of Operations Research**, v. 315, n. 1, p. 29–55, 2022.

ALI, S. S. et al. A novel hybrid decision-making framework for measuring Industry 4.0-driven circular economy performance for textile industry. **Business Strategy and the Environment**, v. 33, n. 8, p. 7825–7854, 2024.

ALMEIDA, I. M. DE et al. Cadeia de suprimentos sustentável, economia circular, indústria 4.0 e gestão do conhecimento. **Exacta**, v. 22, n. 1, p. 144–173, 2022.

ALSAOUDI, T. et al. Enhancing Sustainable Performance Through Circular Economy and Industry 4.0: A Conceptual Framework for Leveraging Drivers and Mitigating Barriers. **IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**, p. 755–759, 2024.

ALSAOUDI, T.; ACQUAYE, A.; KHALFAN, M. Applying AHP to Identify and Prioritize Barriers Impacting Industry 4.0 Technologies on the Nexus of Circular Economy and Sustainable Performance. 2024 **IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions**, ICTMOD 2024, p. 1–6, 2024.

ALVES, L. et al. Towards circular economy in the textiles and clothing value chain through blockchain technology and IoT: A review. **Waste Management and Research**, v. 40, n. 1, p. 3–23, 2022.

ARAUJO, I. M. C. N. et al. Análise da integração entre a indústria 4.0 e a economia circular por meio de uma systematic literature network analysis. Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais...** Fortaleza, Ceará, Brasil: ENEGEP, 2023.

ARNS, V. D. **Framework para implantação de tecnologias da indústria 4.0 que promova a economia circular no setor de pós-colheita**. [s.l.] Universidade Nove de Julho, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004-1:2024 – Resíduos sólidos – Classificação – Parte 1: Requisitos de classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004-2:2024 – Resíduos sólidos – Classificação – Parte 2: Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR)**. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

ATIF, S. et al. Towards a conceptual development of industry 4.0, servitisation, and circular economy: A systematic literature review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 11, 2021.

ATIF, S. Analysing the alignment between circular economy and industry 4.0 nexus with industry 5.0 era: An integrative systematic literature review. **Sustainable Development**, v. 31, n. 4, p. 2155–2175, 2023.

AWAN, U. et al. Industry 4.0 and circular economy in an era of global value chains: What have we learned and what is still to be explored? **Journal of Cleaner Production**, v. 371, n. June, 2022.

AWAN, U.; SROUFE, R.; BOZAN, K. Designing Value Chains for Industry 4.0 and a Circular Economy: A Review of the Literature. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 12, 2022.

AWAN, U.; SROUFE, R.; SHAHBAZ, M. Industry 4.0 and the circular economy: A literature review and recommendations for future research. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 4, p. 2038–2060, 2021.

BAG, S. et al. Key resources for industry 4.0 adoption and its effect on sustainable production and circular economy: An empirical study. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, p. 125233, 2021.

BAG, S.; GUPTA, S.; KUMAR, S. Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development. **International Journal of Production Economics**, v. 231, n. June 2020, p. 107844, 2021.

BAG, S.; PRETORIUS, J. H. C. Relationships between industry 4.0, sustainable manufacturing and circular economy: proposal of a research framework. **International Journal of Organizational Analysis**, v. 30, n. 4, p. 864–898, 2022.

BAI, C.; ORZES, G.; SARKIS, J. Exploring the impact of Industry 4.0 technologies on social sustainability through a circular economy approach. **Industrial Marketing Management**, v. 101, n. 1, p. 176–190, fev. 2022.

BAPORIKAR, N.; BARAGDE, D. ICT Sector Perspective for Circular Economy in the Digital Era. **International Journal of Innovation in the Digital Economy**, v. 12, n. 1, p. 54–71, 2021.

BARDERI, M. T. **As tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 como facilitadoras do processo de transição para a economia circular no setor automotivo.** [s.l.] Centro Universitário FEI, 2024.

BARQUETE, S. et al. Exploring the Dynamic of a Circular Ecosystem: A Case Study about Drivers and Barriers. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 1, p. 1–22, 28 jun. 2022.

BEHL, A. et al. Analysis of Industry 4.0 and circular economy enablers: A step towards resilient sustainable operations management. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 189, n. March 2022, p. 122363, 2023.

BELTRAMI, M. et al. Industry 4.0 and sustainability: Towards conceptualization and theory. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, p. 127733, ago. 2021.

BENNY, R.; C RAJIV, S. Application of Digital Technologies for Sustainable Product

Management in a Circular Economy. **Interantional Journal of Scientific Research in Engineering and Management**, v. 09, n. 04, p. 1–9, 2025.

BRASIL. **Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Brasil, 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares**. Brasília: MMA, 2022.

CAMPOS, L. M. DE S. et al. Circular economy and industry 4.0 into industrial engineering courses. **Revista Alcance**, v. 30, n. 2(Maio/Ago), p. 1–12, 19 dez. 2023.

CASTELLO BRANCO, R. C. **A influência das tecnologias da indústria 4.0 na implementação de parques industriais ecológicos**. [s.l.] Universidade de Fortaleza, 2023.

CEZARINO, L. O. et al. Diving into emerging economies bottleneck: Industry 4.0 and implications for circular economy. **Management Decision**, v. 59, n. 8, p. 1841–1862, 2019.

CEZARINO, L. O. et al. Diving into emerging economies bottleneck: Industry 4.0 and implications for circular economy. **Management Decision**, v. 59, n. 8, p. 1841–1862, 23 ago. 2021.

CHARI, A. et al. Dynamic capabilities for circular manufacturing supply chains—Exploring the role of Industry 4.0 and resilience. **Business Strategy and the Environment**, v. 31, n. 5, p. 2500–2517, 2022.

CHAUHAN, C.; SHARMA, A.; SINGH, A. A SAP-LAP linkages framework for integrating Industry 4.0 and circular economy. **Benchmarking**, v. 28, n. 5, p. 1638–1664, 2019.

CHAUHAN, S. et al. Digitalization of Supply Chain Management with Industry 4.0 Enabling Technologies: A Sustainable Perspective. **Processes**, v. 11, n. 1, p. 96, 29 dez. 2022.

CHHABRA, D.; SINGH, R. K. Analyzing barriers to green logistics in context of Circular Economy and Industry 4.0 in the Indian manufacturing industry. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 27, n. 11, p. 1939–1952, 2024.

CHRUSCIAK, C. B. et al. Human-centric process improvement through digital transformation: contributions and limitations. **Production**, v. 35, n. 1, p. 1–16, 2025.

CILIBERTO, C. et al. Enabling the Circular Economy transition: a sustainable lean manufacturing recipe for Industry 4.0. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 7, p. 3255–3272, 2021.

CRESWELL, John W.; CRESWELL, J. David. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021.

CWIKLICKI, M.; WOJNAROWSKA, M. Circular economy and industry 4.0: One-way or two-way relationships? **Engineering Economics**, v. 31, n. 4, p. 387–397, 2020.

DACHRY, A. et al. Sustainability in the Era of Industry 4.0 and Circular Economy: Thoretical

Background and Bibliometric Analysis. International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET). **Anais...** IEEE, 16 maio 2024. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10549392/>>

DALTO, J. L. **Agri Circular-PM: uma ferramenta orientada à transição para a economia circular no agronegócio por meio da gestão de projetos.** [s.l.] Universidade Nove de Julho, 2024.

DANTAS, T. E. T. et al. How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, n. 1, p. 213–227, abr. 2021.

DAS, S. K.; BRESSANELLI, G.; SACCANI, N. **Clustering the Research at the Intersection of Industry 4.0 Technologies, Environmental Sustainability and Circular Economy: Evidence from Literature and Future Research Directions.** [s.l.] Springer International Publishing, 2024. v. 4

DAÚ, G. et al. The Healthcare Sustainable Supply Chain 4.0: The Circular Economy Transition Conceptual Framework with the Corporate Social Responsibility Mirror. **Sustainability**, v. 11, n. 3259, p. 1–19, 13 jun. 2019.

DE MATTOS NASCIMENTO, D. L. et al. Interrelationships between circular economy and Industry 4.0: A research agenda for sustainable supply chains. **Business Strategy and the Environment**, v. 33, n. 2, p. 575–596, 2024.

DE SOUZA, M. et al. A digitally enabled circular economy for mitigating food waste: Understanding innovative marketing strategies in the context of an emerging economy. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 173, n. September, p. 1–14, dez. 2021.

DESPOUDI, S. et al. Industry 4.0 and circular economy for emerging markets: evidence from small and medium-sized enterprises (SMEs) in the Indian food sector. **Annals of Operations Research**, v. 350, n. 2, p. 453–491, 29 jul. 2025.

DI MARIA, E.; DE MARCHI, V.; GALEAZZO, A. Industry 4.0 technologies and circular economy: The mediating role of supply chain integration. **Business Strategy and the Environment**, v. 31, n. 2, p. 619–632, 2022.

DIXIT, A.; DUTTA, P. Critical success factors for the adoption of circular economy in sustainable healthcare waste management. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 26, n. 7, p. 2181–2201, 10 jul. 2024.

DOLCI, V. et al. Integrating Industry 4.0 and Circular Economy: A Conceptual Framework for Sustainable Manufacturing. **Procedia Computer Science**, v. 232, p. 1711–1720, 2024.

DUARTE, C. G. C. et al. Implementation of sustainability and circular economy aiming for performance in the context of Industry 4.0 projects. **Revista de Gestão e Projetos**, v. 15, n. 3, p. 507–541, 2024.

DUONG THI BINH, A. et al. Forging Pathways to Circular Economy Excellence: Integrating Industry 4.0 with Quality Management. **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 7, p. 1–26, 2024.

DWIVEDI, A. et al. Integrating the circular economy and industry 4.0 for sustainable development: Implications for responsible footwear production in a big data-driven world. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 175, n. July 2020, p. 1–19, fev. 2022.

ELMASSAH, S. Industry 4.0 and Circular Economy: Opportunities of MENA Countries on the Path to the Sustainable Development. **International Journal of Economy, Energy and Environment**, v. 8, n. 4, p. 59–81, 2023.

EMF. **Circular Economy Introduction**. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>>.

ERTZ, M. et al. How transitioning to Industry 4.0 promotes circular product lifetimes. **Industrial Marketing Management**, v. 101, n. September 2021, p. 125–140, 2022.

ESPINOSA, A. V et al. Application of IoT in Healthcare: Keys to Implementation of the Sustainable Development Goals. **Sensors**, v. 21, n. 7, p. 1–37, 2021.

FARRUKH SHAHZAD, M.; LIU, H.; ZAHID, H. Industry 4.0 technologies and sustainable performance: do green supply chain collaboration, circular economy practices, technological readiness and environmental dynamism matter? **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 36, n. 1, p. 1–22, 2025.

FINDIK, D.; TIRGIL, A.; ÖZBUĞDAY, F. C. Industry 4.0 as an enabler of circular economy practices: Evidence from European SMEs. **Journal of Cleaner Production**, v. 410, n. July 2022, 2023.

GARRIDO, S.; MUNIZ, J.; RIBEIRO, V. B. Operations Management, Sustainability & Industry 5.0: A critical analysis and future agenda. **Cleaner Logistics and Supply Chain**, v. 10, p. 100141, mar. 2024.

GEBHARDT, M. et al. Industry 4.0 technologies as enablers of collaboration in circular supply chains: a systematic literature review. **International Journal of Production Research**, v. 60, n. 23, p. 6967–6995, 2022.

GENARO, C. F. **Proposta de um framework conceitual teórico para a implementação de uma economia circular na indústria química por meio da indústria 4.0**. [s.l.] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022.

GHAITHAN, A. M. et al. Integrated Impact of Circular Economy, Industry 4.0, and Lean Manufacturing on Sustainability Performance of Manufacturing Firms. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 6, 2023.

GHOBAKHLOO, M. et al. Industry 4.0, innovation, and sustainable development: A systematic review and a roadmap to sustainable innovation. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 8, p. 4237–4257, 3 dez. 2021.

GLOBAL GREEN AND HEALTHY HOSPITALS. **Leading the global movement for sustainable health care**. Disponível em: <<https://greenhospitals.org/>>.

GOVINDAN, K.; HASANAGIC, M. A systematic review on drivers, barriers, and practices towards circular economy: a supply chain perspective. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 1–2, p. 278–311, 17 jan. 2018.

GRABOWSKA, S.; SANIUK, S.; GAJDZIK, B. Industry 5.0: improving humanization and sustainability of Industry 4.0. **Scientometrics**, v. 127, n. 6, p. 3117–3144, 27 jun. 2022.

GRUBA, M. C. et al. Circular Economy Initiatives: Strategic Implications, Resource Management, and Entrepreneurial Innovation in a Brazilian Craft Beer Ecosystem during the COVID Era. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 19, p. 1–20, 2022.

GUILHEM, A. P. S.; KLEIN, L. Effects of Big Data Capacity on Sustainable Manufacturing and Circular Economy in Brazilian Industries. **Review of Business Management**, v. 26, n. 1, p. 1–17, 2024.

HASSAN, R. et al. The role of digital technologies in the circular transition of the textile sector. **Journal of the Textile Institute**, v. 0, n. 0, p. 1–14, 2024.

HETTIARACHCHI, B. D.; SEURING, S.; BRANDENBURG, M. Industry 4.0-driven operations and supply chains for the circular economy: a bibliometric analysis. **Operations Management Research**, v. 15, n. 3–4, p. 858–878, 2022.

HOOSAIN, M. S.; PAUL, B. S.; RAMAKRISHNA, S. The Impact of 4IR Digital Technologies and Circular Thinking on the United Nations Sustainable Development Goals. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 23, p. 10143, 4 dez. 2020.

JABBOUR, A. B. L. DE S. et al. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. **Annals of Operations Research**, v. 270, n. 1–2, p. 273–286, 1 nov. 2018.

JABBOUR, A. B. L. DE S. et al. ‘Better together’: Evidence on the joint adoption of circular economy and industry 4.0 technologies. **International Journal of Production Economics**, v. 252, n. August 2020, p. 108581, out. 2022.

JABBOUR, C. J. C. et al. First-mover firms in the transition towards the sharing economy in metallic natural resource-intensive industries: Implications for the circular economy and emerging industry 4.0 technologies. **Resources Policy**, v. 66, n. September 2019, p. 1–13, jun. 2020.

JAVAID, M. et al. Industry 4.0 and circular economy for bolstering healthcare sector: A comprehensive view on challenges, implementation, and futuristic aspects. **Biomedical Analysis**, v. 1, n. 2, p. 174–198, 2024.

JEMAL, K. M. et al. Facilitating Circular Economy Strategies Using Digital Construction Tools: Framework Development. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 1, 2023.

JESUS, G. M. K. **Contribuições da inovação aberta para a economia circular: um estudo multimétodo**. [s.l.] Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2024.

JESUS, G. M. K. et al. Open innovation to scale up the circular economy: Exploring the mediating role of Industry 4.0 technologies. **Creativity and Innovation Management**, v. 34, n. 1, p. 125–142, 2025.

JUGEND, D. et al. Industry 4.0 technologies for the adoption of the circular economy: An analysis of institutional pressures and the effects on firm performance. **Journal of**

Environmental Management, v. 370, n. 1, p. 1–13, 2024.

JUNAID, M. et al. Creating a sustainable future through Industry 4.0 technologies: Untying the role of circular economy practices and supply chain visibility. **Business Strategy and the Environment**, v. 33, n. 6, p. 5753–5775, 25 set. 2024.

KANNAN, D. et al. Unveiling barriers to the integration of blockchain-based circular economy and Industry 5.0 in manufacturing industries: A strategic prioritization approach. **Business Strategy and the Environment**, v. 33, n. 8, p. 7855–7886, 2024.

KARMAKER, C. L. et al. Impact of industry 4.0 technologies on sustainable supply chain performance: The mediating role of green supply chain management practices and circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 419, p. 138249, set. 2023.

KELES, C.; CRUZ RIOS, F.; HOQUE, S. Digital Technologies and Circular Economy in the Construction Sector: A Review of Lifecycle Applications, Integrations, Potential, and Limitations. **Buildings**, v. 15, n. 4, p. 1–27, 2025.

KHAN, I. S.; AHMAD, M. O.; MAJAVA, J. Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, Circular Economy and Sustainable Business Models perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 297, p. 126655, 2021.

KHAN, I. S.; AHMAD, M. O.; MAJAVA, J. Industry 4.0 innovations and their implications: An evaluation from sustainable development perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 405, n. 1, p. 137006, jun. 2023.

KHAN, S. A. R. et al. Digital technologies, circular economy practices and environmental policies in the era of covid-19. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 22, 2021a.

KHAN, S. A. R. et al. Industry 4.0 and circular economy practices: A new era business strategies for environmental sustainability. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 8, p. 4001–4014, 2021b.

KHURSHID, A. et al. Tackling sustainable development challenges: A fuzzy set examination of textile industry 4.0 and green supply chain barriers. **Sustainable Development**, v. 32, n. 6, p. 6819–6835, 2024.

KIM, V. N. P. et al. a The Interrelation Between Industry 4.0 and Circular Economy: Systematic Literature Review La Interrelación Entre La Industria 4.0 Y La Economía Circular: Revisión D. **Journal of Management & Technology**, v. 22, n. 4, p. 277–303, 2022.

KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular Economy: The Concept and its Limitations. **Ecological Economics**, v. 143, n. 1, p. 37–46, jan. 2018.

KOŞTI, G. Healthcare 5.0 as an emerging research domain: A comprehensive bibliometric analysis and science mapping study. **International Journal of Healthcare Management**, p. 1–23, 20 jul. 2025.

KRSTIĆ, M. et al. Logistics 4.0 toward circular economy in the agri-food sector. **Sustainable Futures**, v. 4, n. September, 2022.

KUMAR, A.; MANGLA, S. K.; KUMAR, P. Barriers for adoption of Industry 4.0 in

sustainable food supply chain: a circular economy perspective. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 73, n. 2, p. 385–411, 2024.

KUMAR, P.; SINGH, R. K.; KUMAR, V. Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: **Analysis of barriers. Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, n. October 2020, p. 105215, 2021.

LANZILOTTI, C. O. Avaliação de sistemas de produto e serviço apoiado por tecnologias habilitadoras de indústria 4.0: estudo de caso em processo de usinagem. [s.l.] Universidade Nove de Julho, 2022.

LARA, J. C. F.; EL FADEL, M.; KHALFAN, M. M. A. Integrating Industry 4.0 and circular economy in the UAE construction sector: a policy-aligned framework. **Built Environment Project and Asset Management**, v. 15, n. 3, p. 535–556, 2025.

LASKURAIN-ITURBE, I. et al. Exploring the influence of industry 4.0 technologies on the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 321, n. September, 2021.

LEI, Z. et al. How do different Industry 4.0 technologies support certain Circular Economy practices? **Industrial Management and Data Systems**, v. 123, n. 4, p. 1220–1251, 2023.

LEISSNER, S.; RYAN-FOGARTY, Y. Challenges and opportunities for reduction of single use plastics in healthcare: A case study of single use infant formula bottles in two Irish maternity hospitals. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 151, n. 104462, p. 1–8, dez. 2019.

LIU, J. et al. Digital technologies and circular economy in supply chain management: in the era of COVID-19 pandemic. **Operations Management Research**, v. 15, n. 1–2, p. 326–341, 2022.

LIU, L.; SONG, W.; LIU, Y. Leveraging digital capabilities toward a circular economy: Reinforcing sustainable supply chain management with Industry 4.0 technologies. **Computers and Industrial Engineering**, v. 178, n. 1, p. 109113, 2023.

LOPES, E. D. J.; COLOMBO, C. R.; DA SILVA, V. P. Measuring Commitment to Sustainability: Proposal of Performance Indicators for a Public University in Northeast Brazil. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 1–19, 30 nov. 2024.

LU, H.; ZHAO, G.; LIU, S. Integrating circular economy and Industry 4.0 for sustainable supply chain management: a dynamic capability view. **Production Planning and Control**, v. 35, n. 2, p. 170–186, 2024.

MACNEILL, A. J. et al. Transforming The Medical Device Industry: Road Map To A Circular Economy. **Health Affairs**, v. 39, n. 12, p. 2088–2097, 1 dez. 2020.

MAMUDU, U. U. et al. Circular economy in the manufacturing sector: Digital transformation and sustainable practices. **International Journal of Science and Research Archive**, v. 12, n. 2, p. 129–141, 2024.

MANGANDA, A. S.; SEHNEM, S.; LARA, A. C. Transition to the Circular Economy: Innovative and Disruptive Production Technologies Adopted by Agribusiness Startups. **Environmental Quality Management**, v. 34, n. 1, p. 1–18, 2024.

MASSARO, M. et al. Industry 4.0 and circular economy: An exploratory analysis of academic

and practitioners' perspectives. *Business Strategy and the Environment*, v. 30, n. 2, p. 1213–1231, 2021.

MASTOS, T. D. et al. Introducing an application of an industry 4.0 solution for circular supply chain management. *Journal of Cleaner Production*, v. 300, 2021.

MATARNEH, S. et al. Industry 4.0 technologies and circular economy synergies: Enhancing corporate sustainability through sustainable supply chain integration and flexibility. *Environmental Technology & Innovation*, v. 35, n. 1, p. 103723, ago. 2024.

MENG, X.; DAS, S.; MENG, J. Integration of Digital Twin and Circular Economy in the Construction Industry. *Sustainability (Switzerland)*, v. 15, n. 17, p. 1–14, 2023.

MOHER, D. et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *BMJ*, v. 339, n. jul21 1, p. b2535–b2535, 21 jul. 2009.

MOREIRA, A. M. M.; GÜNTHER, W. M. R. Assessment of medical waste management at a primary health-care center in São Paulo, Brazil. *Waste Management*, v. 33, n. 1, p. 162–167, 2013.

NARA, E. O. B. et al. Expected impact of industry 4.0 technologies on sustainable development: A study in the context of Brazil's plastic industry. *Sustainable Production and Consumption*, v. 25, n. 1, p. 102–122, jan. 2021.

NASCIMENTO, D. L. DE M. Building information modeling (BIM) and lean 4.0 to implement circular economy in the oil and gas sector. [s.l.] Universidade Federal Fluminense, 2019.

NASCIMENTO, D. L. M. et al. Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context. *Journal of Manufacturing Technology Management*, v. 30, n. 3, p. 607–627, 15 abr. 2019.

NERI, A. et al. The role of digital technologies in supporting the implementation of circular economy practices by industrial small and medium enterprises. *Business Strategy and the Environment*, v. 32, n. 7, p. 4693–4718, 2023.

NOBRE, G. C.; TAVARES, E. Scientific literature analysis on big data and internet of things applications on circular economy: a bibliometric study. *Scientometrics*, v. 111, n. 1, p. 463–492, 7 abr. 2017.

OLÁH, J. et al. Impact of Industry 4.0 on Environmental Sustainability. *Sustainability*, v. 12, n. 11, p. 4674, 8 jun. 2020.

OLIVEIRA NETO, G. C. DE et al. Industry 4.0 Technologies Promote Micro-Level Circular Economy but Neglect Strong Sustainability in Textile Industry. *Sustainability (Switzerland)*, v. 15, n. 14, p. 1–23, 2023.

OLIVEIRA NETO, G. C. DE et al. Industry 4.0 technologies moderately spurred micro-level circular economy considering cleaner production, not promoting sustainable performance. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 22, n. 7, p. 5817–5840, 2 abr. 2025.

OLIVEIRA NETO, G. C. DE; CONCEIÇÃO SILVA, A. DA; FILHO, M. G. How can Industry

4.0 technologies and circular economy help companies and researchers collaborate and accelerate the transition to strong sustainability? A bibliometric review and a systematic literature review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 20, n. 3, p. 3483–3520, 16 mar. 2023.

PALSODKAR, M. A.; KOLTHARKAR, P. P. Nexus Effect of Industry 4.0 and Circular Economy Practices in Achieving Sustainable Development Goals. *Circular Economy and Sustainability*, v. 4, n. 4, p. 3215–3244, 2024.

PATYAL, V. S. et al. Mapping the links between Industry 4.0, circular economy and sustainability: a systematic literature review. *Journal of Enterprise Information Management*, v. 35, n. 1, p. 1–35, 18 fev. 2022.

PAULA, E. V. DE. Exploring the Intersection of Circular Economy and Industry 4.0 in Operations Management: a Systematic Literature Review. *Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Anais...Fortaleza, Brasil: ENEGEP*, 2023.

PEARCE, D. W.; TURNER, R. K. *Economics of Natural Resources and the Environment*. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 1990.

PERÇIN, S.; BAYRAKTAR, Y.; KUMAR, V. Evaluating the Adoption of Industry 4.0, Sustainability and Circular Economy Drivers to Achieve Sustainable Development Goals—Oriented Agri-Food Supply Chains. *Business Strategy and the Environment*, v. 34, n. 4, p. 4871–4895, 2025.

PEREIRA, G. S.; MOTTA, M. G. D. *Indústria 4.0 e economia circular: uma transformação digital e sustentável na engenharia, com aplicação no setor de alimentos e bebidas*. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.

PHAM, T. T. et al. Industry 4.0 to accelerate the circular economy: A case study of electric scooter sharing. *Sustainability (Switzerland)*, v. 11, n. 23, p. 1–16, 2019.

PIEDRA-MUÑOZ, L. et al. Digital Technologies: Description, Classification, and Links to Circular Economy. *Business Strategy and the Environment*, p. 1–28, 2025.

PINHEIRO, M. A. P. *Gestão de desenvolvimento de produtos para a economia circular: uma pesquisa multimétodo no cenário brasileiro*. [s.l.] Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, 2020.

PINHEIRO, M. A. P. et al. Circular economy-based new products and company performance: The role of stakeholders and Industry 4.0 technologies. *Business Strategy and the Environment*, v. 31, n. 1, p. 483–499, 2022.

PISCICELLI, L. The sustainability impact of a digital circular economy. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v. 61, p. 101251, 2023.

PISCITELLI, G. et al. Circular economy models in the industry 4.0 era: A review of the last decade. *Procedia Manufacturing*, v. 42, n. 2019, p. 227–234, 2020.

PIYATHANAVONG, V. et al. Implementing Industry 4.0 and circular economy through the developmental culture perspective—Driving a competitive advantage in the manufacturing industry. *Business Strategy and the Environment*, v. 33, n. 8, p. 9059–9074, 2024.

RAJPUT, S.; SINGH, S. P. Industry 4.0 – challenges to implement circular economy. *Benchmarking*, v. 28, n. 5, p. 1717–1739, 2019.

RAMAKRISHNA, S. et al. Emerging Industrial Revolution: Symbiosis of Industry 4.0 and Circular Economy: The Role of Universities. *Science, Technology and Society*, v. 25, n. 3, p. 505–525, 2020.

REN, Y. et al. Discovering the systematic interlinkages among the circular economy, supply chain, industry 4.0, and technology transfer: A bibliometric analysis. *Cleaner and Responsible Consumption*, v. 9, n. April, p. 100123, 2023.

RISSE, L. A.; GANGA, G. M. D.; GODINHO FILHO, M. Aplicações de tecnologias da Indústria 4.0 na Economia Circular: uma revisão sistemática. *Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Anais...*Santos, São Paulo, Brasil: ENEGEP, 2019.

RIZVI, S. W. H.; AGRAWAL, S.; MURTAZA, Q. Automotive industry and industry 4.0- Circular economy nexus through the consumers' and manufacturers' perspectives: A case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 183, n. October 2022, 2023.

ROMERO, C. A. T. et al. Synergy between circular economy and industry 4.0: A literature review. *Sustainability (Switzerland)*, v. 13, n. 8, p. 1–18, 2021.

ROSA, P. et al. Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic literature review. *International Journal of Production Research*, v. 58, n. 6, p. 1662–1687, 18 mar. 2020.

SAHA, E.; RATHORE, P. The impact of healthcare 4.0 technologies on healthcare supply chain performance: Extending the organizational information processing theory. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 201, n. April 2023, p. 123256, 2024.

SAHOO, S.; JAKHAR, S. K. Industry 4.0 deployment for circular economy performance— Understanding the role of green procurement and remanufacturing activities. *Business Strategy and the Environment*, v. 33, n. 2, p. 1144–1160, 2024.

SAHU, A.; AGRAWAL, S.; KUMAR, G. Integrating Industry 4.0 and circular economy: a review. *Journal of Enterprise Information Management*, v. 35, n. 3, p. 885–917, 2022.

SAKHAROV, A. BRICS countries' progress in achieving the climate and environmental goals of the Agenda 2030. *International Organisations Research Journal*, v. 19, n. 1, p. 106–128, 1 mar. 2024.

SAMADHIYA, A. et al. Total productive maintenance and Industry 4.0 in a sustainability context: exploring the mediating effect of circular economy. *International Journal of Logistics Management*, v. 34, n. 3, p. 818–846, 2023.

SAMUEL, K. K. M.; SELVARAJ, K.; LAKSHMANAN, S. Health Management Information Systems. *REST Journal on Banking, Accounting and Business*, v. 4, n. 1, p. 214–222, 22 abr. 2025.

SANTOLIN, R. B.; NONEMACHER, T. B. Barreiras para implementação de Modelos de Negócio de Economia Circular na Indústria Manufatureira Brasileira. *Revista Gestão & Sustentabilidade*, v. 5, n. 1, p. 1–28, 2024.

SANTOS, D. DE A. Proposta de modelo de maturidade em sustentabilidade: o caso da cadeia produtiva no ambiente da indústria 4.0. [s.l.] Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, 2021.

SANTOS, D. B. DOS et al. Inovação tecnológica na sustentabilidade: uma revisão sistemática sobre o papel das tecnologias verdes na transição para economia circular. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*, v. 18, n. 1, p. 1–17, 2025.

SATYRO, W. C. et al. Industry 4.0 implementation: The relevance of sustainability and the potential social impact in a developing country. *Journal of Cleaner Production*, v. 337, n. January, p. 1–9, fev. 2022.

SEHNEM, S. et al. Improving startups through excellence initiatives: addressing circular economy and innovation. *Environment, Development and Sustainability*, v. 26, n. 6, p. 15237–15283, 21 abr. 2023.

SEHNEM, S. et al. Reconciling the efficiency of Industry 4.0 and circular economy with the human empowerment of lean: unraveling the challenges and opportunities of integration. *Social Responsibility Journal*, v. 21, n. 3, p. 429–450, 2025.

SELL, L. G. et al. Circular economy practices using the ReSOLVE framework: An assessment by sector and scale in the Brazilian planted tree industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 433, n. 1, p. 1–8, 2023.

SERI, M. N. A adoção de tecnologias da indústria 4.0 estimula ações da economia circular no nível micro: survey em indústrias têxteis de grande porte localizadas no Brasil. [s.l.] Universidade Federal do ABC, 2023.

SEVERO, E. A. Inovação e Economia Circular Para a Performance Organizacional e o Desenvolvimento Sustentável. *Revista Gestão e Desenvolvimento*, v. 21, n. 2, p. 3–29, 2024.

SILVA, A. F. C. DA et al. Análise da integração da indústria 4.0 e economia circular para consolidação do conceito da remanufatura 4.0: um estudo bibliométrico. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 7, p. 1–14, 16 maio 2022.

SILVA, T. H. H. DA; SEHNEM, S. The circular economy and Industry 4.0: synergies and challenges. *Revista de Gestao*, v. 29, n. 3, p. 300–313, 2022a.

SILVA, T. H. H. DA; SEHNEM, S. Industry 4.0 and the Circular Economy: Integration Opportunities Generated by Startups. *Logistics*, v. 6, n. 1, p. 14, 7 fev. 2022b.

SILVA, T. H. H. DA; SEHNEM, S. Industry 4.0 technologies as a motivator for the circular economy in foodtechs: A stakeholder perspective. *Sustainable Development*, v. 32, n. 5, p. 4633–4648, 2024a.

SILVA, T. H. H. DA; SEHNEM, S. Circular Supply Chains and Industry 4.0: An Analysis of Interfaces in Brazilian Foodtechs. *Procedia Computer Science*, v. 232, n. 2023, p. 1357–1366, 2024b.

SILVA, T. H. H. DA; SEHNEM, S. Circular supply chains and Industry 4.0: an analysis of interfaces in Brazilian foodtechs. *RAUSP Management Journal*, v. 59, n. 2, p. 78–95, 8 jul. 2024c.

SILVA, T. H. H. DA; SEHNEM, S. The utilization of Industry 4.0 technologies to enhance the circular economy through the engagement of stakeholders in Brazilian food technology companies. *Business Strategy and the Environment*, v. 34, n. 1, p. 129–161, 2025.

SILVA, M. G. O desenvolvimento da economia circular no contexto da indústria 4.0 e suas tecnologias: um estudo bibliométrico. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2022.

SIMIONI, F. J. et al. Industrial Symbiosis and Circular Economy Practices Towards Sustainability in Forest-Based Clusters: Case Studies in Southern Brazil. *Sustainability (Switzerland)*, v. 16, n. 21, p. 1–17, 2024.

SINGH, R. et al. Integrating Industry 4.0, Circular Economy, and Green HRM: A Framework for Sustainable Transformation. *Sustainability*, v. 17, n. 7, p. 3082, 31 mar. 2025.

SOARES, C. M. F. et al. Economia Circular e Indústria 4.0: Áreas de aplicação conjunta. *Exacta*, v. 23, n. 2, p. 384–408, 11 mar. 2024.

SOUZA, J. B. DE et al. Impactos da indústria 4.0 na sustentabilidade no Brasil: uma revisão bibliográfica. *Revista de Gestão e Secretariado - GeSec*, v. 15, n. 6, p. 1–16, 2024.

SOUZA, N. L. S. DE et al. A DEMATEL-based analysis of logistics determinants in online retail. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, v. 22, n. 2, p. 1–19, 2025.

SOUZA, G. L. V. Avaliação da circularidade de fabricantes de celulose e papel que adotam tecnologias da indústria 4.0: estudo de casos múltiplos. [s.l.] Universidade Nove de Julho, 2023.

STOCCO, L. C. Framework de economia circular 4.0 para o setor atacado distribuidor: Perspectivas a partir da regionalidade. [s.l.] Faculdade de Gestão e Negócios, Universidade Federal de Uberlândia, 2020.

STREIT, J. A. C.; GUARNIERI, P.; SOUZA, R. S. DE. Circular economy strategies and practices: A case study with multiple participants in the packaging sector in Brazil. *Contextus – Revista Contemporânea de Economia e Gestão*, v. 21, n. 1, p. 1–15, 2023.

TADDEI, E. et al. Circular supply chains in the era of industry 4.0: A systematic literature review. *Computers and Industrial Engineering*, v. 170, p. 108268, 2022.

TAKHAR, S. S.; LIYANAGE, K. The impact of Industry 4.0 on sustainability and the circular economy reporting requirements. *International Journal of Integrated Supply Management*, v. 13, n. 2–3, p. 107–139, 2020.

TANG, Y. M. et al. Industry 4.0 technology and circular economy practices: business management strategies for environmental sustainability. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 33, p. 49752–49769, 2022.

TEIXEIRA, C. H. S. B.; TEIXEIRA, R. L. P. Convergences between circular economy and industry 4.0 practices. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, v. 16, n. 2, p. 1–19, 23 ago. 2022.

THIRUMAL, S. et al. Barriers to Adopting Digital Technologies to Implement Circular Economy Practices in the Construction Industry: A Systematic Literature Review. *Sustainability (Switzerland)*, v. 16, n. 8, 2024.

TOTH-PETER, A. et al. Industry 4.0 as an enabler in transitioning to circular business models: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, v. 393, n. November 2022, p. 136284, 2023.

TREVISAN, A. H. et al. Barriers to employing digital technologies for a circular economy: A multi-level perspective. *Journal of Environmental Management*, v. 332, n. January, p. 1–13, abr. 2023.

UÇAR, E.; LE DAIN, M. A.; JOLY, I. Digital technologies in circular economy transition: Evidence from case studies. *Procedia CIRP*, v. 90, n. March, p. 133–136, 2020.

UPADHYAY, A. et al. Implementing industry 4.0 in the manufacturing sector: Circular economy as a societal solution. *Computers and Industrial Engineering*, v. 177, n. February, p. 109072, 2023.

VARELLA, W. A. Arquitetura de serviços integrada para promover a economia circular na agricultura. [s.l.] Universidade Nove de Julho, 2022.

VARELLA, W. A. et al. Integrated Service Architecture to Promote the Circular Economy in Agriculture 4.0. *Sustainability (Switzerland)*, v. 16, n. 6, p. 1–25, 2024.

VIDO, M. et al. Avançando a manufatura sustentável em engenharia de produção: estudo de caso sobre Indústria 4.0 e economia circular no setor industrial. *Exacta*, p. 1–37, 10 out. 2024.

VILES, E. et al. Theorizing the Principles of Sustainable Production in the context of Circular Economy and Industry 4.0. *Sustainable Production and Consumption*, v. 33, p. 1043–1058, 2022.

VIOLA, E.; GONÇALVES, V. K. Brazil ups and downs in global environmental governance in the 21st century. *Revista Brasileira de Política Internacional*, v. 62, n. 2, 2019.

YADAV, G. et al. A framework to overcome sustainable supply chain challenges through solution measures of industry 4.0 and circular economy: An automotive case. *Journal of Cleaner Production*, v. 254, p. 120112, 2020.

YAMASHITA, W. S. Explorando a conexão entre a economia circular e a indústria 4.0: uma revisão sistemática da literatura. [s.l.] Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Araraquara, 2023.

YU, Z.; KHAN, S. A. R.; UMAR, M. Circular economy practices and industry 4.0 technologies: A strategic move of automobile industry. *Business Strategy and the Environment*, v. 31, n. 3, p. 796–809, 2022.

ZARDO, D. J. et al. Circular supply chain and circular practices: An analysis from the perspective of sustainability and Industry 4.0. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, v. 32, n. 2, p. 1831–1846, 2025.

ZHAO, G. et al. Deployment of Industry 4.0 technologies to achieve a circular economy in agri-food supply chains: A thorough analysis of enablers. *Journal of Environmental Management*, v. 373, n. December 2024, p. 123856, 2025.

Material Suplementar

Portfólio Bibliográfico

Portfólio Internacional			
(CHAUHAN; SHARMA; SINGH, 2019)	(MASTOS et al., 2021)	(ATIF, 2023)	(DUONG THI BINH et al., 2024)
(PHAM et al., 2019)	(ROMERO et al., 2021)	(BEHL et al., 2023)	(HASSAN et al., 2024)
(RAJPUT; SINGH, 2019a)	(ABDUL-HAMID et al., 2022)	(ELMASSAH, 2023)	(JAVAID et al., 2024)
(ABDUL-HAMID et al., 2020)	(AGGARWAL; MANASWI, 2022)	(FINDIK; TIRGIL; ÖZBUĞDAY, 2023)	(JUNAID et al., 2024)
(CWIKLICKI; WOJNAROWSKA, 2020)	(AGRAWAL et al., 2022)	(GHAITHAN et al., 2023)	(KANNAN et al., 2024)
(HOOSAIN; PAUL; RAMAKRISHNA, 2020)	(AKKAD; ŠEBO; BÁNYAI, 2022)	(JEMAL et al., 2023)	(KHURSHID et al., 2024)
(PISCITELLI et al., 2020)	(ALVES et al., 2022)	(KARMAKER et al., 2023)	(KUMAR; MANGLA; KUMAR, 2024)
(RAMAKRISHNA et al., 2020)	(AWAN et al., 2022)	(KHAN; AHMAD; MAJAVA, 2023)	(LU; ZHAO; LIU, 2024)
(ROSA et al., 2020)	(AWAN; SROUFE; BOZAN, 2022)	(LEI et al., 2023)	(MAMUDU et al., 2024)
(TAKHAR; LIYANAGE, 2020)	(BAG; PRETORIUS, 2022)	(LIU; SONG; LIU, 2023a)	(MATARNEH et al., 2024)
(UÇAR; LE DAIN; JOLY, 2020)	(BAI; ORZES; SARKIS, 2022)	(MENG; DAS; MENG, 2023)	(PALSODKAR; KOLTHARKAR, 2024)
(YADAV et al., 2020a)	(BARQUETE et al., 2022)	(NERI et al., 2023)	(PIYATHANAVONG et al., 2024)
(ABDUL-HAMID et al., 2021)	(CHARI et al., 2022)	(PISCICELLI, 2023)	(SAHOO; JAKHAR, 2024)
(ADA et al., 2021)	(DI MARIA; DE MARCHI; GALEAZZO, 2022)	(REN et al., 2023)	(THIRUMAL et al., 2024)
(ATIF et al., 2021)	(ERTZ et al., 2022)	(RIZVI; AGRAWAL; MURTAZA, 2023)	(BENNY; C RAJIV, 2025)
(AWAN; SROUFE; SHAHBAZ, 2021)	(GEBHARDT et al., 2022)	(SAMADHIYA et al., 2023)	(DESPOUDI et al., 2025)
(BAG; GUPTA; KUMAR, 2021)	(HETTIARACHCHI; SEURING; BRANDENBURG, 2022)	(TOTH-PETER et al., 2023)	(FARRUKH SHAHZAD; LIU; ZAHID, 2025)
(BAG et al., 2021)	(KRSTIĆ et al., 2022)	(UPADHYAY et al., 2023)	(LARA; EL FADEL; KHALFAN, 2025)
(BAPORIKAR; BARAGDE, 2021)	(LIU et al., 2022)	(ALI et al., 2024)	(KELES; CRUZ RIOS; HOQUE, 2025)
(CILIBERTO et al., 2021)	(PATYAL et al., 2022)	(ALSAOUDI; ACQUAYE; KHALFAN, 2024)	(PERÇIN; BAYRAKTAR; KUMAR, 2025)
(KHAN; AHMAD; MAJAVA, 2021)	(SAHU; AGRAWAL; KUMAR, 2022)	(ALSAOUDI et al., 2024)	(PIEDRA-MUÑOZ et al., 2025)
(KHAN et al., 2021a)	(TADDEI et al., 2022)	(CHHABRA; SINGH, 2024)	(SINGH et al., 2025)
(KHAN et al., 2021b)	(TANG et al., 2022)	(DACHRY et al., 2024)	(ZHAO et al., 2025)
(KUMAR; SINGH; KUMAR, 2021)	(VILES et al., 2022)	(DAS; BRESSANELLI;	

		SACCANI, 2024)	
(LASKURAIN-ITURBE et al., 2021)	(YU; KHAN; UMAR, 2022)	(DE MATTOS NASCIMENTO et al., 2024)	
(MASSARO et al., 2021)	(AL-SWIDI; HAIR; AL-HAKIMI, 2023)	(DOLCI et al., 2024)	
Portfólio Nacional			
(NOBRE; TAVARES, 2017)	(KIM et al., 2022)	(CAMPOS et al., 2023)	(GUILHEM; KLEIN, 2024)
(JABBOUR et al., 2018)	(VARELLA, 2022)	(STREIT; GUARNIERI; SOUZA, 2023)	(DUARTE et al., 2024)
(NASCIMENTO, 2019)	(SILVA; SEHNEM, 2022b)	(TREVISAN et al., 2023)	(JESUS, 2024)
(NASCIMENTO et al., 2019)	(SATYRO et al., 2022)	(CASTELLO BRANCO, 2023)	(MANGANDA; SEHNEM; LARA, 2024)
(DAÚ et al., 2019a)	(GENARO, 2022)	(SOUZA, 2023)	(SILVA; SEHNEM, 2024a)
(RISSO; GANGA; GODINHO FILHO, 2019)	(GRUBA et al., 2022)	(OLIVEIRA NETO; CONCEIÇÃO SILVA; FILHO, 2023)	(SOARES et al., 2024)
(CEZARINO et al., 2021)	(SILVA; SEHNEM, 2022a)	(SEHNEM et al., 2023)	(SANTOLIN; NONEMACHER, 2024)
(PEREIRA; MOTTA, 2020)	(LANZILOTTI, 2022)	(SELL et al., 2023)	(JUGEND et al., 2024)
(JABBOUR et al., 2020)	(SILVA, 2022)	(SOUZA et al., 2024)	(SEHNEM et al., 2025)
(STOCCO, 2020)	(DWIVEDI et al., 2022)	(DALTO, 2024)	(SANTOS et al., 2025)
(PINHEIRO, 2020)	(PINHEIRO et al., 2022)	(SILVA; SEHNEM, 2024c)	(ZARDO et al., 2025)
(DANTAS et al., 2021a)	(TEIXEIRA; TEIXEIRA, 2022)	(VARELLA et al., 2024)	(SILVA; SEHNEM, 2025)
(NARA et al., 2021)	(PAULA, 2023)	(ARNS, 2024)	(OLIVEIRA NETO et al., 2025)
(SANTOS, 2021)	(SERI, 2023)	(SEVERO, 2024)	(JESUS et al., 2025)
(DE SOUZA et al., 2021)	(ARAUJO et al., 2023)	(BARDERI, 2024)	
(SILVA et al., 2022)	(YAMASHITA, 2023)	(SILVA; SEHNEM, 2024b)	
(ALMEIDA et al., 2022)	(OLIVEIRA NETO et al., 2023)	(VIDO et al., 2024)	

Qualidade das Publicações Nacionais sobre a integração de Tecnologias da I4.0 na EC

Fonte	Quant. Artigos	%	Qualis Capes (2020) - Engenharias III	Tipo
Sustainability (Switzerland)	4	90	A2	Periódico
Encontro Nacional de Engenharia de Produção	3	-	-	Congresso
Exacta	3	-	B1	Periódico
Business Strategy and The Environment	2	99	A1	Periódico
Technological Forecasting and Social Change	2	99	A1	Periódico
Journal of Cleaner Production	2	98	A1	Periódico
Sustainable Production and Consumption	2	98	A2	Periódico
Journal of Environmental Management	2	94	A1	Periódico

International Journal of Environmental Science and Technology	2	91	A2	Periódico
Revista de Gestão Social e Ambiental	1	N/A	A3	Periódico
Contribuciones a Las Ciencias Sociales	1	-	-	Periódico
Journal of Management & Technology	1	-	A4	Periódico
Revista Alcance	1	-	A4	Periódico
Revista de Gestão e Projetos	1	-	A4	Periódico
Revista de Gestão e Secretariado - Gesec	1	-	A4	Periódico
Contextus – Revista Contemporânea de Economia E Gestão	1	-	B1	Periódico
Revista Gestão e Desenvolvimento	1	-	B1	Periódico
Revista Gestão & Sustentabilidade	1	-	B3	Periódico
Research, Society and Development	1	-	C	Periódico
Resources Policy	1	99	A1	Periódico
Corporate Social Responsibility and Environmental Management	1	98	-	Periódico
Sustainable Development	1	98	A1	Periódico
Environment, Development and Sustainability	1	96	A2	Periódico
Social Responsibility Journal	1	95	-	Periódico
Scientometrics	1	95	A1	Periódico
Journal of Manufacturing Technology Management	1	94	A1	Periódico
Annals of Operations Research	1	87	A2	Periódico
Management Decision	1	83	A1	Periódico
Logistics	1	82	A3	Periódico
Creativity and Innovation Management	1	80	-	Periódico
RAUSP Management Journal	1	69	A2	Periódico
Procedia Computer Science	1	62	-	Periódico
Revista de Gestão	1	62	A2	Periódico
Review of Business Management	1	43	A2	Periódico
Environmental Quality Management	1	42	A4	Periódico

Fontes de publicações nacionais indexadas x não indexadas

	Quant.	%
Indexados na scopus	24	68,57%
Indexados na Capes	29	82,86%
Congressos não indexados	3	8,57%
Congressos indexados	0	0,00%
Total de Fontes	35	100,00%

Pesquisas dos programas de graduação e pós-graduação

Ano	Tipo	Área	Universidade
2024	Doutorado	Administração de Empresas	Centro Universitário FEI, São Paulo
2023	Doutorado	Administração de Empresas	Universidade de Fortaleza
2023	TCC	Engenharia Química	Universidade Estadual Paulista (Unesp)
2020	Doutorado	Engenharia de Produção	
2024	Doutorado	Engenharia de Produção	
2020	Mestrado	Administração de Empresas	Universidade Federal de Uberlândia
2022	TCC	Gestão da Informação	
2024	Mestrado	Engenharia de Produção	Universidade Federal do ABC
2020	TCC	Engenharia Química	Universidade Federal do Rio de

			Janeiro
2019	Doutorado	Sustainable Management Systems in the Applied Technologies for Sustainable Organizations	Universidade Federal Fluminense
2021	Doutorado	Engenharia de Produção	
2022	Doutorado	Engenharia de Produção	Universidade Nove de Julho
2022	Mestrado	Engenharia de Produção	
2023	Doutorado	Engenharia de Produção	
2024	Doutorado	Administração de Empresas	
2024	Doutorado	Informática e Gestão do Conhecimento	
2022	Mestrado	Engenharia Química	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

4 ARTIGO 2 - CIRCULAR ECONOMY IN HOSPITALS: DRIVERS, BARRIERS, AND KEY CONCEPTS FOR IMPLEMENTATION

Artigo aguardando submissão

Eliana de Jesus Lopes, Marina Bouzon

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

Abstract

Objective: This study aims to conceptualize the Circular Economy (CE) within the hospital context and to map the main drivers and barriers influencing its implementation, providing strategic guidance for transitioning hospitals toward sustainable and circular management models.

Design/methodology/approach: A systematic review was conducted following the PRISMA protocol, with searches in Scopus, Web of Science, PubMed, and Google Scholar. Thirty-five articles addressing circular practices, challenges, and enabling factors in hospitals were selected. The DEMATEL method was applied to analyze interdependencies and causal relationships among 51 drivers and 55 barriers, grouped into eight categories each.

Results: The study proposes an operational definition of CE for hospitals and identifies key drivers such as technological innovation, alignment with Sustainable Development Goals (SDGs), and multi-stakeholder collaboration, as well as critical barriers including institutional resistance, infrastructure limitations, and regulatory complexity. The DEMATEL analysis revealed central and causal elements, providing a prioritization framework for strategic interventions.

Research limitations: The review was limited to selected databases and languages, which may have excluded relevant studies. Additionally, the empirical phase based on the DEMATEL method was constrained by the geographic scope of the respondents, which may limit the generalizability of the findings to other international contexts.

Practical implications: Findings support hospital managers and policymakers in targeting high-leverage factors to accelerate CE adoption. Recommendations include strengthening enabling technologies (IoT, Big Data, blockchain), fostering cross-sector collaboration, and aligning hospital sustainability strategies with SDGs 3, 11, 12, and 13.

Originality/value: This study fills a gap in CE literature by focusing on hospitals, a sector with high environmental impact and complex operational demands. It offers a replicable framework that integrates systemic analysis of drivers and barriers, supporting decision-making for sustainable and resilient healthcare systems.

Keywords: Circular Economy. Hospital Management. Drivers and Barriers. Sustainable Healthcare Systems. Urban Sustainability.

1 Introduction

The transition toward sustainable, resilient, and circular development models has

become an urgent demand in the face of growing environmental, economic, and social pressures (Mahjoob; Alfadhli; Omachonu, 2023). Hospitals, as essential components of urban infrastructure, play a strategic role not only in healthcare delivery but also in the intensive use of resources and generation of waste and emissions that directly impact urban ecosystems (Gomes et al., 2024). Their operations are embedded within urban flows of energy, water, materials, and waste, positioning them as both contributors to environmental problems and agents of transformative solutions (Hoveling et al., 2024; Oliveira; Oliveira, 2022).

The current environmental crisis, marked by climate change, natural resource depletion, and ecosystem degradation, is compounded by geopolitical instability. Conflicts in Eastern Europe (e.g., Russia and Ukraine), escalating tensions in the Middle East, and strategic rivalries among global powers have disrupted supply chains, increased costs, and exposed the fragility of linear production systems that depend heavily on external resources (Kazançoğlu et al., 2021; Liu; Song; Liu, 2023b).

In response, the 2030 Agenda for Sustainable Development calls for a redesign of production and consumption systems aligned with Circular Economy (CE) principles, promoting sustainability and climate action (Silva et al., 2019). The healthcare sector faces particular challenges in this transition due to its high consumption of materials, generation of hazardous waste, and stringent sterility and safety requirements (Karliner et al., 2020; WHO, 2024).

Hospitals are estimated to account for around 5% of global CO₂ emissions and generate between 0.5 and 7.0 kg of waste per bed per day, depending on context (European Commission, 2018; WHO, 2024). In the European Union, over 1.5 million tons of healthcare waste are produced annually, placing significant strain on municipal waste systems and other urban infrastructure, such as energy, water, sanitation, and transportation services (Chew et al., 2023; Hoveling et al., 2024).

Against this backdrop, the CE emerges as a promising strategy to reduce environmental burdens by shifting from the traditional “take, make, dispose” model to systems centered on reduction, reuse, remanufacturing, and recycling (Cosenza; Andrade; Assunção, 2020; EMF, 2024; Ghoushchi et al., 2022). However, implementing Circular Economy in Hospitals (CEH) is particularly complex due to regulatory constraints, high safety and quality standards, technological and financial limitations, and cultural resistance (Hoveling et al., 2024; Kandasamy et al., 2022).

Despite growing interest in CE across industrial and urban domains, literature on its application in healthcare, especially in hospitals, remains limited, with conceptual ambiguity

and a lack of clarity regarding enabling drivers and implementation barriers (Cosenza; Andrade; Assunção, 2020). Additionally, few studies explicitly connect CE adoption in hospitals to broader urban sustainability agendas (Daú et al., 2019b; Vishwakarma et al., 2024).

Considering these gaps, this study seeks to answer: *What are the key concepts, drivers, and barriers influencing the implementation of Circular Economy in hospitals, and how can its adoption support urban sustainability?* The objective is to conceptualize the Circular Economy in the hospital context and to map the main drivers and barriers that shape its implementation, offering a structured understanding of the critical factors involved in this process and contributing to the advancement of circular and sustainable healthcare systems.

2 Methods

The present study adopts a mixed methodological approach, integrating a systematic literature review with the application of the Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) method to analyze the causal relationships between barriers and drivers for the implementation of the circular economy in the hospital context. This methodological integration not only enables the identification and consolidation of critical factors reported in the literature but also allows for the quantification and prioritization of their interdependence, providing strategic support for managers and public policymakers.

Stage 1 – Systematic Literature Review

The first stage strictly followed the PRISMA protocol (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), which ensures transparency, reproducibility, and methodological rigor (Govindan; Hasanagic, 2018; Moher et al., 2009). The process was structured into three main phases:

- (i) Definition of the research question, inclusion and exclusion criteria, and search strategy.
- (ii) Screening and selection of studies.
- (iii) Critical analysis and extraction of relevant data.

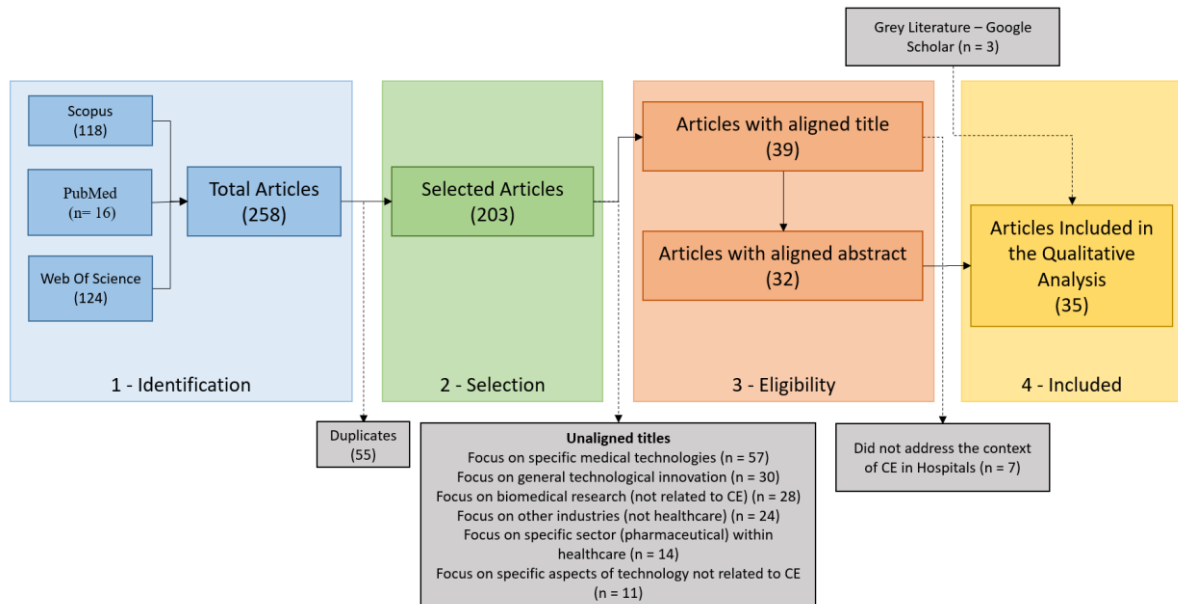
The databases Scopus and Web of Science, recognized for their comprehensive coverage of peer-reviewed journals, were consulted, complemented by searches in Google Scholar to include grey literature, limited to the first ten pages of results to ensure thematic relevance and minimize publication bias. The initial search was carried out on March 26, 2024, and updated on June 12, 2025.

The inclusion criteria considered articles published in peer-reviewed journals between

2000 and June 2025, written in English, Portuguese, or Spanish, and addressing, directly or indirectly, barriers and/or drivers for the implementation of the circular economy in hospitals. Studies exclusively focused on specific medical technologies unrelated to circularity, biomedical research with no connection to sustainable hospital management, as well as reviews, editorials, book chapters, and conference papers were excluded.

At the end of the screening process, 35 articles met the criteria and comprised the bibliographic portfolio. Reference management was carried out using Mendeley software, while data extraction and organization were performed in Excel spreadsheets for structured analysis. The literature selection process is summarized in Figure 9.

Figure 9 – Literature Selection Process



Source: by the authors (2025).

The Figure 9 demonstrates the flow of identification, selection, eligibility, and inclusion of the studies, highlighting the exclusion of articles not aligned with the systematic review and confirming the final composition of the bibliographic portfolio used in the qualitative analysis.

Stage 2 – Application of the DEMATEL Method

The second stage employed the DEMATEL method, originally developed by the Battelle Memorial Institute in the 1970s (Yazdi et al., 2020), which is widely recognized for its ability to address complex problems characterized by multiple interdependent factors. This method is particularly useful for analyzing dynamic systems, as it enables the identification of

causal relationships and the effects among variables (Kumar; Mangla; Kumar, 2024; Souza et al., 2025).

In this study, DEMATEL was applied to examine the interrelationships between the drivers and barriers previously identified in the systematic review. The analysis not only allowed for the classification of factors according to their level of relevance but also made it possible to distinguish those that play a causal role from those that are predominantly effects within the system.

The expert panel was composed of 14 specialists who met at least three of the four predefined eligibility criteria: (i) practical professional experience in circular economy or sustainable management in the hospital sector; (ii) academic experience with publications in the field; (iii) participation in projects or public policies aimed at hospital sustainability; and (iv) involvement in consultancy activities or hospital waste management. Participants' professional experience ranged from less than one year to more than ten years, representing different roles and Brazilian states, as characterized in Table 1.

Table 1 – Characteristics of the experts participating in the research

Position/Role	Area(s) of Expertise	Years of Experience in the Field	State (UF)
General Director	Hospital Director	5 to 10 years	Ceará
		More than 10 years	Rio Grande do Norte
University Professor	Specialist in Circular Economy	3 to 5 years	Paraná
	Teaching and Research	More than 10 years	Minas Gerais
			Paraná
			Paraná
			Rio Grande do Norte
			Rio Grande do Norte
	Environmental and Sanitary Engineer working in hospital waste management	More than 10 years	Rio Grande do Norte
	Researcher in Sustainability	More than 10 years	Rio Grande do Norte
Environmental and Sanitary Engineer	Environmental and Sanitary Engineer working in hospital waste management	5 to 10 years	Ceará
Researcher	Researcher in Sustainable Management	Less than 1 year	Santa Catarina
	Researcher or academic in circular economy and hospital sustainability	5 to 10 years	Santa Catarina
	Researcher in Sustainable Logistics	5 to 10 years	Santa Catarina

Source: research data (2025).

The method was operationalized in five main steps: definition of the evaluation scale, construction of the Direct-Relation Matrix (M), normalization of the matrix (N), calculation of

the Total Influence Matrix (T), and computation of the D and R vectors.

The evaluation scale ranged from 0 to 4, where 0 represents no influence and 4 represents a very high influence, as shown in Table 2.

Table 2 – Evaluation scale of influences in the DEMATEL method

Value	Interpretation
0	No influence
1	Low influence
2	Medium influence
3	High influence
4	Very high influence

Source: Souza et al. (2025).

Each expert assessed, for all pairs of factors, the degree of influence of one over the other. The final direct-relation matrix (M) was obtained by calculating the arithmetic mean of the individual matrices.

$$M = [m_{ij}]_{n \times n}$$

Where m_{ij} represents the average degree of influence of factor i over factor j . To ensure that all elements were on the same scale of comparison, the normalization of the matrix (N) was applied:

$$N = \frac{M}{(\sum_{j=1}^n m_{ij}, \sum_{i=1}^n m_{ij})}$$

In this formula, the denominator corresponds to the maximum value among the sums of the elements of each row and each column of the direct-relation matrix M, ensuring that all normalized values fall within the range [0,1].

The total influence matrix (T) was obtained using the following expression:

$$T = N \cdot (I - N)^{-1}$$

Where I is the identity matrix of order n .

Finally, the calculation of the D and R vectors followed these criteria:

- D_i = sum of row i of matrix T (influence exerted)
- R_i = sum of column i of matrix T (influence received)

From these vectors, two key indicators were computed: the total importance of the factor ($D_i + R_i$) and the factor's nature, which can be positive (causal factor) or negative (effect factor), determined by ($D_i - R_i$).

The application of the DEMATEL method made it possible to map the network of interdependencies between barriers and drivers, enabling the identification of elements with the

greatest centrality in the system and those that act as levers for the transition to the hospital circular economy. The results obtained provide a foundation for developing strategic guidelines aligned with sustainability principles and operational efficiency.

3 Results

3.1 Circular economy in the hospital context

The transition to a circular economy in healthcare aligns with global sustainability efforts to optimize resource use and minimize waste. The traditional linear model of “extract, produce, discard” has resulted in resource depletion and excessive waste, especially in high-consumption sectors like healthcare (Alhawari et al., 2021; Daú et al., 2019b; Korhonen; Honkasalo; Seppälä, 2018). Circular strategies, such as reuse, remanufacturing, and waste prevention, have proven effective in reducing both costs and environmental impact, becoming essential for sustainable hospital operations (Mahjoob; Alfadhli; Omachonu, 2023).

The COVID-19 pandemic further exposed the risks of conventional disposal methods like incineration and landfilling. The surge in single-use medical supplies and PPE overwhelmed waste systems, reinforcing the need for alternatives that reduce reliance on virgin materials and promote cleaner production technologies (Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021c).

Institutions such as the Ellen MacArthur Foundation have fostered CE adoption in healthcare through initiatives like CE100, which promote systemic innovation and cross-sector collaboration (EMF, 2024; Michałowska et al., 2021). Successfully implementing CEH requires stakeholder alignment, regulatory compliance, and investment in circular product design. These strategies not only yield environmental and economic benefits but also support long-term resilience. Understanding CE concepts is thus vital to building an effective framework.

Literature converges on several key aspects:

- Transitioning from linear to circular models through clean recovery and hybrid development (Ghoushchi et al., 2022; Hoveling et al., 2024; Kandasamy et al., 2022; Mahjoob; Alfadhli; Omachonu, 2023).
- Systemic collaboration among device users, manufacturers, and regulators (Mahjoob; Alfadhli; Omachonu, 2023; Narang; Vij, 2021; Vishwakarma et al., 2024).
- Application of circular design to meet strict safety and sterility requirements

(Kandasamy et al., 2022; Kane; Bakker; Balkenende, 2018).

- Reprocessing and reuse of medical devices to reduce waste and enhance sustainability (Hoveling et al., 2024; Macneill et al., 2020; Narang; Vij, 2021).
- Promotion of stakeholder practices such as sharing, repairing, and remanufacturing (Mahjoob; Alfadhli; Omachonu, 2023; Vishwakarma et al., 2024).
- Adoption of on-site strategies including decontamination, repair, and remanufacturing (Chew et al., 2023; Hoveling et al., 2024; Vishwakarma et al., 2024).
- Application of the 3Rs (reduce, reuse, recycle) to mitigate environmental and health impacts (Ghoushchi et al., 2022).

Based on the reflection on the concepts presented by the authors, the following definition of Circular Economy in Healthcare (CEH) can be formulated:

CEH is a systemic approach that transforms the linear model of “extract, produce, and dispose” into a cyclical and sustainable system, through the application of circular design principles. This approach aims to optimize the use of resources, minimize waste, and reduce emissions, integrating practices such as reduction, reuse, repair, remanufacturing, and recycling of medical products and materials. Such practices are designed to meet the rigorous safety, sterility, and efficacy requirements of the health sector, ensuring environmental, economic, and social sustainability without compromising the quality of medical care.

The implementation of CEH requires coordinated action among stakeholders such as health professionals, device manufacturers, regulators, and policymakers (Liotine, 2019; Sinha, 2023; Wu; Liu; Zhang, 2021). The goal is to extend product lifespan, promote reuse and reprocessing systems, and adopt circular design aligned with strict safety and sterility standards (Hoveling et al., 2024). Sustainable strategies like closed-loop cycles and hybrid product design also help reduce biomedical waste and associated health and environmental risks (Alighardashi et al., 2024).

Although the healthcare sector faces challenges, such as infrastructure limitations, strict regulatory demands, and cultural resistance, overcoming them can generate operational savings, environmental benefits, and enhanced system resilience (Kane; Bakker; Balkenende, 2018; Liu; Song; Liu, 2023b).

Aligned with global sustainability trends and the Sustainable Development Goals (SDGs), CEH offers a pathway to address environmental and socioeconomic challenges (Ullah; Olatunji; Qayyum, 2024). Its success depends on enabling policies, financial support,

technological innovation, and cultural transformation, highlighting the need for education and professional training to foster circular practices.

3.2 Drivers and Barriers for the Implementation CEH

The growing pressure for sustainable hospital management models, combined with the pursuit of resource efficiency, has fueled the debate on the adoption of the Circular Economy in the healthcare sector (Bevere; Faccilongo, 2024). However, the successful implementation of this transition still faces significant challenges, requiring a comprehensive understanding of its influencing factors (Ali; Kannan, 2022a; Macneill et al., 2020).

In total, 51 drivers (Table b - Supplementary Material) and 55 barriers (Table c - Supplementary Material) were identified and systematically grouped into eight analytical categories for each group. This categorization revealed a wide array of influencing factors, ranging from technological and regulatory aspects to cultural, organizational, and financial issues. The drivers were organized into the following categories: Alignment with SDGs and Public Policies (D1), Collaboration and Partnerships (D2), Market and Societal Demands (D3), Resource Efficiency (D4), Economic and Financial Incentives (D5), Technological Innovation (D6), Regulatory Pressure (D7), and Circular Economy Practices in the Hospital Sector (D8).

The analyzed literature shows that technological advances, particularly those stemming from Industry 4.0, have promoted circular practices through waste traceability, inventory digitalization, process reengineering, and the use of tools such as Big Data and Artificial Intelligence (Hoveling et al., 2024; Kalaria; Singh; Prajapati, 2023; Vishwakarma et al., 2024). Simultaneously, resource efficiency principles, such as reducing material consumption and extending the life cycle of medical devices, are highlighted as core strategies to mitigate environmental impacts and reduce operational costs (Macneill et al., 2020).

CE practices in the hospital sector, including reuse and refurbishment of medical devices, recycling initiatives, sustainable procurement policies, and closed-loop supply chains, emerge as practical enablers of sustainability-oriented transformation in healthcare organizations (Hoveling et al., 2024). Interinstitutional collaboration initiatives, such as partnerships with suppliers, universities, and technology companies, also act as facilitators for implementation by enabling the exchange of solutions and overcoming structural bottlenecks (Dihan et al., 2023). Economic and financial incentives are also prominent in the literature, indicating that mechanisms such as green financing and carbon credits can accelerate the adoption of circular technologies and practices (Alfina et al., 2022; Kazançoğlu et al., 2021).

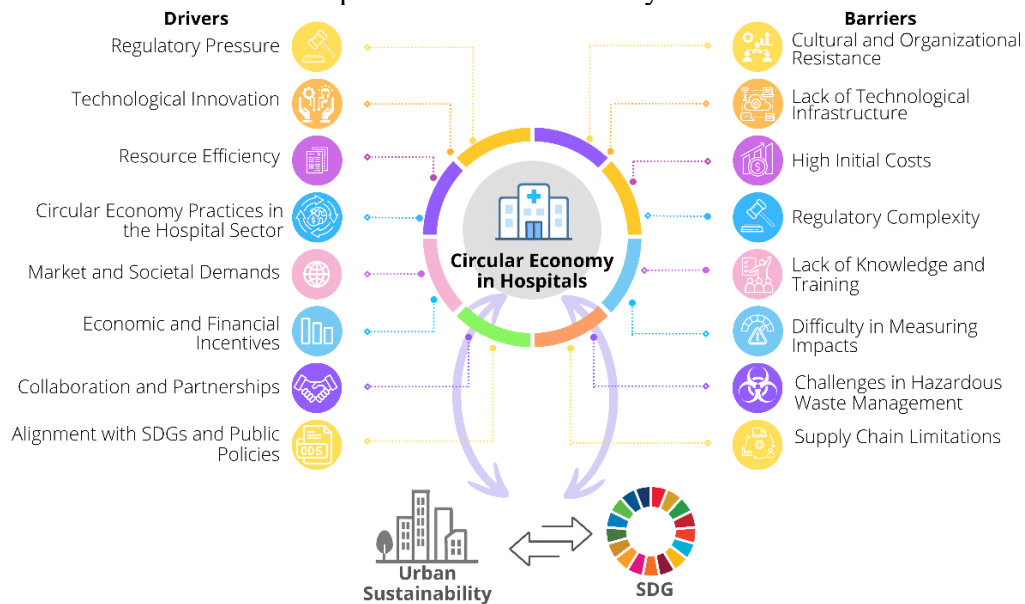
Despite these drivers, the studies also identify a wide range of structural, cultural, and economic barriers that hinder the effective adoption of circular strategies. A total of 55 limiting factors were organized into eight categories: High Initial Costs (B1), Regulatory Complexity (B2), Hazardous Waste Management Challenges (B3), Difficulty in Measuring Impacts (B4), Lack of Knowledge and Training (B5), Lack of Technological Infrastructure (B6), Supply Chain Limitations (B7), and Cultural and Organizational Resistance (B8). Among the most critical barriers are the high costs associated with acquiring circular technologies and the lack of digital infrastructure in many hospitals, particularly in low-income settings (Alighardashi et al., 2024; Chew et al., 2023). The complexity of environmental and sanitary regulations also imposes difficulties in compliance, often requiring structural and administrative reforms that are not always feasible (Leppälä; Vornanen; Savinen, 2023; Ranjbari et al., 2022).

Additional challenges include the absence of standardized indicators to measure the impacts of circularity, which hinders evidence-based decision-making (Kumar; Rahman, 2014), and organizational resistance to shifting away from traditional linear models (Hoveling et al., 2024). These barriers, in conjunction with the identified drivers, form an interdependent network of factors whose relationships were examined through the DEMATEL method to determine their degree of influence and causal nature.

Figure 2 presents a visual synthesis of the analytical categories of drivers and barriers identified in this review. On the left side, the eight driver categories are displayed, encompassing aspects such as regulatory pressure, technological innovation, resource efficiency, and the adoption of circular economy practices in hospital operations. On the right side, the eight barrier categories are shown, highlighting structural, technological, financial, and organizational obstacles that can hinder the circular transition in healthcare institutions. The central element of the diagram illustrates the interplay between these drivers and barriers in the context of hospital circular economy, emphasizing how their interaction directly influences outcomes related to urban sustainability and the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs).

By visually mapping these interconnections, Figure 10 reinforces the notion that overcoming barriers while leveraging key drivers is essential for enabling a systemic and sustainable transformation in hospital management. This representation also serves as a conceptual bridge to the subsequent application of the DEMATEL method, which will provide a quantitative analysis of causal relationships and the relative influence among these factors.

Figure 10 – Framework of Drivers and Barriers to CEH Implementation and Their Relationship to Urban Sustainability and the SDGs



Source: Developed by the authors based on the bibliographic portfolio and on the results presented in tables b and c of the Supplementary Material (2025).

The graphical representation synthesizes the findings of this review and highlights how adopting circularity in hospital settings not only improves operational efficiency and waste management but also broadens the scope of environmental strategies, contributing to a more resilient urban ecosystem. By integrating the identified drivers and barriers with sustainable development dimensions, the framework offers a robust analytical foundation for building practical guidelines and public policies aimed at supporting the circular transition in healthcare.

3.3 DEMATEL Analysis of Drivers and Barriers

The DEMATEL method was applied to analyze the causal relationships among the drivers and barriers to implementing the CE in the hospital context. This approach allows for a systematic identification of the most influential factors, those that act as catalysts in the system, and those that are primarily consequences of other elements. The results are presented in two parts: first for the drivers and then for the barriers, following the sequential steps of the method.

The first stage consisted of obtaining the Direct-Relation Matrix (M) for the drivers, based on the mean values of the evaluations provided by the panel of experts. These values represent the perceived degree of influence of one driver over another, on a scale from 0 (no influence) to 4 (very high influence). Table 3 presents the Direct-Relation Matrix for the drivers of CE implementation in hospitals.

Table 3 – Direct-Relation Matrix of drivers for CEH

Matrix M	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	Sum
Alignment with SDGs and Public Policies (D1)	-	2.93	2.57	2.21	2.71	2.50	3.07	3.14	19.14
Collaboration and Partnerships (D2)	3.21	-	2.36	2.71	3.21	2.79	2.64	3.07	20.00
Market and Societal Demands (D3)	2.79	2.93	-	2.57	2.79	2.71	2.71	3.07	19.57
Resource Efficiency (D4)	2.64	2.86	2.36	-	3.14	3.43	2.71	3.21	20.36
Economic and Financial Incentives (D5)	2.79	2.79	2.07	2.50	-	2.79	2.71	3.21	18.86
Technological Innovation (D6)	2.86	3.29	2.71	3.36	3.57	-	3.00	3.36	22.14
Regulatory Pressure (D7)	3.21	2.43	2.79	2.14	2.21	2.21	-	2.79	17.79
Circular Economy Practices in the Hospital Sector (D8)	3.36	3.36	3.00	3.36	3.43	3.43	3.43	-	23.36

Source: research data (2025).

An initial observation from Table 3 is that all mean influence values are above 2.0, with most above 2.5, indicating strong interconnectivity between the drivers. Notably, Circular Economy Practices in the Hospital Sector demonstrates the highest overall influence on other drivers, suggesting its strategic role as a central enabler of CE adoption. This aligns with findings from Dihan et al. (2023), who argue that embedded CE practices act as a systemic catalyst for broader sustainability-oriented transformations. Furthermore, the high interdependence suggests that isolated interventions may have limited impact, and integrated strategies could generate cumulative effects across multiple drivers.

To ensure comparability across elements, the Direct-Relation Matrix was normalized. The normalized values are shown in Table 4.

Table 4 – Normalized Matrix (N) of drivers

Matrix N	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8
Alignment with SDGs and Public Policies (D1)	0.00	0.13	0.11	0.09	0.12	0.11	0.13	0.13
Collaboration and Partnerships (D2)	0.14	0.00	0.10	0.12	0.14	0.12	0.11	0.13
Market and Societal Demands (D3)	0.12	0.13	0.00	0.11	0.12	0.12	0.12	0.13
Resource Efficiency (D4)	0.11	0.12	0.10	0.00	0.13	0.15	0.12	0.14
Economic and Financial Incentives (D5)	0.12	0.12	0.09	0.11	0.00	0.12	0.12	0.14
Technological Innovation (D6)	0.12	0.14	0.12	0.14	0.15	0.00	0.13	0.14
Regulatory Pressure (D7)	0.14	0.10	0.12	0.09	0.09	0.09	0.00	0.12
Circular Economy Practices in the Hospital Sector (D8)	0.14	0.14	0.13	0.14	0.15	0.15	0.15	0.00

Source: research data (2025).

The normalization process adjusts the scale so that the maximum sum of the rows is equal to 1, ensuring comparability across all factors. After this step, the calculation of the Total Influence Matrix (T) begins. The first stage consists of subtracting the normalized matrix (N) from the identity matrix (I). This operation highlights the residual structure of the network,

isolating the extent to which each driver remains independent after accounting for direct influences. The diagonal values are equal to 1, as no factor influences itself, while the off-diagonal negative values represent the reduction in influence once normalization is applied.

Following this, the inverse of (I–N) was calculated. This inversion transforms the residual influence structure into a form that allows the propagation of indirect effects throughout the system. Higher values in this matrix indicate strong amplification of influence when indirect pathways are considered, revealing drivers whose impacts extend significantly beyond their direct relationships.

The final step involves multiplying the normalized matrix N by the inverse of (I–N), generating the Total Influence Matrix T shown in Table 5. This matrix integrates both direct and indirect effects, providing a holistic view of the influence network. For example, Circular Economy Practices in the Hospital Sector and Resource Efficiency exhibit consistently high influence scores across multiple connections, suggesting their pivotal role in driving systemic change toward circularity. Conversely, drivers with comparatively lower influence values may represent areas where strategic interventions are required to strengthen their systemic impact.

Table 5 – Total Influence Matrix (T) of drivers

Matrix T	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D
Alignment with SDGs and Public Policies (D1)	0.69	0.79	0.69	0.71	0.79	0.75	0.78	0.83	6.04
Collaboration and Partnerships (D2)	0.83	0.70	0.71	0.75	0.84	0.79	0.80	0.86	6.28
Market and Societal Demands (D3)	0.81	0.80	0.61	0.74	0.81	0.77	0.79	0.84	6.17
Resource Efficiency (D4)	0.83	0.83	0.72	0.66	0.85	0.82	0.81	0.88	6.41
Economic and Financial Incentives (D5)	0.78	0.78	0.67	0.72	0.68	0.75	0.77	0.83	5.98
Technological Innovation (D6)	0.89	0.89	0.78	0.84	0.92	0.75	0.88	0.94	6.88
Regulatory Pressure (D7)	0.76	0.73	0.66	0.67	0.73	0.70	0.63	0.77	5.65
Circular Economy Practices in the Hospital Sector (D8)	0.94	0.93	0.82	0.87	0.95	0.91	0.92	0.85	7.20
R	6.53	6.44	5.68	5.96	6.58	6.24	6.37	6.79	

Source: research data (2025).

Based on the D and R values from Table 5, the mean (0.7905), standard deviation (0.0818), and cutoff value (threshold) of 0.8723 were calculated. This parameter was used to identify the most significant connections among the drivers, highlighting in the matrix the values that exceed the defined limit. Relationships above the threshold represent interactions with relevant intensity for the system's dynamics, being fundamental for guiding intervention strategies. It is observed that Alignment with SDGs and Public Policies presents several strong connections with other drivers, reinforcing its strategic role as an element of high connectivity and systemic influence.

Table 6 synthesizes the results of the analysis through the D vectors (exerted influence) and R vectors (received influence), in addition to calculating the total importance degree (D+R) and the causal or effect role of each driver, represented by D–R.

Table 6 – Cause and effect values for drivers

Driver	D	R	D+R	D-R	Cause/ Effect	Overall Ranking
Alignment with SDGs and Public Policies (D1)	6.04	6.53	12.57	-0.50	Effect	4
Collaboration and Partnerships (D2)	6.28	6.44	12.72	-0.16	Effect	3
Market and Societal Demands (D3)	6.17	5.68	11.84	0.49	Cause	8
Resource Efficiency (D4)	6.41	5.96	12.37	0.44	Cause	6
Economic and Financial Incentives (D5)	5.98	6.58	12.56	-0.60	Effect	5
Technological Innovation (D6)	6.88	6.24	13.12	0.64	Cause	2
Regulatory Pressure (D7)	5.65	6.37	12.02	-0.73	Effect	7
Circular Economy Practices in the Hospital Sector (D8)	7.20	6.79	13.99	0.41	Cause	1

Source: research data (2025).

The results show that Circular Economy Practices in the Hospital Sector (13.99), Technological Innovation (13.12), and Collaboration and Partnerships (12.72) reached the highest D+R values, confirming their central positions in the system and highlighting them as critical factors for advancing the Circular Economy in hospitals. The analysis of the causal role reveals that Technological Innovation (0.64), Market and Societal Demands (0.49), Market and Societal Demands (0.44), and Circular Economy Practices in the Hospital Sector (0.41) present positive D–R values, characterizing them as driving elements capable of triggering changes in the other drivers. These factors should be prioritized in implementation strategies, as they have the potential to generate multiplier effects within the network.

On the other hand, Alignment with SDGs and Public Policies (–0.50), Collaboration and Partnerships (–0.16), Economic and Financial Incentives (–0.60), and Regulatory Pressure (–0.73) show negative D–R values, being classified as effect factors, meaning they are more dependent on the activation of other elements. Although they exert influence within the system, their effectiveness is conditioned by the strengthening of causal factors, indicating that actions aimed exclusively at these drivers may not produce structural changes without the support of causal elements.

This integrated analysis, combining the T Matrix, the threshold, and the cause–effect classification, provides robust support for hospital managers and policymakers, allowing them to prioritize efforts on factors with the highest capacity to induce systemic transformations, while simultaneously guiding complementary strategies for the more reactive elements.

The causal diagram in Figure 11a visually represents these relationships, highlighting the central causal drivers and their direct and indirect influence pathways. From a managerial perspective, prioritizing interventions on causal drivers such as Technological Innovation (D6) and Market and Societal Demands (D3) can generate ripple effects, improving the performance of dependent drivers. In policy terms, strengthening institutional collaboration (D2) and embedding CE practices (D8) into regulatory and funding frameworks could accelerate the systemic transition towards CE in healthcare.

A similar procedure was applied to the barriers. The Direct-Relation Matrix (M) for barriers, obtained from the experts' mean scores, is shown in Table 7.

Table 7 – Direct-Relation Matrix of barriers for CEH

Matrix M	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	Sum
High Initial Costs (B1)	-	2.21	3.14	2.00	2.43	3.64	3.07	2.14	18.64
Regulatory Complexity (B2)	1.64	-	2.64	1.50	1.86	1.86	1.64	1.50	12.64
Hazardous Waste Management Challenges (B3)	3.14	3.07	-	3.14	3.50	3.29	2.79	3.29	22.21
Difficulty in Measuring Impacts (B4)	2.14	2.64	2.79	-	3.43	2.79	2.21	3.36	19.36
Lack of Knowledge and Training (B5)	1.86	2.64	3.07	2.64	-	2.50	1.93	3.71	18.36
Lack of Technological Infrastructure (B6)	3.14	1.93	2.93	2.21	2.43	-	2.29	2.00	16.93
Supply Chain Limitations (B7)	3.00	2.50	2.57	2.50	2.43	2.64	-	2.21	17.86
Cultural and Organizational Resistance (B8)	2.36	2.29	3.00	2.57	3.57	2.29	1.86	-	17.93

Source: research data (2025).

The results indicate that Lack of Technological Infrastructure and Regulatory Complexity exert strong influence over other barriers, with mean values frequently above 3.0. This corroborates previous findings by Leppälä et al. (2023) and Ranjbari et al. (2022), who identify technological readiness and regulatory alignment as decisive bottlenecks for CE implementation in healthcare. The normalized values are presented in Table 8.

Table 8 – Normalized Matrix (N) of barriers

Matriz N	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8
High Initial Costs (B1)	0.00	0.10	0.14	0.09	0.11	0.16	0.14	0.10
Regulatory Complexity (B2)	0.07	0.00	0.12	0.07	0.08	0.08	0.07	0.07
Hazardous Waste Management Challenges (B3)	0.14	0.14	0.00	0.14	0.16	0.15	0.13	0.15
Difficulty in Measuring Impacts (B4)	0.10	0.12	0.13	0.00	0.15	0.13	0.10	0.15
Lack of Knowledge and Training (B5)	0.08	0.12	0.14	0.12	0.00	0.11	0.09	0.17
Lack of Technological Infrastructure (B6)	0.14	0.09	0.13	0.10	0.11	0.00	0.10	0.09
Supply Chain Limitations (B7)	0.14	0.11	0.12	0.11	0.11	0.12	0.00	0.10
Cultural and Organizational Resistance (B8)	0.11	0.10	0.14	0.12	0.16	0.10	0.08	0.00

Source: research data (2025).

The analysis of the barriers to CEH, based on the DEMATEL method, begins with the evaluation of the direct influence relationships between the identified factors. The subtraction of the normalized matrix from the identity matrix generated the adjusted interaction structure, highlighting the strength and direction of the connections between barriers. These results reveal that certain barriers exert consistent influence across multiple elements of the system, while others show a higher level of dependence on external activation to produce significant effects.

Subsequently, the inverse of (I–N) was calculated, generating a matrix. This step incorporates the propagation of indirect effects across the system, revealing how certain barriers amplify their influence through secondary pathways. Higher values in this matrix indicate elements whose impacts extend well beyond direct interactions, reinforcing their systemic relevance.

Once the adjusted matrix was established, its inversion produced the Total Influence Matrix, which consolidates both direct and indirect effects among the barriers. This step expands the understanding of systemic relationships, as shown in Table 9, by making it possible to observe how certain constraints, such as limited infrastructure investment or fragmented waste management policies, exert influence beyond their immediate interactions, cascading into other operational and strategic challenges.

Table 9 – Total Influence Matrix (T) of barriers

Matrix T	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	D
High Initial Costs (B1)	0.45	0.54	0.64	0.52	0.60	0.63	0.54	0.56	4.48
Regulatory Complexity (B2)	0.39	0.32	0.47	0.37	0.43	0.42	0.36	0.40	3.15
Hazardous Waste Management Challenges (B3)	0.65	0.64	0.60	0.63	0.72	0.70	0.59	0.68	5.21
Difficulty in Measuring Impacts (B4)	0.55	0.57	0.64	0.45	0.66	0.61	0.51	0.62	4.61
Lack of Knowledge and Training (B5)	0.52	0.55	0.63	0.53	0.50	0.58	0.49	0.61	4.41
Lack of Technological Infrastructure (B6)	0.54	0.49	0.59	0.49	0.56	0.45	0.48	0.52	4.13
Supply Chain Limitations (B7)	0.55	0.53	0.60	0.52	0.58	0.58	0.40	0.54	4.29
Cultural and Organizational Resistance (B8)	0.53	0.53	0.62	0.52	0.63	0.57	0.48	0.46	4.34
R	4.17	4.17	4.78	4.03	4.69	4.54	3.84	4.39	

Source: research data (2025).

From the Total Influence Matrix, the calculation of the *D* and *R* vectors allowed the determination of the influence exerted (*D*) and the influence received (*R*) by each barrier. The results, presented in Table 10, include the total importance (*D*+*R*) and the net causal role (*D*–*R*) for each barrier. This classification distinguishes causal factors, which have a greater capacity to trigger systemic changes, from effect factors, which tend to react to external stimuli.

Table 10 – Cause and effect values for barriers

Barrier	D	R	D+R	D-R	Cause/ Effect	Overall Ranking
High Initial Costs (B1)	4.48	4.17	8.65	0.31	Cause	5
Regulatory Complexity (B2)	3.15	4.17	7.32	-1.02	Effect	8
Hazardous Waste Management Challenges (B3)	5.21	4.78	9.99	0.42	Cause	1
Difficulty in Measuring Impacts (B4)	4.61	4.03	8.64	0.58	Cause	6
Lack of Knowledge and Training (B5)	4.41	4.69	9.09	-0.28	Effect	2
Lack of Technological Infrastructure (B6)	4.13	4.54	8.67	-0.41	Effect	4
Supply Chain Limitations (B7)	4.29	3.84	8.13	0.45	Cause	7
Cultural and Organizational Resistance (B8)	4.34	4.39	8.73	-0.06	Effect	3

Source: research data (2025).

The determination of the threshold value was based on the mean (0.5407) and standard deviation (0.0861) of the normalized influence values, resulting in a cut-off point of 0.6269. Connections above this threshold are considered highly significant to the systemic dynamics of the barriers. The analysis of Table 10 indicates that relationships surpassing this value involve recurrently critical elements, such as regulatory gaps, insufficient budget allocation, and lack of stakeholder engagement, which consistently demonstrate high connectivity in the network.

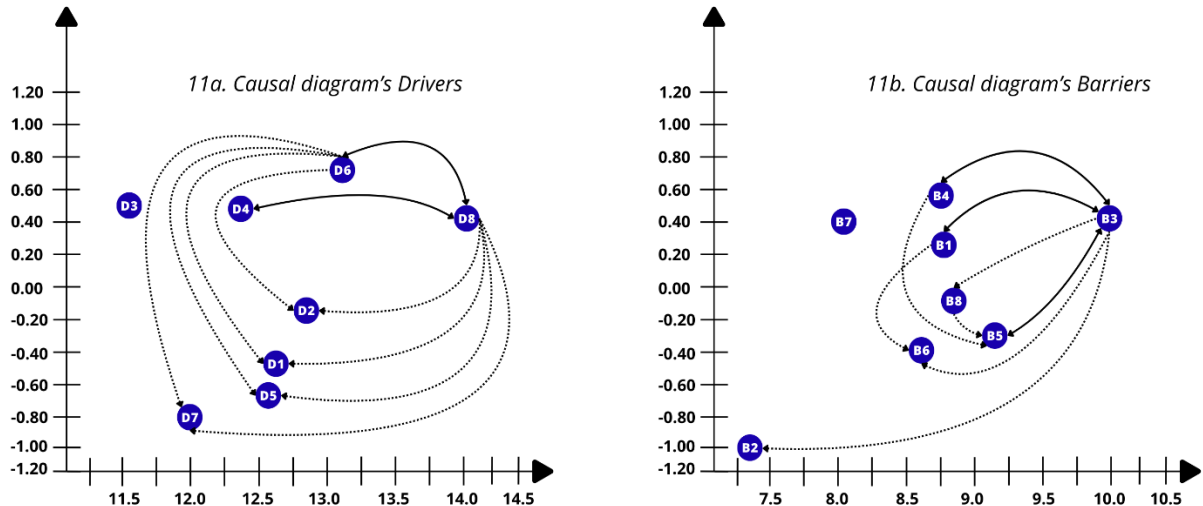
The application of the DEMATEL method provided robust evidence on systemic interrelationships among drivers and barriers. Among the drivers, Alignment with SDGs and Public Policies (D8), Technological Innovation (D6), and Collaboration and Partnerships (D2) emerged with the highest total importance values (D+R), confirming their central role in CEH dynamics. The net causal analysis (D–R) identified Technological Innovation (D6), Market and Societal Demands (D3), Resource Efficiency (D4), and Alignment with SDGs and Public Policies (D8) as causal factors capable of triggering systemic change. In contrast, drivers such as Regulatory Pressure (D1), Collaboration and Partnerships (D2), Economic and Financial Incentives (D5), and Circular Economy Practices in the Hospital Sector (D7) were positioned as effect factors, dependent on the activation of other elements. This classification is instrumental for decision-making, as it pinpoints the levers most likely to generate multiplier effects in the system.

On the barrier side, the analysis revealed that Lack of Infrastructure (B3), Institutional Resistance (B4), and High Initial Costs (B5) are among the most influential constraints, exerting substantial systemic pressure. The threshold analysis further highlighted the most critical

interconnections, offering clear priorities for targeted interventions. These results underscore that overcoming structural and organizational constraints is as critical as leveraging enabling factors.

The causal diagram of barriers (Figure 11b) reveals that regulatory complexity (B4) and infrastructure limitations (B1) are the most influential barriers, shaping the entire network of constraints. Their causal role suggests that regulatory bottlenecks and structural inadequacies create ripple effects that intensify other challenges, such as the high initial costs of technology adoption and organizational resistance. In contrast, lack of standardized indicators (B5) and difficulties in hazardous waste management (B6) appear as dependent barriers, whose persistence derives largely from weaknesses in regulation and infrastructure.

Figure 11 – Causal diagram of barriers and drivers to CE implementation in hospitals



Legend: 11a - causal diagram's drivers based on DEMATEL method; 11b - causal diagram's barriers based on DEMATEL method.

Source: research data (2025).

These results converge with prior studies that emphasize the decisive role of regulatory clarity and resource availability for advancing sustainability in healthcare (Govindan et al., 2024; Bai; Orzes; Sarkis, 2022). At the same time, the high weight of institutional resistance (B3) diverges from findings in contexts of high-income countries, where cultural and managerial barriers are often secondary compared to financial or technological issues (Beltrami et al., 2021). This divergence indicates that, in middle-income systems such as Brazil's, organizational culture and governance traditions can significantly hinder the transition toward circularity.

By distinguishing between causal and dependent barriers, the DEMATEL method provides a strategic map for intervention. Addressing causal barriers such as High Initial Costs

(B1) and Difficulty in Measuring Impacts (B4) is essential, since they represent leverage points capable of unlocking progress across the network. Conversely, dependent barriers like Lack of Knowledge and Training (B5) and Lack of Technological Infrastructure (B6) demand monitoring but will only be effectively reduced when upstream issues are mitigated. This layered view reinforces that solutions cannot be generic: they must consider systemic interdependencies and prioritize reforms that attack root causes rather than symptoms.

Finally, the outputs of this causal analysis serve as critical inputs for subsequent research and policymaking. They clarify where structural reforms and targeted investments are most urgent, while highlighting the enabling conditions required for dependent barriers to be resolved. This ensures alignment between strategic planning and practical implementation, strengthening the evidence base for frameworks and roadmaps that aim to advance CE practices in hospitals.

3.4 Theoretical, practical and managerial implications

This research strengthens the theoretical foundations of the CEH by integrating DEMATEL-based causal analysis with a structured categorization of 51 drivers and 55 barriers into eight strategic dimensions. The results advance the conceptual understanding of CE in healthcare, moving beyond the direct transposition of industrial models to a sector-specific transformation shaped by regulatory stringency, patient safety imperatives, and intricate supply chains. The identification of causal and effect factors, supported by quantitative threshold analysis, offers a replicable analytical framework that can inform comparative studies and cross-national benchmarking.

From a practical standpoint, the study highlights that leveraging key causal drivers, such as Technological Innovation (D6), Market and Societal Demands (D3), Resource Efficiency (D4), and Alignment with SDGs and Public Policies (D8), can activate systemic changes capable of accelerating CEH adoption. Simultaneously, overcoming high-impact barriers, including Institutional Resistance (B2) and Lack of Infrastructure (B5), is essential to prevent bottlenecks that compromise circular initiatives. The causal diagrams derived from the DEMATEL analysis provide actionable guidance for prioritizing interventions that yield the highest systemic impact.

Managerially, the findings equip hospital administrators and policymakers with a decision-support tool for aligning CEH strategies with broader sustainability objectives. The integration of enabling technologies emerges as a catalyst for tracking, optimizing, and scaling

circular practices. Moreover, reinforcing cross-sector collaboration, capacity-building programs, and transparent governance mechanisms is vital for sustaining progress.

Finally, the findings of this study demonstrate that overcoming structural, regulatory, and cultural barriers while strengthening key drivers such as innovation, governance, and interinstitutional collaboration directly contributes to several Sustainable Development Goals. These include improving health and well-being (SDG 3), enhancing education and technical training for circular practices (SDG 4), fostering innovation and resilient infrastructure (SDG 9), promoting responsible consumption and production within hospitals (SDG 12), supporting climate action through waste reduction and resource efficiency (SDG 13), reinforcing institutional governance and transparency (SDG 16), and fostering partnerships for implementation (SDG 17). Altogether, these contributions advance the social, environmental, and institutional dimensions of sustainability, positioning circular economy adoption in healthcare as a strategic path toward safer, more efficient, and equitable hospital systems aligned with the principles of the 2030 Agenda.

4 Conclusion

The findings of this study reaffirm the growing relevance of CE strategies in the hospital sector as a response to the urgent need for sustainable, resilient, and efficient healthcare systems. By proposing a comprehensive definition of CEH and mapping 51 drivers and 55 barriers across eight analytical categories, this research addresses a clear gap in the literature and consolidates a structured framework that can guide both academic inquiry and practical implementation.

From a theoretical perspective, this work advances the conceptualization of CEH as a systemic transformation, adapted to the regulatory, operational, and cultural complexities of healthcare, rather than a mere transposition of industrial CE models. The integration of 51 drivers and 55 barriers into a replicable analytical structure enables comparative studies and cross-country benchmarking, enriching the academic debate and setting a foundation for future quantitative validation.

From a practical and managerial standpoint, the results provide hospital leaders with a clear set of priorities. Interventions should focus on activating high-leverage drivers, particularly technological innovation, policy alignment, and resource efficiency, while simultaneously mitigating the most constraining barriers through investments in infrastructure, staff training, and institutional change management. For policymakers, the findings point to the

need for coherent regulatory frameworks, fiscal incentives, and integrated urban policies that reinforce CE adoption in healthcare.

Ultimately, CEH emerges as a catalyst for sustainable urban systems, capable of reducing waste generation, improving resource utilization, and supporting climate and public health objectives. By combining the structural mapping of drivers and barriers with causal-effect analysis, this study delivers an actionable knowledge base for both strategic planning and policy formulation, accelerating the transition toward more circular, resilient, and sustainable healthcare systems.

Future research should expand on these findings by evaluating the economic, environmental, and social impacts of CEH initiatives through longitudinal case studies and advanced modeling. Moreover, exploring the enabling role of digital technologies such as AI, IoT, and blockchain can reveal additional pathways to enhance system connectivity, transparency, and efficiency. Comparative analyses across diverse healthcare systems will be essential to scaling successful strategies and fostering a truly global transition toward Circular Economy in healthcare.

References

- Alfina, K. N., Chandima Ratnayake, R. M., Wibisono, D., Basri, M. H., & Mulyono, N. B. (2022). Analyzing Barriers Towards Implementing Circular Economy in Healthcare Supply Chains. 2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2022-Decem(1), 827–831. <https://doi.org/10.1109/IEEM55944.2022.9989999>
- Alhawari, O., Awan, U., Bhutta, M. K. S., & Ülkü, M. A. (2021). Insights from Circular Economy Literature: A Review of Extant Definitions and Unravelling Paths to Future Research. *Sustainability*, 13(2), 859. <https://doi.org/10.3390/su13020859>
- Ali, I., & Kannan, D. (2022). Mapping research on healthcare operations and supply chain management: a topic modelling-based literature review. *Annals of Operations Research*, 315(1), 29–55. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04596-5>
- Ali, M., & Geng, Y. (2018). Accounting embodied economic potential of healthcare waste recycling—a case study from Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(678), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7063-y>
- Alighardashi, M., Moein, H., Dehghanpour, S., Mousavi, S. A., Almasi, A., & Mohammadi, P. (2024). Environmental assessment of hospital waste management practices: A study of hospitals in Kermanshah, Iran. *Results in Engineering*, 23(102658), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102658>
- Benzidia, S., Makaoui, N., & Bentahar, O. (2021). The impact of big data analytics and artificial intelligence on green supply chain process integration and hospital environmental performance. *Technological Forecasting and Social Change*, 165(120557), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120557>
- Bai, C., Orzes, G., & Sarkis, J. (2022). Exploring the impact of Industry 4.0 technologies on social sustainability through a circular economy approach. *Industrial Marketing Management*, 101(1), 176–190. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2021.12.004>
- Beltrami, M., Orzes, G., Sarkis, J., & Sartor, M. (2021). Industry 4.0 and sustainability: Towards conceptualization and theory. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127733. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127733>
- Bevere, D., & Faccilongo, N. (2024). Shaping the Future of Healthcare: Integrating Ecology and Digital

- Innovation. Sustainability, 16(9), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su16093835> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) WE - Social Science Citation Index (SSCI)
- Chauhan, A., Jakhar, S. K., & Chauhan, C. (2021). The interplay of circular economy with industry 4.0 enabled smart city drivers of healthcare waste disposal. *Journal of Cleaner Production*, 279(123854), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123854>
- Chew, X., Khaw, K. W., Alnoor, A., Ferasso, M., Al Halbusi, H., & Muhsen, Y. R. (2023). Circular economy of medical waste: novel intelligent medical waste management framework based on extension linear Diophantine fuzzy FDOSM and neural network approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(21), 60473–60499. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26677-z>
- Cosenza, J. P., Andrade, E. M. de, & Assunção, G. M. de. (2020). Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 9(1), e16147. <https://doi.org/10.5585/geas.v9i1.16147>
- Daú, G., Scavarda, A., Scavarda, L. F., & Portugal, V. J. T. (2019). The Healthcare Sustainable Supply Chain 4.0: The Circular Economy Transition Conceptual Framework with the Corporate Social Responsibility Mirror. *Sustainability*, 11(12), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su11123259>
- Dihan, M. R., Abu Nayeem, S. M., Roy, H., Islam, M. S., Islam, A., Alsukaibi, A. K. D., & Awual, M. R. (2023). Healthcare waste in Bangladesh: Current status, the impact of Covid-19 and sustainable management with life cycle and circular economy framework. *Science of The Total Environment*, 871(162083), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162083>
- Dixit, A., & Dutta, P. (2024). Critical success factors for the adoption of circular economy in sustainable healthcare waste management. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26(7), 2181–2201. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02712-y>
- EMF. (2024). Circular Economy Introduction. Ellen MacArthur Foundation. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>
- European Commission. (2018). A European Strategy for Plastics. European Commission, 1(July), 24. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b02368>
- Ghoushchi, S. J., Ghiaci, A. M., Bonab, S. R., & Ranjbarzadeh, R. (2022). Barriers to circular economy implementation in designing of sustainable medical waste management systems using a new extended decision-making and FMEA models. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(53), 79735–79753. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19018-z>
- Gomes, F. B. M., Khan, A. S., Alves, C. L. B., & Rodrigues, A. da S. (2024). Vigilância em saúde ambiental e o desempenho das políticas de acesso à água potável: um estudo de caso no município de Sobral – Ceará. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 13(1), 1–45. <https://doi.org/10.5585/2024.23992>
- González-Arias, J., Forero-Franco, R., Mandviwala, C., & Seemann, M. (2024). Steam gasification as a viable solution for converting single-use medical items into chemical building blocks with high yields for the plastic industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 201(107342), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107342>
- Govindan, K., Demartini, M., Formentini, M., Taticchi, P., & Tonelli, F. (2024). Unravelling and mapping the theoretical foundations of sustainable supply chains: A literature review and research agenda. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 189(July 2023), 103685. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103685>
- Govindan, K., & Hasanagic, M. (2018). A systematic review on drivers, barriers, and practices towards circular economy: a supply chain perspective. *International Journal of Production Research*, 56(1–2), 278–311. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1402141>
- Guzzo, D., Carvalho, M. M., Balkenende, R., & Mascarenhas, J. (2020). Circular business models in the medical device industry: paths towards sustainable healthcare. *Resources, Conservation and Recycling*, 160(104904), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104904>
- Harris, P., & McCabe, B. K. (2024). Technical evaluation of steam sterilisation coupled with gasification to improve circularity of Australian hospital waste management: A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 207(107680), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107680>
- Hospodková, P., Rogalewicz, V., & Králíčková, M. (2023). Gynecological Speculums in the Context of the Circular Economy. *Economies*, 11(70), 1–11. <https://doi.org/10.3390/economies11020070>

- Hoveling, T., Svindland Nijdam, A., Monincx, M., Faludi, J., & Bakker, C. (2024). Circular economy for medical devices: Barriers, opportunities and best practices from a design perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 208(107719), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107719>
- Ishaq, S., Hoang, T. G., Tanveer, U., Hoang, T.-H., & Truong, H. Q. (2024). Transformative capabilities of MedTech organizations in driving circularity in the healthcare industry: Insights from multiple cases. *Journal of Cleaner Production*, 446(141370), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141370>
- Kalaria, C., Singh, S., & Prajapati, B. G. (2023). Intelligent healthcare supply chain. In *Human Machine Interface: Making Healthcare Digital* (pp. 449–481). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781394200344.ch17>
- Kandasamy, J., Kinare, Y. P., Pawar, M. T., Majumdar, A., K.E.K., V., & Agrawal, R. (2022). Circular economy adoption challenges in medical waste management for sustainable development: An empirical study. *Sustainable Development*, 30(5), 958–975. <https://doi.org/10.1002/sd.2293>
- Kane, G. M., Bakker, C. A., & Balkenende, A. R. (2018). Towards design strategies for circular medical products. *Resources, Conservation and Recycling*, 135(June 2017), 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.030>
- Karliner, J., Slotterback, S., Boyd, R., Ashby, B., Steele, K., & Wang, J. (2020). Health care's climate footprint: the health sector contribution and opportunities for action. *European Journal of Public Health*, 30(Supplement_5), 1–15. <https://doi.org/10.1093/eurpub/ckaa165.843>
- Kazançoğlu, Y., Sagnak, M., Lafci, Ç., Luthra, S., Kumar, A., & Taçoğlu, C. (2021). Big Data-Enabled Solutions Framework to Overcoming the Barriers to Circular Economy Initiatives in Healthcare Sector. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(14), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ijerph18147513> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) WE - Social Science Citation Index (SSCI)
- Kazançoğlu, Y., Sağnak, M., Lafci, Ç., Luthra, S., Kumar, A., & Taçoğlu, C. (2021). Big Data-Enabled Solutions Framework to Overcoming the Barriers to Circular Economy Initiatives in Healthcare Sector. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(7513), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ijerph18147513>
- Kheirabadi, S., & Sheikhi, A. (2022). Recent advances and challenges in recycling and reusing biomedical materials. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 38(100695), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100695>
- Korhonen, J., Honkasalo, A., & Seppälä, J. (2018). Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 143(1), 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>
- Kumar, A., Mangla, S. K., & Kumar, P. (2024). Barriers for adoption of Industry 4.0 in sustainable food supply chain: a circular economy perspective. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 73(2), 385–411. <https://doi.org/10.1108/IJPPM-12-2020-0695>
- Kumar, A., & Rahman, S. (2014). RFID-enabled process reengineering of closed-loop supply chains in the healthcare industry of Singapore. *Journal of Cleaner Production*, 85(1), 382–394. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.037>
- Leissner, S., & Ryan-Fogarty, Y. (2019). Challenges and opportunities for reduction of single use plastics in healthcare: A case study of single use infant formula bottles in two Irish maternity hospitals. *Resources, Conservation and Recycling*, 151(104462), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104462>
- Leppälä, K., Vornanen, L., & Savinen, O. (2023). Lifecycle extension of single-use medical device sensors: Case study of an engineering sustainability transition program. *Journal of Cleaner Production*, 423(138518), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138518>
- Liotine, M. (2019). Shaping the Next Generation Pharmaceutical Supply Chain Control Tower with Autonomous Intelligence. *Journal of Autonomous Intelligence*, 2(1), 56. <https://doi.org/10.32629/jai.v2i1.34>
- Liu, L., Song, W., & Liu, Y. (2023). Leveraging digital capabilities toward a circular economy: Reinforcing sustainable supply chain management with Industry 4.0 technologies. *Computers & Industrial Engineering*, 178(109113), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109113>
- MacNeill, A. J., Hopf, H., Khanuja, A., Alizamir, S., Bilec, M., Eckelman, M. J., Hernandez, L., McGain, F., Simonsen, K., Thiel, C., Young, S., Lagasse, R., & Sherman, J. D. (2020). Transforming The Medical Device Industry: Road Map To A Circular Economy. *Health Affairs*, 39(12), 2088–2097. <https://doi.org/10.1377/hlthaff.2020.01118>

- Mahjoob, A., Alfadhli, Y., & Omachonu, V. (2023). Healthcare Waste and Sustainability: Implications for a Circular Economy. *Sustainability*, 15(7788), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su15107788>
- Michałowska, J., Pytka, J., Tofil, A., Krupski, P., & Puzio, Ł. (2021). Assessment of Training Aircraft Crew Exposure to Electromagnetic Fields Caused by Radio Navigation Devices. *Energies*, 14(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/en14010254>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. *BMJ*, 339(jul21 1), b2535–b2535. <https://doi.org/10.1136/bmj.b2535>
- Narang, S., & Vij, D. (2021). The COVID-19 Pandemic: An analytical study on opportunities for circular economy practices in India's healthcare sector. *Asia Pacific Journal of Health Management*, 16(4), 236–242. <https://doi.org/10.24083/apjhm.v16i4.1305>
- Oliveira, K. B. de, & Oliveira, O. J. de. (2022). Making Hospitals Sustainable: Towards Greener, Fairer and More Prosperous Services. *Sustainability*, 14(9730), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su14159730>
- Ranjbari, M., Shams Esfandabadi, Z., Shevchenko, T., Chassagnon-Haned, N., Peng, W., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2022). Mapping healthcare waste management research: Past evolution, current challenges, and future perspectives towards a circular economy transition. *Journal of Hazardous Materials*, 422(126724), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126724>
- Silva, F. C., Shibao, F. Y., Kruglianskas, I., Barbieri, J. C., & Sinisgalli, P. A. A. (2019). Circular economy: analysis of the implementation of practices in the Brazilian network. *Revista de Gestao*, 26(1), 39–60. <https://doi.org/10.1108/REGE-03-2018-0044>
- Sinha, S. (2023). Supply chain visibility: The real-time necessity. In *Digital Supply Chain, Disruptive Environments, and the Impact on Retailers* (pp. 193–209). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-7298-9.ch011>
- Souza, N. L. S. de, Bouzon, M., Fettermann, D. D. C., & Frazzon, E. M. (2025). A DEMATEL-based analysis of logistics determinants in online retail. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 22(2), 1–19. <https://doi.org/10.14488BJOPM.2345.2025>
- Suthagar, K. S., & Mishra, U. (2024). Sustainable green circular economic model with controllable waste and emission in healthcare system. *Environment, Development and Sustainability*, 1(1), 1–43. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04254-1>
- Tseng, M.-L., Ha, H. M., Wu, K.-J., & Xue, B. (2022). Healthcare industry circular supply chain collaboration in Vietnam: vision and learning influences on connection in a circular supply chain and circularity business model. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 25(4–5), 743–768. <https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1923671>
- Ullah, F., Olatunji, O., & Qayyum, S. (2024). A scoping review of green Internet of Things in construction and smart cities: current applications, adoption strategies and future directions. *Smart and Sustainable Built Environment*. <https://doi.org/10.1108/SASBE-11-2023-0349>
- Viani, C., Vaccari, M., & Tudor, T. (2016). Recovering value from used medical instruments: A case study of laryngoscopes in England and Italy. *Resources, Conservation and Recycling*, 111(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.025>
- Vishwakarma, A., Dangayach, G. S., Meena, M. L., Gupta, S., Joshi, D., & Jagtap, S. (2024). Can circular healthcare economy be achieved through implementation of sustainable healthcare supply chain practices? Empirical evidence from Indian healthcare sector. *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, 17(2), 230–246. <https://doi.org/10.1108/JGOSS-07-2022-0084>
- WHO. (2024). Health-care waste. October 24, 2024. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/health-care-waste>
- Williams, E., Piaggio, D., Andellini, M., & Pecchia, L. (2022). 3D-printed activated charcoal inlet filters for oxygen concentrators: A circular economy approach. *Development Engineering*, 7(100094), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2022.100094>
- Wu, C., Liu, J., & Zhang, H. (2021). Data Ecology and Accurate Portrait: Optimization of Credit Risk System for SMEs in Supply Chain Finance Based on Big Data Technology. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 11(4), 163–175. <https://doi.org/10.54560/jracr.v11i4.310>
- Yazdi, M., Khan, F., Abbassi, R., & Rusli, R. (2020). Improved DEMATEL methodology for effective safety

management decision-making. Safety Science, 127(1), 104705.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104705>

Zechel, M., Zechel, S., Schubert, U. S., & Ruckdäschel, H. (2024). Circularity of Polymers Used in Hospitals: Current Status, Challenges, and Future Solutions. *Advanced Sustainable Systems*, 2400050(1), 1–17.
<https://doi.org/10.1002/adsu.202400050>

Supplementary Material

Table a – Drivers and Barriers to CEH Research Protocol

<i>Research question</i>	<i>What are the main drivers and barriers that influence hospital managers in their decisions to transform their management to participate in the circular economy?</i>		
<i>Acronym</i>	P – Population	C – Concept	Co - Context
<i>Thematic Axis</i>	Main drivers and barriers that influence hospital managers	Circular Economy	Hospital Management
<i>Keywords</i>	Circular Economy, Circular Model, Circular Business, Circular Supply Chain, Closed loop, Circularity	Drivers, practices, barriers, challenges, enablers	hospital*, healthcare, health system, medical services, hospital supply chain, healthcare supply chain
<i>Search command on Scopus and Web of Science</i>	("Circular Economy" OR "Circular Model" OR "Circular Business" OR "Circular Supply Chain" OR "Closed loop" OR Circularity) AND (Drivers OR practices OR barriers OR challenges OR enablers) AND (hospital* OR healthcare OR "health system" OR "medical services" OR "hospital supply chain" OR "healthcare supply chain") AND NOT (hotel OR hospitality)		
<i>Search command on PubMed</i>	(("Circular Economy"[Title/Abstract] OR "Circular Model"[Title/Abstract] OR "Circular Business"[Title/Abstract] OR "Circular Supply Chain"[Title/Abstract] OR "Closed Loop"[Title/Abstract] OR Circularity[Title/Abstract] OR "Circular Practices"[Title/Abstract] OR "Circular Strategies"[Title/Abstract] OR "Circular Healthcare"[Title/Abstract])) AND ((Drivers[Title/Abstract] OR "Success Factors"[Title/Abstract] OR "Implementation Factors"[Title/Abstract] OR Barriers[Title/Abstract] OR Obstacles[Title/Abstract] OR Challenges[Title/Abstract] OR "Challenges to Implementation"[Title/Abstract] OR Enablers[Title/Abstract] OR Practices[Title/Abstract])) AND ((Hospital*[Title/Abstract] OR "Hospital Management"[Title/Abstract] OR Healthcare[Title/Abstract] OR "Healthcare Facilities"[Title/Abstract] OR "Medical Services"[Title/Abstract] OR "Hospital Supply Chain"[Title/Abstract] OR "Healthcare Supply Chain"[Title/Abstract] OR "Medical Waste Management"[Title/Abstract])) NOT (Hotel[Title/Abstract] OR Hospitality[Title/Abstract])		

Source: By the authors (2025).

Table b – Categories and Drivers for the Implementation of Circular Economy in Hospitals

Category	Description	Driver	Source
D1. Alignment with SDGs and Public Policies	Integration of circular practices with the SDGs of the 2030 Agenda, promoting sustainability and the achievement of global targets.	1. Active participation of government and stakeholders in promoting the circular economy	(Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021c; Dixit; Dutta, 2024; Viani; Vaccari; Tudor, 2016; Vishwakarma et al., 2024)
		2. Development of waste management systems in developing countries	(Ali; Geng, 2018; Dihan et al., 2023)
D2. Collaboration and Partnerships	Establishing strategic partnerships among hospitals, suppliers, and other stakeholders to share knowledge, resources, and technologies that facilitate the implementation of the circular economy.	3. Collaboration in reverse logistics and circularity policies	(Suthagar; Mishra, 2024b; Tseng et al., 2022)
		4. Promotion of circular vision and learning within organizations	(Tseng et al., 2022)
		5. Global standardization of materials to improve recycling efficiency	(Alighardashi et al., 2024; Leissner; Ryan-Fogarty, 2019)
		6. Collaborative efforts between healthcare and waste management sectors	(Kandasamy et al., 2022; Suthagar; Mishra, 2024b)
		7. Implementation of labeling and extended producer responsibility	(Dixit; Dutta, 2024; Leissner; Ryan-Fogarty, 2019)
		8. Partnerships between technology companies and hospitals for circular practices	(Dihan Et Al., 2023)
		9. Stakeholder engagement in promoting hospital sustainability	(Oliveira; Oliveira, 2022; Viani; Vaccari; Tudor, 2016)
D3. Market and Societal Demands	Growing demand from patients, consumers, and society for more sustainable and responsible practices, influencing the adoption of the circular economy.	Lack of consumer interest in environmental practices	(Macneill Et Al., 2020; Mahjoob; Alfadhli; Omachonu, 2023)
D4. Resource Efficiency	Reduction in the consumption of natural resources and increased efficiency in the use of materials and energy, promoting more sustainable management.	Efficient management of hospital waste to prevent environmental harm	(Dihan Et Al., 2023; Dixit; Dutta, 2024)
		Identification and implementation of appropriate waste disposal techniques	(Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021c; Mahjoob; Alfadhli; Omachonu, 2023)
		Need for sustainable systems for medical waste management	(Dixit; Dutta, 2024; Leissner; Ryan-Fogarty, 2019)
		Development of sustainable polymers for the healthcare sector	(Zechel Et Al., 2024)
		Use of steam gasification as a method for treating hospital waste	(González-Arias Et Al., 2024; Harris; McCabe, 2024)

		Recovery of chemical components from medical waste for industry	(Chew Et Al., 2023; Mahjoob; Alfadhli; Omachonu, 2023)
		Minimization of hospital waste through sustainable policies	(Chew Et Al., 2023; Ghoushchi Et Al., 2022; Mahjoob; Alfadhli; Omachonu, 2023)
		Technical assessment of methods such as steam sterilization to reduce waste	(Harris; McCabe, 2024)
		Improvement of hazardous waste management through new technologies	(Alfina Et Al., 2022; Alighardashi Et Al., 2024; Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021c; Kheirabadi; Sheikhi, 2022)
		Use of advanced techniques to enhance hospital waste management	(Chew Et Al., 2023; Kane; Bakker; Balkenende, 2018)
		Development of solutions for the sustainable management of polymers in hospitals	(Leissner; Ryan-Fogarty, 2019; Oliveira; Oliveira, 2022; Zechel Et Al., 2024)
		Establishment of self-sufficient and sustainable supply chains	(Williams Et Al., 2022)
D5. Economic and Financial Incentives	Availability of financial incentives, such as carbon credits, subsidies, and green financing, which facilitate the transition to circular models.	Innovation in business models to support the circular economy	(Vishwakarma Et Al., 2024)
		Implementation of return practices and producer responsibility	(Leissner; Ryan-Fogarty, 2019)
D6. Technological Innovation	Application of Industry 4.0 technologies, such as IoT, big data, and artificial intelligence, to optimize resource management, reduce waste, and increase operational efficiency.	Integration of Industry 4.0 technologies to promote sustainable practices	(Benzidia; Makaoui; Bentahar, 2021; Daú Et Al., 2019b; Liu; Song; Liu, 2023b)
		Use of technologies such as IoT and renewable energy to increase efficiency	(Liu; Song; Liu, 2023b)
		Use of drones and AI for fast delivery and carbon emission reduction	(Suthagar; Mishra, 2024b)
		CAB 2 IN digital structure to integrate technologies in supply chain management	(Liu; Song; Liu, 2023b)
		Reengineering of hospital processes using RFID for greater efficiency	(Kumar; Rahman, 2014)
		Application of Big Data, AI, and Blockchain to optimize the supply chain	(Liu; Song; Liu, 2023b)
		Use of cloud services and AI to improve traceability and efficiency	(Kumar; Rahman, 2014; Liu; Song; Liu, 2023b)
		Increased operational efficiency through digital technologies	(Liu; Song; Liu, 2023b)
		Use of frugal engineering and 3D printing to support circular practices	(Williams Et Al., 2022)
D7. Regulatory	Adoption of regulations that encourage or mandate the	Need for specific legislation for circular economy in healthcare	(Mahjoob; Alfadhli; Omachonu, 2023)
		Lack of a business model oriented toward the circular economy	(Guzzo Et Al., 2020; Mahjoob; Alfadhli;

Pressure	implementation of circular practices, such as standards for hospital waste management and sustainable public procurement.		Omachonu, 2023; Vishwakarma Et Al., 2024)
D8. Circular Economy Practices in the Hospital Sector	Implementation of strategies that promote resource efficiency, waste reduction, reuse, recycling, and sustainable procurement within hospital operations, aligned with circular economy principles.	Redesign of processes to optimize resource use and minimize extraction	(Williams Et Al., 2022)
		Design of circular inventory systems to reduce waste	(Suthagar; Mishra, 2024b)
		Implementation of recycling and source segregation for resource conservation	(Ali; Geng, 2018)
		Promotion of reuse, recycling, and remanufacturing of medical devices	(Hoveling Et Al., 2024; Kane; Bakker; Balkenende, 2018)
		Focus on extending the lifecycle of hospital products to reduce waste	(Leppälä; Vornanen; Savinen, 2023)
		Application of circular design in medical devices to promote sustainability	(Hoveling Et Al., 2024; Williams Et Al., 2022; Zechel Et Al., 2024)
		Redesign of medical products to facilitate recycling	(Williams Et Al., 2022)
		Integrated approach to managing hazardous medical waste generated	(Alfina Et Al., 2022; Alighardashi Et Al., 2024; Dihan Et Al., 2023; Ranjbari Et Al., 2022)
		Focus on extending the lifecycle of medical devices to maximize their use	(Leppälä; Vornanen; Savinen, 2023)
		Implementation of smart systems for hospital waste disposal	(Chew Et Al., 2023)
		Improved traceability and efficiency using RFID in hospital processes	(Kumar; Rahman, 2014)
		Establishment of self-sustaining supply chains for medical devices	(Daú Et Al., 2019b; Hoveling Et Al., 2024)
		Adoption of circular economy principles in hospital waste management	(González-Arias Et Al., 2024; Leissner; Ryan-Fogarty, 2019)
		Redesign of medical devices to maximize product lifespan	(Hospodková; Rogalewicz; Králíčková, 2023; Williams Et Al., 2022)
		Incorporation of circular practices into medical device design	(Hoveling Et Al., 2024; Kane; Bakker; Balkenende, 2018)
		Creation of circular inventory systems to reduce emissions	(Zechel Et Al., 2024)

Source: research data (2025).

Table c – Categories and Barriers to the Implementation of Circular Economy in Hospitals

Category	Description	Barrier	Source
B1. High Initial Costs	Significant upfront investments required for the implementation of circular practices and technologies.	High cost of circular technologies and implementations	(Kazançoğlu Et Al., 2021)
		Lack of financial resources and capacities for environmental investments	(Kazançoğlu Et Al., 2021)
		Challenges in identifying the economic benefits of environmental investments	(Harris; McCabe, 2024; Kazançoğlu Et Al., 2021; Narang; Vij, 2021)
		Financial barriers to adapting legacy product lines to sustainability goals	(Leppälä; Vornanen; Savinen, 2023)
B2. Regulatory Complexity	Complex and diverse regulations that hinder compliance with environmental and healthcare standards.	Absence of government legislation on circular economy health policies	(Mahjoob; Alfadhli; Omachonu, 2023; Ranjbari Et Al., 2022)
		Lack of basic sustainability practices, incentives, and policies	(Ali; Geng, 2018; Daú Et Al., 2019b; Dixit; Dutta, 2024; Kazançoğlu Et Al., 2021; Mahjoob; Alfadhli; Omachonu, 2023; Williams Et Al., 2022)
		Lack of research and development to reinforce sustainability practices and create/update new legislation	(Dihan Et Al., 2023; Kumar; Rahman, 2014; Liu; Song; Liu, 2023b; Mahjoob; Alfadhli; Omachonu, 2023; Zechel Et Al., 2024)
		Absence of standards for existing circular economy practices	(Alighardashi Et Al., 2024; Mahjoob; Alfadhli; Omachonu, 2023; Ranjbari Et Al., 2022)
		Need for a shift in framing and problem-solving approaches in supply chain collaboration	(Tseng Et Al., 2022)
		Strict regulatory compliance requirements imposed by high-income countries	(Leppälä; Vornanen; Savinen, 2023)
B3. Challenges in Hazardous Waste Management	Specific challenges in managing hazardous hospital waste, which require specialized and regulated processes.	Infectious waste complicating polymer recycling in hospitals	(Zechel Et Al., 2024)
		Practical challenges related to waste collection and separation logistics	(Hoveling Et Al., 2024)
		Preference for disposable medical devices and difficulties in creating reusable alternatives	(Hospodková; Rogalewicz; Králíčková, 2023)
		Lack of comprehensive rules for redefining waste types	(Alighardashi Et Al., 2024)
		Deficiencies in environmental management and lack of commitment to environmental policy standards	(Alighardashi Et Al., 2024)
B4. Difficulty in Measuring Impacts	Challenges in quantifying and assessing the benefits	Absence of regulations on green procurement and renewable energy	(Alighardashi Et Al., 2024)
		Limited generalizability of findings due to small sample sizes	(Ishaq Et Al., 2024)

	and impacts of circular economy practices, limiting data-driven decision-making.	Contextual specificity of studies restricting result applicability	(Ishaq Et Al., 2024)
		Lack of data on atmospheric emissions from hospital waste management	(Alighardashi Et Al., 2024)
B5. Lack of Knowledge and Training	Limited awareness of circular practices and absence of continuous training programs for healthcare professionals.	Lack of knowledge about circular practices	(Hoveling Et Al., 2024; Ranjbari Et Al., 2022)
		Absence of training programs	(Hoveling Et Al., 2024)
		Limited awareness among physicians and patients about the benefits of reusable specula	(Hospodková; Rogalewicz; Králíčková, 2023)
		Lack of research on blockchain implementation in sustainable supply chain management	(Liu; Song; Liu, 2023b)
		Gap between scientific production and adaptation of effective waste management strategies	(Ranjbari Et Al., 2022)
		Lack of government and media attention regarding medical waste management	(Dihan Et Al., 2023)
B6. Lack of Technological Infrastructure	Deficiency in advanced technologies, such as IoT and big data, which are essential for optimizing circular processes.	Insufficient infrastructure, inadequate regulatory frameworks, and financial incentives	(Ranjbari Et Al., 2022)
		Limited IT infrastructure and technologies in medical informatics	(Kazançoğlu Et Al., 2021)
		Inadequate information technologies in supply chain management	(Tseng Et Al., 2022)
		Lack of framework for adopting multi-IDT for sustainable supply chain management	(Liu; Song; Liu, 2023b)
		Absence of a comprehensive framework for the entire product lifecycle in supply management	(Leppälä; Vornanen; Savinen, 2023; Liu; Song; Liu, 2023b)
		Lack of traceability and communication among stakeholders in the supply chain	(Vishwakarma Et Al., 2024)
		Inadequate hospital waste management systems in low-income countries	(Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021c; Ranjbari Et Al., 2022)
		Inadequate structure of the recyclable materials trade, preventing value recovery	(Viani; Vaccari; Tudor, 2016)
		Lack of infrastructure for effective healthcare waste disposal	(Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021c; Ranjbari Et Al., 2022)
		Technological and budgetary limitations for implementing circular practices	(Ranjbari Et Al., 2022)
		Research gap on coordination among Industry 4.0 digital technologies	(Liu; Song; Liu, 2023b)
		Lack of a practical guide for IT adoption in supply chain management	(Liu; Song; Liu, 2023b)

		Lack of compatible infrastructure for waste disposal in low-income countries	(Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021c; Ranjbari Et Al., 2022)
		Lack of data and research on medical waste management	(Benzidia; Makaoui; Bentahar, 2021)
		Budgetary and technological constraints in developing countries	(Ranjbari Et Al., 2022)
B7. Supply Chain Limitations	Dependence on suppliers that do not adopt circular practices, creating obstacles to the implementation of a circular supply chain.	Lack of a shared vision for effective supply chain collaboration	(Benzidia; Makaoui; Bentahar, 2021; Tseng Et Al., 2022; Viani; Vaccari; Tudor, 2016)
		Inadequate IT competency in the supply chain context	(Tseng Et Al., 2022)
		Mixing different types of polymers in hospital waste, hindering recycling	(Zechel Et Al., 2024)
		Lack of a shared vision shift in the supply chain	(Tseng Et Al., 2022)
		Communication gap between procurement and waste management teams	(Viani; Vaccari; Tudor, 2016)
		Lack of interdepartmental collaboration in assessing costs and instrument disposal	(Harris; McCabe, 2024; Narang; Vij, 2021)
		Inadequate signage and labeling on medical plastic products in hospitals	(Leissner; Ryan-Fogarty, 2019)
		Mixing of polymers in hospital waste hindering recycling	(Zechel Et Al., 2024)
B8. Cultural and Organizational Resistance	Resistance from staff and managers to change, due to entrenched organizational culture and aversion to new management models.	Resistance from traditional business models and lack of awareness of circular economy benefits	(Ranjbari Et Al., 2022)
		Cultural and behavioral change needed to adopt sustainable practices and disruptive technologies	(Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021c; Daú Et Al., 2019b; Kumar; Rahman, 2014)
		Preference for disposable specula by physicians and patients without clear justification	(Hospodková; Rogalewicz; Králíčková, 2023)
		Resistance to change in the healthcare sector, especially regarding reprocessing single-use devices	(Narang; Vij, 2021)
		Inadequate trust in the reuse of medical devices by physicians and patients	(Kane; Bakker; Balkenende, 2018)
		Potential subjective bias from the researcher	(Ishaq Et Al., 2024)
		Challenges in transitioning legacy products to sustainable practices	(Leppälä; Vornanen; Savinen, 2023)

Source: research data (2025).

5 ARTIGO 3 - DIGITAL INNOVATIONS IN HEALTHCARE: HOW INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES ENABLE CIRCULARITY IN HOSPITALS

Artigo submetido ao *Production journal*

Eliana de Jesus Lopes, Leandra Silvestre da Silva Lima, Marina Bouzon

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

Abstract

Paper aims: This study proposes a Digital Transformation Framework to support Circular Economy (CE) practices in hospitals, aiming to reshape healthcare management toward greater sustainability by optimizing resource efficiency, waste management, and supply chain operations.

Originality: The study provides a novel contribution by integrating multiple digital technologies – such as IoT, Big Data, AI, Blockchain, and Cloud Computing – through a systematic review, highlighting their synergistic potential to advance circular practices beyond traditional waste management.

Research method: A systematic literature review was conducted following the PRISMA protocol to identify key Industry 4.0 technologies applied to circular hospital management. The results informed us of the development of the proposed framework.

Main findings: IoT, Big Data, AI, Blockchain, and Cloud Computing are fundamental for enabling automation, real-time monitoring, and data-driven decision-making. Technologies like 3D printing and collaborative robotics support localized production and reuse. However, barriers such as financial constraints, interoperability challenges, and regulatory adaptation limit widespread adoption.

Implications for theory and practice: The study contributes to the literature on digital transformation and CE in healthcare, offering actionable insights for hospital managers, policymakers, and technology providers, and guiding the strategic integration of digital solutions to foster sustainability and circularity in hospital operations.

Keywords: Circular Economy. Industry 4.0. Sustainable Hospital Management. Digital Transformation. Smart Healthcare Technologies.

1. Introduction

The healthcare sector is a major contributor to environmental degradation, accounting for 4.4% of global carbon emissions and generating vast amounts of non-recyclable and hazardous waste (Alighardashi et al., 2024). Hospitals, as resource-intensive institutions, generate up to 5.2 kg of waste per bed per day, with a significant portion being improperly managed, exacerbating pollution and public health risks (Ghali et al., 2023). Additionally,

healthcare facilities consume nearly 10% of total energy usage in some developed countries, further increasing their environmental footprint (Grignaffini et al., 2023).

The growing demand for sustainable healthcare practices has intensified the search for alternatives that can reduce waste generation, optimize resource use, and improve operational efficiency (Govindan; Hasanagic, 2018). The Circular Economy in Hospitals (CEH) has emerged as a strategic framework to transition healthcare systems toward more sustainable, resilient, and resource-efficient operations (Drei; Ignácio, 2024; Liu; Song; Liu, 2023b). However, implementing circularity in complex hospital environments remains a significant challenge due to regulatory, technological, and financial constraints.

Despite their potential, implementing circular practices in hospitals remains a complex challenge. Regulatory constraints, technological limitations, financial burdens, and lack of infrastructure hinder the adoption of circular strategies in waste management, supply chain optimization, and material reuse (Hoveling et al., 2024; Lopes et al., 2024; Vishwakarma et al., 2024). Additionally, many hospitals still rely on linear supply chains, making it difficult to close material loops and achieve sustainability goals (Dixit; Dutta, 2024). The need for efficient, data-driven solutions to overcome these challenges highlights the potential of Industry 4.0 (I4.0) technologies, which enable automation, predictive analytics, and real-time monitoring (Ali; Kannan, 2022a; Liu; Song; Liu, 2023b; Lopes et al., 2022). However, there is limited understanding of how I4.0 can facilitate the implementation of CEH, particularly regarding its practical applications and long-term impact on hospital sustainability (Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021a).

Given this gap, this study seeks to answer the following question: What is the role of I4.0 technologies in managing the CEH, and which technologies can be used to implement and enhance circularity in this context? To address this question, this study aims to define the role of I4.0 in CE management within hospitals and to identify key technologies that contribute to its implementation and efficiency. By doing so, it provides actionable insights for policymakers, healthcare administrators, and technology providers, fostering a collaborative transition toward a more sustainable and resilient healthcare system in the digital age.

2. Materials and Methods

This study consists of a systematic review following the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) protocol. The review mapped and

synthesized literature on the application of I4.0 technologies in hospital CE management (Canto et al., 2020; Cochrane, 2024). The PCC framework (Population, Concept, and Context) guided the definition of inclusion and exclusion criteria and structured the research question (Table 11).

Table 11. Research protocol: I4.0 technologies in circular management in hospitals.

Research question	What are the main Industry 4.0 technologies used to implement and manage the Circular Economy in hospitals?		
Acronym	<i>P – Population</i>	<i>C – Concept</i>	<i>Co - Context</i>
Thematic Axis	Main technologies of Industry 4.0	Circular Economy	Circular Management in Hospitals
Keywords	Industry 4.0 Technologies, Digital Technologies, Smart Healthcare Technologies, Internet of Things, IoT, Big Data, Artificial Intelligence, Digital Transformation	Circular Economy, Circular Model, Circular Business, Circular Supply Chain, Closed loop, Circularity	hospital*, healthcare, health system, medical services, hospital supply chain, healthcare supply chain, Hospital Management, Healthcare Practices
Search command	("Circular Economy" OR "Circular Model" OR "Circular Business" OR "Circular Supply Chain" OR "Closed loop" OR Circularity) AND ("Industry 4.0 Technologies" OR "Digital Technologies" OR "Smart Healthcare Technologies" OR "Internet of Things" OR "IoT" OR "Big Data" OR "Artificial Intelligence" OR "Digital Transformation") AND (hospital* OR healthcare OR "health system" OR "medical services" OR "hospital supply chain" OR "healthcare supply chain" OR "Hospital Management" OR "Healthcare Practices") AND NOT (hotel OR hospitality)		

The literature search was conducted in Scopus and Web of Science, selected for their robustness and relevance to the topic (Govindan; Hasanagic, 2018). Keywords aligned with the PCC framework were combined using Boolean operators to refine the results. Following the PRISMA protocol, the selection process occurred in three phases: title screening, abstract analysis, and full-text reading of selected articles. Extracted data included the I4.0 technologies identified, their application context, and contributions to CEH. This process is illustrated in Figure 12.

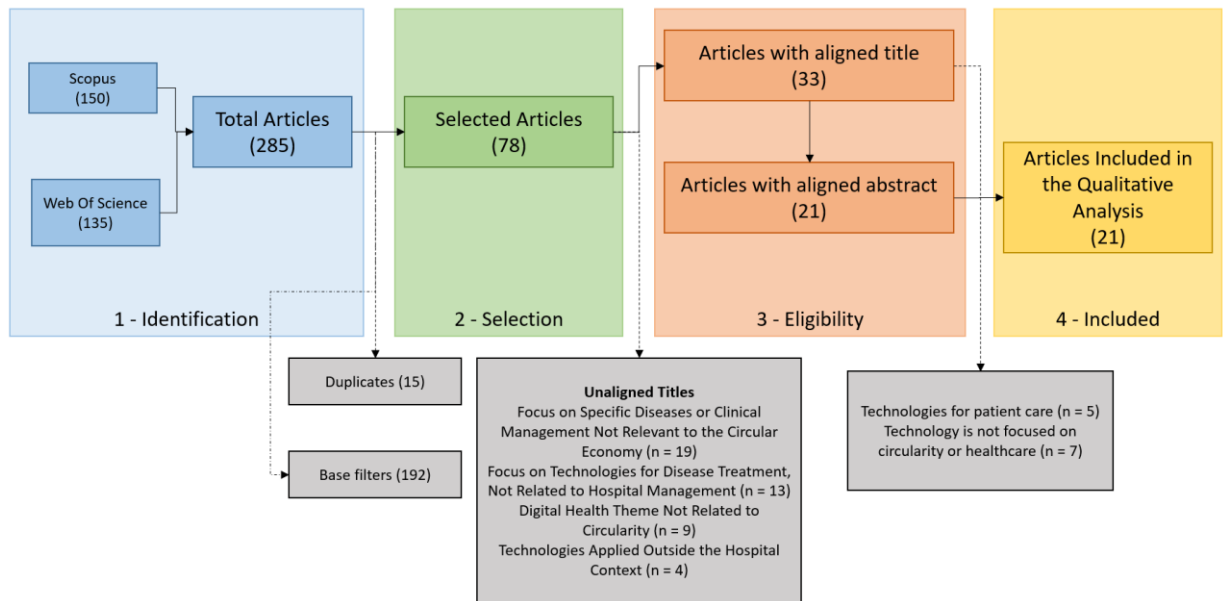


Figure 12. Literature selection process: I4.0 technologies in circular management in hospitals.

The database search was filtered by year, language, document type, and subject area, selecting peer-reviewed journal articles (2000 - August 2024) in engineering, decision sciences, and business, published in English. Exclusion criteria eliminated studies that did not meet inclusion parameters, mentioned Circular Economy or I4.0 only superficially, or focused on non-hospital contexts or I4.0 applications outside management. A narrative synthesis categorized technologies by their role in waste management, resource efficiency, and hospital logistics, identifying frequently cited technologies and gaps in literature.

3. Results

3.1. Industry 4.0 technologies in CE for hospital management: context and concept

Industry 4.0 (I4.0) technologies are transforming hospital management, enhancing resource efficiency and circular practices (Daú et al., 2019a). While healthcare innovations have mainly focused on disease treatment and patient monitoring (Suthagar; Mishra, 2024b), hospitals have lagged in adopting digital solutions. The need for effective hospital waste management grew in the 2000s due to increasing waste complexity (Harris; McCabe, 2024; Viani; Vaccari; Tudor, 2016), leading to advancements in segregation, treatment, and disposal (Chaerul; Tanaka; Shekdar, 2008). Introduced at the Hannover Fair in 2011, I4.0 marked a shift toward digital transformation, integrating IoT, Big Data, AI, and Cloud Computing across

sectors, including healthcare (Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021a; Rajput; Singh, 2019b). These technologies have since evolved from manufacturing to hospital management, optimizing processes, decision-making, and circularity (Ali; Kannan, 2022a; Dantas et al., 2021b; Daú et al., 2019a; Hoosain; Paul; Ramakrishna, 2020; Pandey et al., 2022; Rajput; Singh, 2019b; Rodríguez; Gonzalez-Cava; Pérez, 2020).

By automating processes, improving supply chains, and enabling predictive analytics, I4.0 enhances efficiency and cost reduction (Pandey Et Al., 2022; QUINTERO; MALDONADO, 2024). Digitalization and connectivity have reshaped hospital operations, supporting sustainable frameworks like CE (Suthagar; Mishra, 2024b).

In complex, high-demand hospital environments, I4.0 optimizes resource management, logistics, and waste reduction (Bongomin et al., 2020). Its automation and data-driven capabilities strengthen operational efficiency and sustainability, reinforcing circularity in healthcare (Kazançoglu et al., 2021; Rowan, 2024).

Studies highlight how IoT, Big Data, AI, blockchain, and cloud computing facilitate the transition to a circular model by improving resource reuse, operational efficiency, and waste management (Ali; Kannan, 2022a; Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021a; Daú et al., 2019a). For instance, IoT sensors and RFID tags enable real-time monitoring of medical equipment usage and inventory levels, reducing underutilization and extending product lifespans (Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021a; Liu; Song; Liu, 2023b). Blockchain ensures transparency in the supply chain, allowing hospitals to track the origin and destination of materials, while AI-driven predictive analytics optimize inventory levels, minimizing overstocking and waste (Ali; Kannan, 2022a). Cyber-Physical Systems (CPS) integrate physical and digital processes, automating logistics and improving waste tracking through GPS-enabled systems (Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021a; Daú et al., 2019a). The CAB2IN framework further supports this transition by addressing the entire product lifecycle, from design to end-of-life management, promoting practices such as remanufacturing, reuse, and recycling (Liu; Song; Liu, 2023b). Cloud computing enhances collaboration among stakeholders by enabling seamless data sharing, while smart sensors and digital twins provide real-time insights into resource consumption and waste generation (Hoosain; Paul; Ramakrishna, 2020; Kazançoglu et al., 2021). Together, these technologies not only enhance traceability and process optimization but also empower hospitals to meet CE goals, such as reducing carbon footprints, conserving resources, and aligning operations with social, environmental, and economic sustainability (Lopes et al., 2024).

Therefore, the concept of I4.0 technologies in CE for hospital management can be defined as: An integrated set of digital tools – including IoT, AI, Big Data, blockchain, and cloud computing – that optimize resource use, reduce waste, and promote sustainability in hospital supply chains and operations. These technologies enable a shift from a linear to a circular model, ensuring resource reuse, product remanufacturing, and lifecycle management. IoT and RFID enhance waste control and traceability, while Big Data and AI improve decision-making and planning. Collaboration between hospitals, suppliers, and waste management firms is crucial to implementing circular practices. Thus, Industry 4.0 fosters an intelligent and sustainable hospital model, integrating circular strategies that enhance environmental, social, and economic efficiency, reduce environmental impact, and improve the quality of life for patients and healthcare professionals.

Espinosa et al. (2021) demonstrate the application of IoT in hospitals for real-time monitoring of equipment and materials, facilitating predictive maintenance, and minimizing waste (Han et al., 2024). Smart sensors track energy and water consumption, while integrated management systems improve hospital inventory and waste handling (Rowan, 2024). According to Benzidia et al. (2021), Big Data analytics provides strategic insights for optimizing sterilization processes, equipment reuse, and supply chain efficiency.

Integrating I4.0 with CE supports hospital management models that prioritize resource efficiency, extended product lifecycles, and waste reduction. 3D printing enables on-demand local production of prosthetics and hospital components, minimizing transport, storage, and disposal needs, making it particularly valuable in low-resource settings (Williams et al., 2022). This approach fosters local capacity-building, extending the lifespan of critical medical equipment, such as oxygen concentrators, while reducing environmental impact and supporting Sustainable Development Goals (SDGs). Additionally, digital management systems optimize reverse logistics, ensuring proper segregation, treatment, and reintegration of materials like plastics, metals, and cardboard into production cycles, effectively closing material loops within hospital operations (Bongomin et al., 2020; Zechel et al., 2024).

Despite these benefits, regulatory compliance, security constraints, and data privacy concerns pose significant challenges to I4.0 adoption in hospitals (Espinosa et al., 2021). However, the synergy between I4.0 and CE provides a valuable opportunity for hospitals to transform resource management, implementing sustainable strategies that reduce environmental impact and optimize supply chains (Harris; McCabe, 2024). The Ellen MacArthur Foundation (EMF), established in 2013, has played a key role in promoting CE

globally, advocating for circular strategies in various industries, including healthcare (Michałowska et al., 2021). EMF has also raised awareness among hospital managers regarding the benefits of circular practices and the importance of integrating resource efficiency into hospital operations.

Building upon EMF's circular framework, Espinosa et al. (Espinosa et al., 2021) emphasize that I4.0 technologies are essential for implementing CEH, aligning hospitals with SDGs by promoting efficiency, sustainability, and resource innovation. Hoosain, Paul and Ramakrishna (Hoosain; Paul; Ramakrishna, 2020) further highlight that digital solutions not only contribute to SDG 9 (Industry, Innovation, and Infrastructure) but also enhance sustainability across multiple SDGs by fostering innovation, responsible practices, and circular hospital management. Since 2017, I4.0 adoption in healthcare has accelerated, transforming hospital processes through telemedicine, IoT-based equipment monitoring, and 3D printing for medical devices.

The COVID-19 pandemic (2020) further boosted digitalization, driving the adoption of AI for resource allocation, IoT for remote monitoring, and Big Data for clinical and logistical analytics (Astri Nur Kuntari; Ulfa; Jamal, 2023; Ayan; Güner; Son-Turan, 2022; Benzidia; Makaoui; Bentahar, 2021; Dixit; Dutta, 2024). These milestones reflect the progressive integration of I4.0 into hospital management, illustrating how technological advancements and global sustainability initiatives are pushing hospitals toward more efficient, circular, and sustainable management models.

3.2. Industry 4.0 Technologies Supporting Circular Economy in Hospitals

Integrating I4.0 technologies into hospital management plays a crucial role in advancing CE practices, optimizing resource efficiency, reducing waste, and supply chain sustainability. These technologies enable automation, real-time monitoring, predictive analytics, and data-driven decision-making, contributing to more intelligent and efficient hospital operations. By leveraging tools such as IoT, AI, Big Data, Cloud Computing, and Cyber-Physical Systems (CPS), hospitals can transition from a linear resource consumption model to a circular approach, extending product lifecycles, improving material traceability, and enhancing reverse logistics. The following section presents key I4.0 technologies and their contributions to hospital circularity, as summarized in Table 12.

Table 12. I4.0 Technologies and their Contribution to Circularity in Hospitals.

I4.0 Technology	Description	Applications for Circularity in Hospitals	Source
Internet of Things (IoT)	A network of interconnected physical devices that collect and exchange data in real time via the internet	- Monitoring the utilization of hospital equipment to prevent underutilization. - Tracking supplies and inventory levels to minimize excess and waste. - Enhancing waste management through intelligent sensor systems. - Monitoring environmental conditions to ensure the proper storage of medicines and supplies.	(Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021a; Espinosa Et Al., 2021; Hoosain; Paul; Ramakrishna, 2020; Liu; Song; Liu, 2023b)
Big Data & Analytics	The process of analyzing large datasets to identify patterns, trends, and actionable insights	- Evaluating material and resource consumption to identify opportunities for reduction. - Identifying potential for recycling and reusing materials. - Optimizing supply chain operations using historical and real-time data. - Forecasting demand to prevent overstocking and reduce waste.	(Benzidia; Makaoui; Bentahar, 2021; Bongomin Et Al., 2020; Dwivedi Et Al., 2023; Hoosain; Paul; Ramakrishna, 2020; Kazançoglu Et Al., 2021; Liu; Song; Liu, 2023b; Pandey Et Al., 2022; Zhang Et Al., 2023b)
Artificial Intelligence (AI)	The use of advanced algorithms to automate decision-making and generate predictive insights.	- Predicting demand for medical supplies and materials to minimize waste. - Optimizing sterilization and reuse processes for medical equipment. - Planning efficient routes for hospital logistics. - Detecting equipment failures early to extend their lifecycle and avoid premature disposal.	(Benzidia; Makaoui; Bentahar, 2021; Dwivedi Et Al., 2023; Kar; Choudhary; Singh, 2022; Liu; Song; Liu, 2023b; Rowan, 2024; Suthagar; Mishra, 2024b)
Cloud Computing	A technology that enables remote storage, access, and analysis of data and applications.	- Integrating hospital management systems to enhance operational efficiency. - Facilitating the sharing of inventory and logistics data across hospital units. - Supporting telemedicine and remote management of medical equipment. - Storing and analyzing product lifecycle data to inform sustainable practices.	(Bongomin Et Al., 2020; Espinosa Et Al., 2021; Pandey Et Al., 2022)
3D Printing (Additive Manufacturing)	A process of creating three-dimensional objects layer by layer from digital models.	- Producing prosthetics, surgical instruments, and spare parts for equipment on-site. - Reducing inventory and waste through on-demand manufacturing. - Customizing medical equipment to meet specific patient needs. - Recycling materials for use in 3D printing processes.	(Bongomin Et Al., 2020; Hoosain; Paul; Ramakrishna, 2020; Rowan, 2024)
Cyber-Physical Systems (CPS)	Integrated systems that combine physical components with computational and communication capabilities for monitoring and control.	- Managing hospital equipment to maximize its operational lifespan. - Automating logistical processes, such as the movement of supplies and waste. - Monitoring environmental conditions (e.g., temperature, humidity) to preserve supplies. - Implementing smart controls to reduce energy and water consumption.	(Han Et Al., 2024)
Blockchain	A decentralized and secure digital ledger for	- Ensuring traceability of materials and medicines throughout their lifecycle. - Enhancing transparency in hospital waste	(Ayan; Güner; Son-Turan, 2022; Bongomin Et Al.,

	recording transactions and data.	management. - Certifying reprocessable supplies and equipment. - Ensuring compliance with environmental and healthcare regulations.	2020; Hoosain; Paul; Ramakrishna, 2020; Liu; Song; Liu, 2023b; Pandey Et Al., 2022)
Collaborative Robotics	Robots designed to work alongside humans in shared environments.	- Automating repetitive and low-value tasks, such as cleaning and waste sorting. - Streamlining logistical processes, including the movement of supplies and inventory. - Assisting in medical procedures to reduce the reliance on single-use disposable items.	(Bongomin Et Al., 2020; Han Et Al., 2024; Hoosain; Paul; Ramakrishna, 2020; Maneengam; Udomsakdigool, 2020)]
Drones	Unmanned aerial vehicles used for data collection, inspection, and transportation.	- Monitoring the generation and disposal of hospital waste. - Transporting reusable supplies, medicines, and equipment between hospital units efficiently. - Inspecting infrastructure to support preventive maintenance. - Tracking inventory levels to minimize waste and optimize stock management.	(Bongomin Et Al., 2020; Espinosa Et Al., 2021; Graves; Bilbao; Bayne, 2024; Hoosain; Paul; Ramakrishna, 2020; Kar; Choudhary; Singh, 2022; Suthagar; Mishra, 2024b)
Augmented Reality/ Virtual Reality (AR/VR)	Technologies that overlay digital information or simulate environments in the physical world.	- Training healthcare staff in efficient waste management practices. - Enabling predictive maintenance of equipment through virtual visualization of components. - Simulating hospital layouts and workflows to optimize resource use. - Educating patients and staff on sustainable healthcare practices.	(Bongomin Et Al., 2020; Pandey Et Al., 2022; Rowan, 2024)
Machine Learning	A subset of AI that uses algorithms to learn from data and make predictions or decisions.	- Optimizing the use of hospital materials and supplies. - Managing waste streams to enhance recycling and reuse. - Predicting equipment failures to extend their operational life. - Analyzing the lifecycle of products and supplies to inform sustainable practices. - Planning patient flow and resource allocation efficiently.	(Dwivedi Et Al., 2023; Graves; Bilbao; Bayne, 2024; Han Et Al., 2024; Hoosain; Paul; Ramakrishna, 2020; Kar; Choudhary; Singh, 2022; Kazançoğlu Et Al., 2021; Rodríguez; Gonzalez-Cava; Pérez, 2020; Rowan, 2024)

The application of I4.0 technologies in the context of the CEH reveals distinct patterns regarding their frequency, interrelations, and potential applications. Among the identified technologies, IoT, AI, Big Data, Blockchain, and Cloud Computing appear most frequently in the literature, highlighting their critical role in real-time monitoring, automation, and data-driven decision-making (Daú et al., 2019a; Espinosa et al., 2021; Rowan, 2024; Suthagar; Mishra, 2024b). Additionally, 3D printing (Williams et al., 2022) and collaborative robotics (Maneengam; Udomsakdigool, 2020) are recognized for their capacity to enhance material efficiency and reduce waste through localized production and automation of logistics. Despite the evident potential of these technologies, the degree of implementation in hospitals varies,

with Blockchain and CPS still in their early stages of application for circularity in healthcare settings (Han et al., 2024; Schiffer; Doerr, 2020).

An important aspect observed is the synergistic relationships among different I4.0 technologies. IoT and Big Data complement each other by monitoring material flows and generating predictive insights for waste reduction and resource optimization (Dwivedi et al., 2023; Espinosa et al., 2021). Blockchain and Cloud Computing, in turn, enhance traceability and transparency, supporting secure data sharing and efficient hospital supply chain management (Bongomin et al., 2020; Kalaria; Singh; Prajapati, 2023). Furthermore, AI-based analytics, when integrated with IoT sensors, can optimize waste segregation and energy consumption in hospitals, promoting sustainability while improving operational efficiency (Espinosa et al., 2021). These interconnections emphasize the importance of adopting integrated technological solutions rather than isolated implementations to maximize the benefits of CEH.

Despite the advances in I4.0 applications for CEH, significant gaps in the literature remain. While studies extensively discuss the role of IoT, AI, and Big Data in waste and resource management, there is limited empirical evidence on the quantitative impact of these technologies in reducing environmental footprints in hospital settings (Jabbour et al., 2018; Tortorella et al., 2022). Moreover, emerging technologies such as Digital Twins and Smart Sensors remain underexplored, despite their potential to enhance real-time monitoring and predictive modeling for hospital sustainability (Rowan, 2024). These technologies could offer greater precision in resource allocation, predictive maintenance of medical equipment, and lifecycle analysis of materials, further contributing to circularity.

Additionally, although the literature highlights the relevance of I4.0 for CEH, studies rarely address the specific challenges associated with large-scale implementation. Issues such as high initial investment costs, interoperability limitations, and regulatory adaptation remain significant barriers (Hoveling et al., 2024; Macneill et al., 2020; Moro Visconti; Morea, 2019). There is also a lack of sector-specific case studies that evaluate the practical applications of these technologies in real hospital environments. Further investigation is needed to determine which hospital departments can most benefit from I4.0-driven circular practices, particularly in hazardous waste management, supply chain logistics, and energy efficiency optimization.

These findings suggest that while I4.0 technologies present considerable opportunities for advancing circularity in hospitals, their effective implementation depends on integrated strategies that address technological, economic, and regulatory constraints. Future studies

should focus on quantifying the environmental and economic impacts of I4.0 in CEH, assessing the feasibility of Digital Twins and Smart Sensors, and developing policy frameworks that support the large-scale adoption of these technologies.

4. Framework proposal and discussion

The findings highlight the transformative potential of I4.0 technologies in advancing CEH, reinforcing their role in resource efficiency, waste reduction, and operational optimization. Technologies such as IoT, AI, Big Data, Blockchain, and Cloud Computing facilitate automation, real-time monitoring, and predictive analytics, aligning hospital management with sustainable and data-driven decision-making (Benzidia; Makaoui; Bentahar, 2021; Dwivedi et al., 2023; Kar; Choudhary; Singh, 2022; Liu; Song; Liu, 2023b; Rowan, 2024; Suthagar; Mishra, 2024b). The integration of these technologies enables greater traceability, transparency, and efficiency, critical aspects for hospitals aiming to transition from a linear to a circular model (Daú et al., 2019a).

Figure 13 illustrates the role of I4.0 technologies in supporting CE strategies in hospitals, emphasizing the variation in interconnectivity and data-driven insights among different technological applications. The figure highlights how some technologies, such as IoT and Blockchain, operate in environments with high interconnectivity, facilitating real-time data exchange and secure supply chain management, whereas others, like AI and 3D printing, function with lower interconnectivity, as they primarily optimize localized hospital operations (Espinosa et al., 2021). Similarly, AI and IoT generate high data-driven insights, enabling predictive analytics and continuous monitoring, while 3D printing and Blockchain, despite their contributions to circularity, rely on lower levels of data analytics to fulfill their roles in waste reduction and supply chain transparency (Bongomin et al., 2020; Kulkarni, 2023).

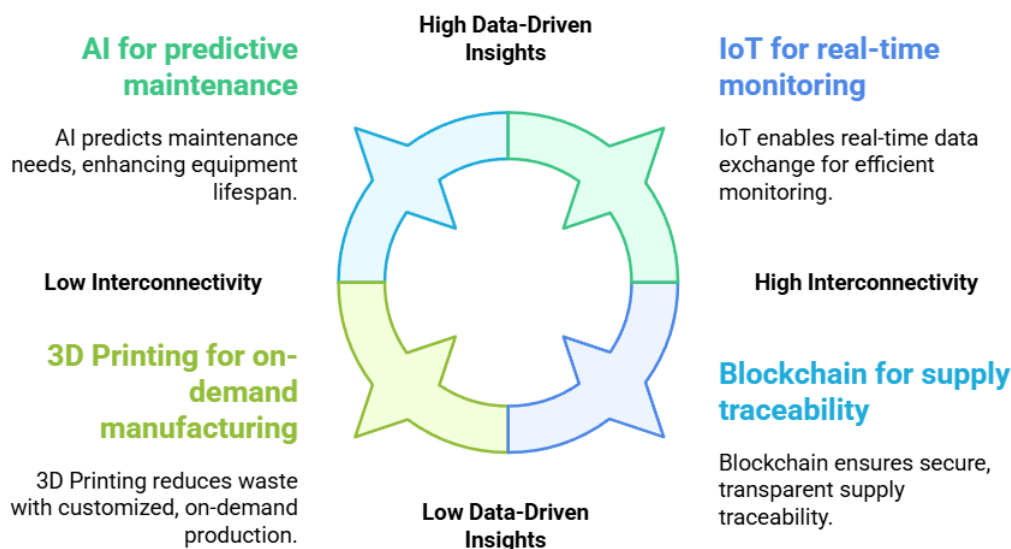


Figure 13. Technological applications in sustainable healthcare.

This distribution of technologies suggests that highly interconnected solutions, such as IoT and Blockchain, are pivotal in enabling large-scale hospital sustainability efforts by improving data exchange and operational coordination. In contrast, technologies with lower interconnectivity, such as AI and 3D printing, provide localized benefits that support circularity through efficiency improvements in maintenance and manufacturing. The combination of both highly interconnected and localized solutions is essential to developing a resilient and adaptive circular economy model in hospitals.

Despite these advancements, the effective implementation of I4.0 in CEH faces significant barriers. Regulatory constraints, interoperability challenges, and financial limitations remain key obstacles limiting the adoption of emerging digital solutions (Hoveling et al., 2024). Many healthcare institutions still rely on traditional waste management and supply chain practices, creating resistance to technological change. Moreover, the high initial investment required for I4.0 implementation and the lack of standardized policies for circular healthcare management further hinder widespread adoption (Lopes et al., 2024). Addressing these barriers requires a multidisciplinary approach, combining technological innovation, institutional engagement, and supportive regulatory frameworks.

A notable gap in literature is the limited empirical data on the quantitative impact of I4.0 technologies on CEH. Although studies emphasize their potential benefits, there is a lack of comprehensive assessments measuring their real-world effectiveness in hospitals (Jabbour et al., 2018; Tortorella et al., 2022). Future research should explore data-driven methodologies, such as Life Cycle Assessments (LCA) and environmental impact analyses, to evaluate the

economic and ecological advantages of I4.0 in circular hospital management.

Another important aspect is the need for sector-specific strategies that consider the unique operational demands of hospitals. While IoT and Big Data have demonstrated effectiveness in supply chain monitoring and waste reduction, their adaptation to different hospital departments, such as hazardous waste management and logistics optimization, remains underexplored (Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021a; Govindan; Hasanagic, 2018). Additionally, emerging technologies like Digital Twins and Smart Sensors hold great potential for predictive modeling and real-time adjustments, yet their application in CEH is still in its early stages.

To fully realize the benefits of I4.0 in CEH, it is essential to develop integrated strategies that align technological advancements with financial, regulatory, and institutional frameworks. Policymakers should consider incentives and funding mechanisms to support the adoption of circular practices in healthcare, while hospital administrators should focus on pilot projects that demonstrate the viability of I4.0-driven circular models. Additionally, strengthening collaboration between academia, healthcare institutions, and technology providers will be crucial for accelerating the transition to sustainable and resilient hospital systems (Chrusciak et al., 2025; Tiwari et al., 2024).

To synthesize the relationships between enabling I4.0 technologies and the digital transformation processes driving the CEH, Figure 14 presents an integrative framework.

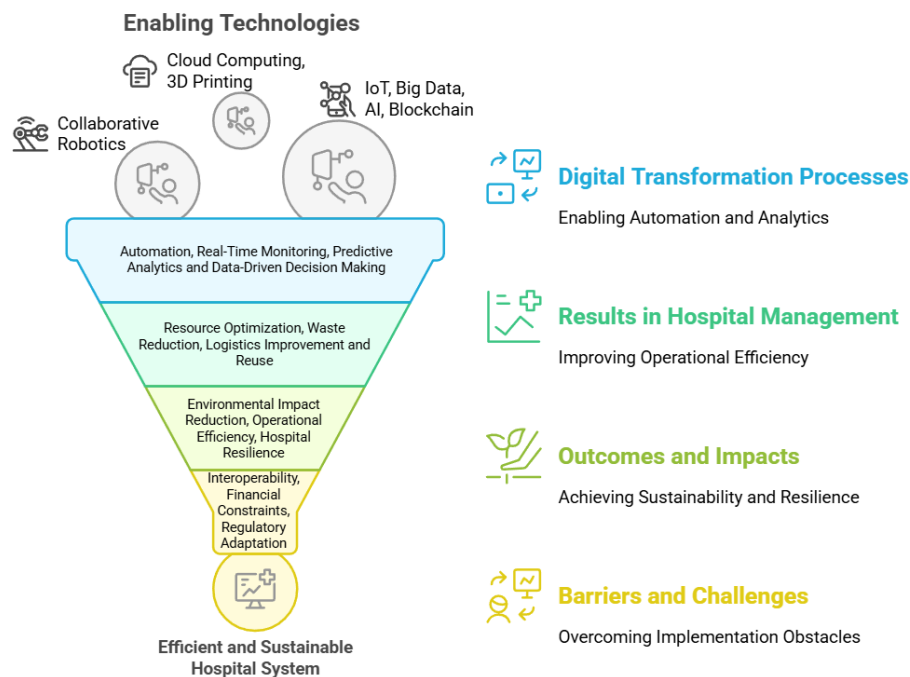


Figure 14. Digital Transformation Framework in Healthcare Management.

Figure 3 highlights the main digital innovations (such as IoT, Big Data, AI, Blockchain, Cloud Computing, 3D Printing, and Collaborative Robotics) and illustrates how these solutions, when applied collectively, enable automation, real-time monitoring, predictive analytics, and data-driven decision-making. This systematic approach demonstrates how these technologies optimize hospital management, contributing to waste reduction, improved logistics, material reuse, and ultimately the development of a more sustainable and resilient hospital system.

Furthermore, the outcomes of successful implementation go beyond operational efficiency and reduced environmental impact, extending to institutional resilience in the face of regulatory, financial, and interoperability challenges. The framework indicates that adopting these technologies requires integrated strategies aligned with each hospital's specific needs, as well as appropriate institutional and regulatory support. Therefore, transitioning to a circular hospital model, guided by Industry 4.0 solutions, depends on overcoming existing barriers and fostering a culture of innovation, ensuring benefits for both internal management and the broader healthcare system.

4.1. Theoretical Implications

By exploring the intersection of Industry 4.0, Circular Economy, and Healthcare Management, this study advances theoretical discourse and offers new insights into how digital technologies can reshape sustainability practices in hospitals. Integrating concepts from digital transformation, circular supply chain management, and sustainable healthcare, the research enhances existing frameworks and identifies gaps warranting further investigation.

One of the primary theoretical contributions of this study is its reconceptualization of CE in hospitals through the lens of digitalization. Traditional CE frameworks often focus on material recovery, waste reduction, and closed-loop supply chains (Govindan; Hasanagic, 2018). However, this research extends these models by demonstrating that I4.0 technologies, such as IoT, AI, Blockchain, and Digital Twins, not only enhance waste management and resource efficiency but also enable real-time decision-making, automation, and predictive analytics (Rajput; Singh, 2019b). This perspective aligns with the broader shift towards smart and data-driven sustainability models, reinforcing the argument that digitalization is a critical enabler of CE in complex systems like healthcare (Hoosain; Paul; Ramakrishna, 2020).

Furthermore, this study contributes to the theoretical understanding of technological synergy in CE implementation. While prior research has examined I4.0 technologies in isolation

(Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021a), this work underscores the importance of integrating multiple digital tools to maximize circularity. The findings suggest that the combination of IoT and Big Data enhances material flow optimization, while AI-driven analytics and Blockchain improve transparency and compliance in hospital sustainability strategies (Benzidia; Makaoui; Bentahar, 2021). This interconnected approach aligns with emerging theoretical perspectives in digital circular economy ecosystems, which emphasize cross-technology integration for sustainable innovation (Dantas et al., 2021b).

Another key theoretical implication relates to the role of I4.0 in transforming hospital supply chains from linear to circular models. While healthcare supply chains have traditionally been linear and consumption-driven, this study highlights how Cyber-Physical Systems (CPS) and digital platforms enable circular supply chain configurations, improving resource allocation, extending product lifecycles, and reducing dependence on single-use medical materials (Kazançoglu et al., 2021). These insights contribute to the development of circular economy supply chain theories tailored to highly regulated and resource-intensive sectors such as healthcare (Ali; Kannan, 2022a).

Additionally, this study advances discussions on barriers and enablers of digital sustainability in healthcare. The findings suggest that while I4.0 technologies provide unprecedented opportunities for circularity, their adoption is constrained by regulatory complexities, interoperability challenges, and financial limitations (Hoveling et al., 2024). This reinforces the theoretical argument that technological feasibility alone is insufficient for circular economy adoption, successful implementation depends on a combination of institutional readiness, regulatory frameworks, and managerial support (Macneill et al., 2020).

Therefore, this study extends the theoretical discourse by proposing that a multi-level approach (integrating digital innovation, organizational strategy, and policy adaptation) is necessary to achieve circularity in hospitals. Future research should build upon these findings by developing quantitative models to assess the impact of I4.0 technologies on hospital sustainability and by conducting comparative studies across different healthcare systems to identify best practices for digital circular economy adoption.

Thus, this research broadens current theoretical frameworks by integrating digital transformation, circular economy, and healthcare sustainability. It lays the groundwork for future studies that explore how smart technologies can drive sustainable transitions in highly complex and regulated industries.

4.2. Practical and Managerial Implications

The integration of I4.0 technologies into CE strategies within hospitals presents significant practical and managerial implications. By leveraging digital innovations such as the IoT, AI, Blockchain, and Big Data, healthcare facilities can enhance their operational efficiency, reduce waste, and optimize resource management, thereby fostering a more sustainable and resilient hospital environment (Hoosain; Paul; Ramakrishna, 2020; Liu; Song; Liu, 2023b).

From a practical perspective, I4.0 technologies offer hospitals advanced solutions to streamline supply chain operations and waste management. IoT-enabled smart sensors and RFID tags facilitate real-time tracking of medical equipment and consumables, minimizing underutilization and reducing unnecessary procurement (Espinosa et al., 2021). AI-powered predictive analytics improve inventory control, ensuring optimal stock levels and preventing waste from expired or overstocked medical supplies (Benzidia; Makaoui; Bentahar, 2021). Furthermore, Blockchain technology enhances transparency and traceability in medical supply chains, enabling better compliance with sustainability regulations and reducing risks associated with counterfeit or low-quality materials (Ayan; Güner; Son-Turan, 2022).

The adoption of CPS and digital twins also has direct managerial implications, as these technologies provide hospital administrators with real-time insights into resource consumption patterns and environmental impacts (Rowan, 2024). By simulating different operational scenarios, digital twins can support decision-making processes in hospital logistics, equipment maintenance, and energy efficiency strategies, ultimately reducing costs and improving sustainability performance (Kazançoglu et al., 2021). Additionally, cloud-based platforms facilitate data integration across different hospital departments, improving interdepartmental coordination and fostering a more data-driven decision-making culture (González Rodríguez; Gonzalez-Cava; Méndez Pérez, 2020).

From a managerial standpoint, the implementation of I4.0-driven CE practices requires a strategic shift in hospital governance. Leaders must establish interdisciplinary teams that integrate healthcare professionals, IT specialists, and sustainability managers to successfully implement digital solutions and circular strategies (Jabbour et al., 2018). Additionally, hospital administrators must invest in workforce training to enhance digital literacy among healthcare staff, ensuring effective utilization of AI-driven decision-making tools and automated systems (Pandey et al., 2022).

Regulatory adaptation and financial investment also represent key challenges in the large-scale adoption of these technologies. Many hospitals face financial constraints that hinder investments in digital transformation and circularity initiatives (Dantas et al., 2021b). Therefore, policymakers should develop incentive mechanisms, such as funding programs or tax benefits, to encourage healthcare facilities to adopt I4.0 solutions for circular management (Macneill et al., 2020). Moreover, standardizing regulatory frameworks for digital sustainability in healthcare could facilitate the broader implementation of these technologies and reduce legal uncertainties surrounding data privacy, interoperability, and waste management regulations (Hoveling et al., 2024).

Considering the above, the successful integration of I4.0 technologies into circular hospital management requires a combination of technological innovation, strategic leadership, and supportive policy measures. By addressing these practical and managerial challenges, hospitals can enhance their sustainability performance while improving operational and healthcare service delivery in the digital era.

5. Conclusions

5.1. Final Considerations

By bridging technological innovation with the principles of the CE, this study contributes to the ongoing discourse on sustainable hospital management. The strategic adoption of I4.0 technologies not only promotes resource efficiency and waste reduction but also strengthens healthcare, aligning hospital operations with global sustainability goals. Advancing research and practical applications in this field will be crucial for ensuring a more sustainable, resilient, and human-centered healthcare system in the digital era.

This study identified key I4.0 technologies that enable circularity in hospitals, emphasizing their role in optimizing resource efficiency, waste management, and sustainable healthcare practices. The findings highlight that IoT, AI, Big Data, Blockchain, and Cloud Computing serve as fundamental enablers of circular strategies, allowing automation, real-time monitoring, predictive analytics, and data-driven decision-making in hospital operations. Additionally, technologies such as 3D printing, Cyber-Physical Systems (CPS), and collaborative robotics contribute to localized production, logistics optimization, and a reduced dependency on disposable materials, reinforcing circular approaches within the healthcare

sector.

Although the significant potential of these technologies, their large-scale adoption still faces critical barriers, including technological infrastructure limitations, regulatory constraints, high initial investment costs, and interoperability challenges. Overcoming these obstacles requires a multidisciplinary approach that aligns technological advancements with policy development, financial incentives, and cross-sector collaboration. The engagement of hospital administrators, policymakers, and technology providers will be essential in driving a systematic transition toward circular and sustainable hospital systems.

Therefore, it is concluded that Industry 4.0 technologies play a transformative role in hospital circularity, offering innovative solutions to improve sustainability in healthcare management. However, their effective implementation requires coordinated efforts between technological, regulatory, and financial stakeholders to overcome existing challenges and maximize their impact.

5.2. Limitations and Future Perspectives

Future research should focus on applying quantitative methods to assess the economic and environmental benefits of I4.0-driven circular economy practices, providing empirical data to support evidence-based decision-making. Additionally, emerging technologies such as Digital Twins and Smart Sensors warrant further exploration. Digital Twins can enable real-time simulations of resource flows and predictive modeling, optimizing hospital logistics and sustainability strategies. Meanwhile, Smart Sensors, when integrated with IoT and AI, could enhance material consumption monitoring, waste segregation, and supply chain adjustments, fostering greater circularity and operational efficiency.

Beyond technology-focused studies, further research should explore regulatory frameworks and financial mechanisms that facilitate the adoption of I4.0 technologies in hospitals. Addressing regulatory gaps and creating incentives for sustainable digital transformation will be key to scaling circular economy strategies in healthcare. Comparative case studies across different healthcare systems could provide scalable best practices, guiding institutions in effectively integrating I4.0 technologies into circular hospital management.

6. References

- Ali, I., & Kannan, D. (2022). Mapping research on healthcare operations and supply chain management: a topic modelling-based literature review. *Annals of Operations Research*, 315(1), 29–55. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04596-5>
- Alighardashi, M., Moein, H., Dehghanpour, S., Mousavi, S. A., Almasi, A., & Mohammadi, P. (2024). Environmental assessment of hospital waste management practices: A study of hospitals in Kermanshah, Iran. *Results in Engineering*, 23(102658), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102658>
- Astri Nur Kuntari, N., Ulfa, M., & Jamal, A. (2023). Hospital Waste Management During COVID-19. *International Journal of Science and Healthcare Research*, 8(1), 27–44. <https://doi.org/10.52403/ijshr.20230104>
- Ayan, B., Güner, E., & Son-Turan, S. (2022). Blockchain Technology and Sustainability in Supply Chains and a Closer Look at Different Industries: A Mixed Method Approach. *Logistics-Basel*, 6(85), 1–39. <https://doi.org/10.3390/logistics6040085> WE - Emerging Sources Citation Index (ESCI)
- Benzidia, S., Makaoui, N., & Bentahar, O. (2021). The impact of big data analytics and artificial intelligence on green supply chain process integration and hospital environmental performance. *Technological Forecasting and Social Change*, 165(120557), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120557>
- Bongomin, O., Yemane, A., Kembabazi, B., Malanda, C., Mwape, M. C., Mpofu, N. S., & Tigelana, D. (2020). Industry 4.0 Disruption and Its Neologisms in Major Industrial Sectors: A State of the Art. *Journal of Engineering*, 2020(1), 1–45. <https://doi.org/10.1155/2020/8090521> WE - Emerging Sources Citation Index (ESCI)
- Canto, G. D. L., Porporatti, A., Souza, B. D. M. de, Massignan, C., Flores-Mir, C., Casett, E., Porfírio, G. J. M., Polmann, H., Porto de Toledo, I., Réus, J. C., Dias de Oliveira, J. M., Dutra-Horstmann, K. L., Mezzomo, L. A., Savi, M. G. M., Bolan, M., Pauletto, P., Pacheco-Pereira, C., Martins, C. C., Guerra, E., & Melo, G. (2020). *Revisões sistemáticas da literatura: guia prático*. Brazil Publishing. <https://doi.org/10.31012/978-65-5016-353-2>
- Chaerul, M., Tanaka, M., & Shekdar, A. V. (2008). A system dynamics approach for hospital waste management. *Waste Management*, 28(2), 442–449. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.007>
- Chauhan, A., Jakhar, S. K., & Chauhan, C. (2021). The interplay of circular economy with industry 4.0 enabled smart city drivers of healthcare waste disposal. *Journal of Cleaner Production*, 279(1), 123854. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123854> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)
- Chrusciak, C. B., Szejka, A. L., Canciglieri Junior, O., & Schaefer, J. L. (2025). Human-centric process improvement through digital transformation: contributions and limitations. *Production*, 35(1), 1–16. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20240109>
- Cochrane. (2024). Cochrane Library. Cochrane Database of Systematic Reviews. <https://www.cochranelibrary.com/cdsr/about-cdsr>
- Dantas, T. E. T., De-Souza, E. D., Destro, I. R., Hammes, G., Rodriguez, C. M. T., & Soares, S. R. (2021). How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 213–227. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.005>
- Daú, G., Scavarda, A., Scavarda, L. F., & Portugal, V. J. T. (2019). The Healthcare Sustainable Supply Chain 4.0: The Circular Economy Transition Conceptual Framework with the Corporate Social Responsibility Mirror. *Sustainability*, 11(3259), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su11123259>
- Dixit, A., & Dutta, P. (2024). Critical success factors for the adoption of circular economy in sustainable healthcare waste management. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 26(7), 2181–2201. <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02712-y>
- Drei, S. M., & Ignácio, P. S. de A. (2024). Lean Healthcare systematically applied to improve mobility accessibility in the medical clinic of a medium-sized hospital. *Production*, 34(1), 1–14. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20230063>
- Dwivedi, Y. K., Sharma, A., Rana, N. P., Giannakis, M., Goel, P., & Dutot, V. (2023). Evolution of artificial intelligence research in Technological Forecasting and Social Change: Research topics, trends, and future

- directions. *Technological Forecasting and Social Change*, 192(1), 122579. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122579>
- Espinosa, A. V., Lopez, J. L., Mata, F. M., & Estevez, M. E. (2021). Application of IoT in Healthcare: Keys to Implementation of the Sustainable Development Goals. *Sensors*, 21(7), 1–37. <https://doi.org/10.3390/s21072330> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) WE - Social Science Citation Index (SSCI)
- Ghali, H., Cheikh, A. Ben, Bhiri, S., Bouzgarrou, L., Rejeb, M. Ben, Gargouri, I., & Latiri, H. S. (2023). Health and Environmental Impact of Hospital Wastes: Systematic Review. *Dubai Medical Journal*, 6(2), 67–80. <https://doi.org/10.1159/000529432>
- González Rodríguez, G., Gonzalez-Cava, J. M., & Méndez Pérez, J. A. (2020). An intelligent decision support system for production planning based on machine learning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(5), 1257–1273. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01510-y>
- Govindan, K., & Hasanagic, M. (2018). A systematic review on drivers, barriers, and practices towards circular economy: a supply chain perspective. *International Journal of Production Research*, 56(1–2), 278–311. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1402141>
- Graves, D. Z., Bilbao, A. V., & Bayne, S. B. (2024). Machine Learning Based Foreign Object Detection in Wireless Power Transfer Systems. *E-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 7(100384), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100384>
- Grignaffini, L., Grignaffini, S., Vallati, A., & Romagna, M. (2023). Improving the energy performance of healthcare buildings: a case study. *Journal of Physics: Conference Series*, 2648(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2648/1/012035>
- Han, H., Yao, J., Wu, Y., Dou, Y., & Fu, J. (2024). Quantum communication based cyber security analysis using artificial intelligence with IoMT. *Optical and Quantum Electronics*, 56(565), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-06185-7> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)
- Harris, P., & McCabe, B. K. (2024). Technical evaluation of steam sterilisation coupled with gasification to improve circularity of Australian hospital waste management: A case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 207(107680), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107680>
- Hoosain, M. S., Paul, B. S., & Ramakrishna, S. (2020). The Impact of 4IR Digital Technologies and Circular Thinking on the United Nations Sustainable Development Goals. *Sustainability*, 12(23), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su122310143> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) WE - Social Science Citation Index (SSCI)
- Hoveling, T., Svindland Nijdam, A., Moninx, M., Faludi, J., & Bakker, C. (2024). Circular economy for medical devices: Barriers, opportunities and best practices from a design perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 208(107719), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107719>
- Jabbour, A. B. L. de S., Jabbour, C. J. C., Godinho Filho, M., & Roubaud, D. (2018). Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. *Annals of Operations Research*, 270(1–2), 273–286. <https://doi.org/10.1007/s10479-018-2772-8>
- Kalaria, C., Singh, S., & Prajapati, B. G. (2023). Intelligent healthcare supply chain. In *Human Machine Interface: Making Healthcare Digital* (pp. 449–481). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781394200344.ch17>
- Kar, A. K., Choudhary, S. K., & Singh, V. K. (2022). How can artificial intelligence impact sustainability: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 376(1), 134120. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134120>
- Kazançoglu, Y., Sagnak, M., Lafci, Ç., Luthra, S., Kumar, A., & Taçoğlu, C. (2021). Big Data-Enabled Solutions Framework to Overcoming the Barriers to Circular Economy Initiatives in Healthcare Sector. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(14), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ijerph18147513> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) WE - Social Science Citation Index (SSCI)
- Kulkarni, M. (2023). The role of the control tower in increasing the productivity in container terminal operations. *Journal of Maritime Research*, 20(1), 30–33. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85158122577&partnerID=40&md5=3f0f6e07b08362b97f1dac826d4bae95>
- Liu, L., Song, W., & Liu, Y. (2023). Leveraging digital capabilities toward a circular economy: Reinforcing sustainable supply chain management with Industry 4.0 technologies. *Computers & Industrial*

- Engineering, 178(109113), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109113>
- Lopes, E. de J., Lima, L. S. da S., Bonilla, M. A. M., & Bouzon, M. (2024). Systematic Review of the Circular Economy Performance Assessment System Under International Management Paradigms. *Revista de Gestão Social e Ambiental*, 18(9), e05664. <https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n9-013>
- Lopes, E. de J., Souza, A. B. V. de, Pierre, J. Í. da S., Rêgo Júnior, R. A., & Ponte, F. A. F. da. (2022). Application of methods-time measurement as a tool to improve productivity in a beauty salon. *ITEGAM- Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications (ITEGAM-JETIA)*, 8(35), 20–26. <https://doi.org/10.5935/jetia.v8i35.817>
- MacNeill, A. J., Hopf, H., Khanuja, A., Alizamir, S., Bilec, M., Eckelman, M. J., Hernandez, L., McGain, F., Simonsen, K., Thiel, C., Young, S., Lagasse, R., & Sherman, J. D. (2020). Transforming The Medical Device Industry: Road Map To A Circular Economy. *Health Affairs*, 39(12), 2088–2097. <https://doi.org/10.1377/hlthaff.2020.01118>
- Maneengam, A., & Udomsakdigool, A. (2020). Solving the collaborative bidirectional multi-period vehicle routing problems under a profit-sharing agreement using a covering model. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11(2), 185–200. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2019.10.002>
- Michałowska, J., Pytka, J., Tofil, A., Krupski, P., & Puzio, Ł. (2021). Assessment of Training Aircraft Crew Exposure to Electromagnetic Fields Caused by Radio Navigation Devices. *Energies*, 14(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/en14010254>
- Moro Visconti, R., & Morea, D. (2019). Big Data for the Sustainability of Healthcare Project Financing. *Sustainability*, 11(13), 3748. <https://doi.org/10.3390/su11133748>
- Pandey, S., Twala, B., Singh, R., Gehlot, A., Singh, A., Montero, E. C., & Priyadarshi, N. (2022). Wastewater Treatment with Technical Intervention Inclination towards Smart Cities. *Sustainability*, 14(18), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su141811563> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) WE - Social Science Citation Index (SSCI)
- Quintero, W. R., & Maldonado, J. E. N. (2024). Competencies of the engineer in industry 4.0 context: a systematic literature review. *Production*, 34(1), 1–17. <https://doi.org/10.1590/0103-6513.20230051>
- Rajput, S., & Singh, S. P. (2019). Connecting circular economy and industry 4.0. *International Journal of Information Management*, 49(1), 98–113. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.03.002>
- Rodríguez, G. R., Gonzalez-Cava, J. osé M., & Pérez, J. A. M. (2020). An intelligent decision support system for production planning based on machine learning. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(5), 1257–1273. <https://doi.org/10.1007/s10845-019-01510-y>
- Rowan, N. J. (2024). Digital technologies to unlock safe and sustainable opportunities for medical device and healthcare sectors with a focus on the combined use of digital twin and extended reality applications: A review. *Science of the Total Environment*, 926(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171672>
- Schiffer, M., & Doerr, D. M. (2020). Development of the Supply Chain Management 2040 - Opportunities and Challenges. In N. P., H. D., & H. M. (Eds.), *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics* (pp. 29–37). Publish-Ing in cooperation with TIB - Leibniz Information Centre for Science and Technology University Library. <https://doi.org/10.15488/9644>
- Suthagar, K. S., & Mishra, U. (2024). Sustainable green circular economic model with controllable waste and emission in healthcare system. *Environment, Development and Sustainability*, 1(1), 1–43. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04254-1>
- Tiwari, M. K., Bidanda, B., Geunes, J., Fernandes, K., & Dolgui, A. (2024). Supply chain digitisation and management. *International Journal of Production Research*, 62(8), 2918–2926. <https://doi.org/10.1080/00207543.2024.2316476>
- Tortorella, G. L., Fogliatto, F. S., Sunder M, V., Cawley Vergara, A. Mac, & Vassolo, R. (2022). Assessment and prioritisation of Healthcare 4.0 implementation in hospitals using Quality Function Deployment. *International Journal of Production Research*, 60(10), 3147–3169. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1912429>
- Viani, C., Vaccari, M., & Tudor, T. (2016). Recovering value from used medical instruments: A case study of laryngoscopes in England and Italy. *Resources, Conservation and Recycling*, 111(1), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.025>
- Vishwakarma, A., Dangayach, G. S., Meena, M. L., Gupta, S., Joshi, D., & Jagtap, S. (2024). Can circular

- healthcare economy be achieved through implementation of sustainable healthcare supply chain practices? Empirical evidence from Indian healthcare sector. *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, 17(2), 230–246. <https://doi.org/10.1108/JGOSS-07-2022-0084>
- Williams, E., Piaggio, D., Andellini, M., & Pecchia, L. (2022). 3D-printed activated charcoal inlet filters for oxygen concentrators: A circular economy approach. *Development Engineering*, 7(100094), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2022.100094>
- Zechel, M., Zechel, S., Schubert, U. S., & Ruckdäschel, H. (2024). Circularity of Polymers Used in Hospitals: Current Status, Challenges, and Future Solutions. *Advanced Sustainable Systems*, 2400050(1), 1–17. <https://doi.org/10.1002/adsu.202400050>
- Zhang, W., Chen, X., Zhang, Y., & Hua, H. (2023). Intelligent Construction of Hospital Management Organization Based on Communication Technology and Information Fusion. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2023(1), 1–8. <https://doi.org/10.1155/2023/4758451>

6 ARTIGO 4 - FROM LIFECYCLE MAPPING TO DIGITAL TRANSFORMATION: INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES IN DURABLE MEDICAL DEVICE MANAGEMENT IN BRAZILIAN PUBLIC HOSPITALS

Artigo aguardando submissão

Eliana de Jesus Lopes, Marina Bouzon

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

Abstract:

The growing dependence of healthcare systems on durable medical devices (DMDs) exposes vulnerabilities that compromise patient safety, hospital efficiency, and the sustainability of Brazil's Unified Health System (SUS). In this scenario, understanding the life cycle of these devices and identifying digital technologies capable of optimizing their management becomes strategic for the digital transformation of healthcare. This study aimed to analyze the management processes of DMDs in public hospitals and to identify which Industry 4.0 (I4.0) technologies have the greatest potential to support this process, fostering sustainable management. The research was conducted in two stages: (i) mapping the acquisition, maintenance, and disposal flows of DMDs in municipal hospitals, regional hospitals, and Emergency Care Units (UPAs) in Northeastern Brazil; (ii) evaluating, by 11 experts, the decision-making criteria for adopting digital technologies, using the Best Worst Method (BWM); and prioritizing the most relevant technologies based on the scenario associated with the criterion with the highest average weight. The results showed that Operational Efficiency was the most determined criterion. In this context, Artificial Intelligence, Big Data & Analytics, Cloud Computing, the Internet of Things, Machine Learning, and Smart Sensors stood out as the most promising technologies. In contrast, Drones, 3D Printing, Augmented/Virtual Reality, and Cyber-Physical Systems showed lower applicability in the current SUS context. These findings align with international literature and reinforce the need for technological innovation and connectivity, offering concrete support for managers and policymakers to advance the digital transformation of DMD management within the SUS.

Keywords: Durable Medical Devices; Industry 4.0; Digital Transformation; Sustainable Hospital Management; Decision-Making.

1 Introduction

Digital transformation has been redefining healthcare systems worldwide, with a direct impact on care quality, resource management, and operational efficiency (Tortorella et al., 2022). In this context, Industry 4.0 (I4.0) technologies have enabled greater data integration, process traceability, and real-time decision-making support (Elmassah, 2023). However, the adoption of these tools in public health systems still faces barriers related to governance,

infrastructure, and organizational culture (Hoveling et al., 2024; Rowan, 2024).

In Brazil, the Digital Health Program of the Unified Health System (SUS) represents a milestone by establishing guidelines for the digital integration of the healthcare network, with an emphasis on expanding access, strengthening interoperability, and creating indicators for public management (Brasil, 2024a, 2024b). Nevertheless, despite advancing in the situational diagnosis of the care network, the program does not address critical dimensions of technological infrastructure, including the management of durable medical devices (DMDs) (Aidar Neto, 2024). This absence limits the capacity to plan strategic investments, compromises technological availability, and prevents managers from having an integrated view of the life cycle of these assets.

DMDs are essential for diagnosis and treatment in medium- and high-complexity units, but they also represent one of the most fragile points of the SUS (Hoveling et al., 2024). Studies indicate that up to 40% of medical equipment in low- and middle-income countries are inoperative due to lack of maintenance, obsolescence, or absence of spare parts (Rowan, 2024). In the Brazilian context, this situation is aggravated by the fragmentation of decision-making processes, the scarcity of standardized information, and the absence of criteria for acquisition, disposal, or reintegration of assets (Aidar Neto, 2024; Toscas et al., 2023).

In this scenario, digital transformation can act as a vector of structural change. The integration of Industry 4.0 technologies into DMD management processes has the potential to overcome historical bottlenecks, ensuring greater efficiency, patient safety, and rational use of public resources (Daú et al., 2019b). Moreover, by enabling continuous monitoring and real-time traceability, these technologies create opportunities for circular practices, extending the useful life of equipment and reducing environmental impacts (Zardo et al., 2025).

Thus, the guiding question of this study is: what Industry 4.0 technologies can support circular and sustainable management of the life cycle of durable medical devices in Brazilian public hospitals? To answer this, the article aims to analyze the life cycle management of DMDs in medium- and high-complexity SUS healthcare units and to identify Industry 4.0 technologies, through decision-making criteria, capable of supporting circular and sustainable management practices.

2 Theoretical background

2.1 Durable Medical Devices: concept and classification

Medical devices constitute one of the structural foundations of healthcare systems, performing functions that range from prevention and diagnosis to patient monitoring, treatment, and rehabilitation (Iadanza et al., 2021). A medical device is understood as any instrument, apparatus, machine, implant, reagent for in vitro use, software, material, or similar article intended by the manufacturer to be used in humans for specific medical purposes, distinguished from medicines by acting through physical or mechanical means rather than pharmacological or metabolic mechanisms (Aronson; Heneghan; Ferner, 2020; Ravichandran et al., 2020). This conceptual distinction is fundamental, as it defines the regulatory frameworks that guide the manufacturing, use, and traceability of these products (Iadanza et al., 2021).

The classification of medical devices is primarily determined by the risk associated with the patient and the user, being the predominant approach worldwide (Roopalakshmi et al., 2025). Among the main classification criteria are the degree of risk, invasiveness, duration of contact with the body, and intended use. Thus, Class I devices represent low risk, such as dressings; Class IIa/II devices correspond to moderate risk, such as thermometers and imaging equipment; while Class IIb/III devices include high-risk devices, such as stents, pacemakers, or long-term implantable prostheses (Ravichandran et al., 2020).

Standardization is another central aspect of regulation, enabled by systems such as the Global Medical Device Nomenclature (GMDN), the Universal Medical Device Nomenclature System (UMDNS), and the National Classification of Medical Devices (CND), which forms the basis of the European Medical Device Nomenclature (EMDN) (Iadanza et al., 2021; Kartavtsev; Slabkiy, 2023). These systems not only facilitate traceability and maintenance but also strengthen health surveillance, acquisition planning, and regulatory transparency (Aidar Neto, 2024).

In Brazil, the National Health Surveillance Agency (ANVISA) regulates medical devices through RDC N°. 751/2022, which organizes products into four classes (I to IV) according to their complexity and potential risk (ANVISA, 2022). RDC N°. 579/2021 regulates the reuse and reprocessing of medical devices, establishing parameters for sanitary safety and traceability (ANVISA, 2021). Although these regulations bring the country closer to international practices, their implementation in the SUS still faces challenges, such as the

fragmentation of decision-making processes and the absence of standardized inventories (Aidar Neto, 2024; Toscas et al., 2023).

In this context, DMDs play a strategic role. They are reusable, high-cost, long-life-cycle equipment, such as ventilators, multiparameter monitors, infusion pumps, dialysis equipment, and anesthesia machines (Iadanza et al., 2021; Roopalakshmi et al., 2025). The efficient management of these devices is crucial both for patient safety and for the economic and financial sustainability of healthcare services (Hoveling et al., 2024; Leppälä; Vornanen; Savinen, 2023). However, the absence of standardized inventories, structured maintenance plans, and clear procedures for acquisition, management, and disposal still results in underutilization, waste, and potential risks to care delivery (Tortorella et al., 2022; Toscas et al., 2023).

2.2 Industry 4.0 Digital Technologies and Management Criteria for DMDs in the SUS

Industry 4.0 digital technologies have become central to the transformation of healthcare systems worldwide, offering tools to increase efficiency, ensure traceability, and enable more sustainable models of care (Beltrami et al., 2021; Ghobakhloo et al., 2021). In hospital environments, these technologies provide unprecedented opportunities to address fragmentation in DMD management by strengthening interoperability, optimizing resource use, and expanding analytical capacity through data-driven decision-making. In Brazil, where structural and institutional barriers remain significant, the exploration of these technologies represents not only an opportunity but also a necessity for aligning the SUS with international advances and building a digitally enabled, circular model of hospital management.

Within this scenario, the Internet of Things (IoT) and Smart Sensors stand out as technologies capable of enabling continuous monitoring, integration with hospital systems, and predictive maintenance of equipment, reducing failures and increasing operational availability (Alasa, 2021; Swayamsiddha et al., 2025; Wójcicki et al., 2022). The massive data flows generated by these devices demand the application of Big Data & Analytics, which can reveal usage patterns, optimize maintenance strategies, and correlate technical performance with clinical outcomes (Schlemitz; Mezhuyev, 2024; Swayamsiddha et al., 2025). Complementarily, Artificial Intelligence and Machine Learning expand analytical capacity, automating fault detection and supporting real-time decision-making by hospital managers (Deepa et al., 2023; Omprakash et al., 2024).

Cloud Computing and Digital Twins also offer robust solutions for interoperability and scenario simulation. The cloud provides scalable infrastructure for distributed data storage and processing, enabling collaboration between technical and clinical areas (Krotkiewicz; Szykaruk; Stachyra, 2025). Digital Twins, in turn, create virtual replicas of devices, allowing the prediction of failures, testing of usage strategies, and planning of maintenance without interrupting actual equipment operation (Tao et al., 2019). Technologies such as Blockchain strengthen traceability and the security of critical information, ensuring record integrity, maintenance history, and regulatory compliance (Faramondi et al., 2019; Kumar; Gupta; Kumar, 2022).

Other emerging solutions complete this digital ecosystem. 3D Printing enables on-demand manufacturing of parts and the development of personalized prostheses, reducing costs and logistical times (Nascimento et al., 2019; Piscicelli, 2023; Schlemitz; Mezhuiev, 2024). Collaborative Robotics, in turn, supports repetitive activities in maintenance processes and hospital logistics, increasing precision and efficiency (Han et al., 2024). Drones are already being tested for the rapid transport of parts and supplies in complex hospital environments (Hollenbeck; Zulevic; Chen, 2021; Suthagar; Mishra, 2024a). Augmented and Virtual Reality create immersive training and maintenance support environments, innovatively qualifying technical teams (Rowan, 2024). Finally, Cyber-Physical Systems integrate physical devices and digital models, promoting automatic adjustments in operational parameters and ensuring greater reliability in critical life-support equipment (Han et al., 2024).

In this technological and institutional framework, the strategic management of DMDs requires the articulation of multiple criteria, which act as bridges between regulatory compliance, operational efficiency, and digital transformation. The most relevant include:

- (i) Interoperability and Integration (II), enabling equipment to interact with hospital digital systems (Kumar; Chatterjee, 2024; Kumar; Gupta; Kumar, 2022);
- (ii) Data Security and Privacy (DSP), in compliance with the General Data Protection Law (LGPD) (Abdel-Basset; Mohamed; Chang, 2025; Das; Karmakar; Saha, 2022; Kumar; Chatterjee, 2024; Schmidt et al., 2024);
- (iii) Resource Efficiency and Cost Reduction (RECR) (Karatas et al., 2022; Kute; Tyagi; Aswathy, 2022; Wanyama et al., 2024);
- (iv) Operational Efficiency (OE) (Faramondi et al., 2019; Krotkiewicz; Szykaruk; Stachyra, 2025; Mishra; Singh; Agarwal, 2022; Osama et al., 2023);
- (v) Patient-Centered Care (PCC) (Mishra; Singh; Agarwal, 2022; Osama et al., 2023;

Sriramalakshmi; Vondivillu; Govind, 2022);

- (vi) Organizational Transformation and Workforce Training (OTCB) (Joshi, 2022; Krotkiewicz; Szykaruk; Stachyra, 2025; Kute; Tyagi; Aswathy, 2022);
- (vii) Environmental Sustainability (ES), aiming to extend the life cycle and reduce waste (Abdel-Basset; Mohamed; Chang, 2025; Kumar; Chatterjee, 2024; Oluwadare et al., 2024);
- (viii) Implementation Feasibility (IF) (Ghosh; Banerji, 2024; Krotkiewicz; Szykaruk; Stachyra, 2025; Oluwadare et al., 2024); and
- (ix) Adaptability and Scalability across Hospital Sizes (ASH) (Hazra et al., 2023; Kumar; Gupta; Kumar, 2022; Wanyama et al., 2024).

These criteria are fundamental for guiding public managers in choosing solutions capable of aligning safety, innovation, and sustainability. They demonstrate that the challenges faced by the SUS are not restricted to operational bottlenecks but extend to issues of governance, training, interoperability, and alignment with global standards. This context reveals a fertile field for the introduction of digital technologies capable of addressing fragmentation and transforming DMDs into strategic assets for sustainable healthcare delivery.

3 Methods

This study is characterized as applied research, with a qualitative and quantitative nature, and an exploratory-descriptive design (Gil, 2022). The adopted approach sought to integrate the empirical observation of the life cycle of DMDs in hospital units with the multi-criteria evaluation of Industry 4.0 digital technologies, aiming to propose guidelines for the sustainable digital transformation of healthcare, as proposed by Rossetti et al. (2024).

The initial stage of the research involved technical visits to medium- and high-complexity healthcare units located in three municipalities of Rio Grande do Norte (Macaíba, Parnamirim, and Currais Novos). These units were selected due to their strategic relevance in regional care, encompassing different levels of complexity and distinct management arrangements. The sample included two municipal hospitals (one of them specialized in maternal and childcare), three regional hospitals, and two Emergency Care Units (UPAs), representing referral services for hospitalization, urgent care, and emergencies. In addition to hospital institutions, two Municipal Health Secretariats were also included, from Macaíba/RN and Sobral/CE, due to their centralized role in the acquisition, maintenance, and management of flows related to DMDs.

The information systematized in Table 13 was obtained from public databases of the Ministry of Health, such as TabNet/DataSUS and the National Registry of Health Establishments (CNES), as well as internal reports provided by the institutions themselves. These data include the structural and functional characterization of each unit, such as the level of healthcare provided, the number of beds available under SUS, the average number of procedures performed over four consecutive months (March to June 2025), and the specific management arrangements. This characterization was fundamental to support the mapping of DMD flows, providing inputs for the comparative analysis between different institutional contexts and their implications for the adoption of digital management technologies.

In the second stage, the objective was to identify criteria guiding the selection of digital technologies applicable to the management of DMDs in hospitals. To this end, a consultation was conducted with specialists working in areas related to I4.0 and healthcare, including hospital management professionals, clinical engineers, researchers, and consultants. These specialists were invited to evaluate the relevance of nine criteria widely discussed in the literature and adapted to the hospital context: interoperability and integration, data security and privacy, resource efficiency and cost reduction, operational efficiency, patient-centered care, organizational transformation and training, environmental sustainability, implementation feasibility, and adaptability and scalability in hospitals.

The prioritization of these criteria was carried out using the Best-Worst Method (BWM), developed by Rezaei (2015, 2016). The BWM is a multi-criteria technique that presents advantages over traditional methods such as AHP, as it requires fewer pairwise comparisons and generates more consistent results (Rezaei, 2015, 2016). Moreover, its linear formulation allows for the calculation of weight vectors that minimize inconsistency in judgments (Liang; Brunelli; Rezaei, 2020).

The application of the method followed five steps: (i) definition of decision criteria; (ii) selection of the criterion considered the most important (best) and the least important (worst); (iii) assignment of values between 1 and 9, indicating the preference of the best criterion over the others; (iv) assignment of values between 1 and 9, expressing the preference of the other criteria over the worst; and (v) resolution of the linear programming model to obtain the weights of each criterion and the consistency ratio (CR). These steps were defined based on Rezaei (2015, 2016), while the CR was determined following Liang, Brunelli, and Rezaei (2020). The calculation was carried out using a spreadsheet made available by the author at <https://bestworstmethod.com/>.

Table 13 – Structural and functional characterization of the healthcare units analyzed

Nº	Code	Type of Institution	Location	Level of Care	Average Procedures per Month ⁴	Number of SUS Beds ²	Type of Management	Relevance to the Research	Type of Care
1	HM1	Municipal Hospital	Parnamirim/ RN	Emergency and Urgent Care	156.136 ¹	66	Municipal Management	Provides hospitalizations and medium-complexity procedures for childbirth and care of children up to 2 years old.	Open Access + Referrals
2	HM2	Municipal Hospital	Parnamirim/ RN	Emergency and Urgent Care	10.118 ¹	18	Municipal Management	Provides hospitalizations and medium-to high-complexity procedures.	Open Access + Referrals
3	HR1	Regional Hospital	Parnamirim/ RN	Emergency and Urgent Care	370.396 ¹	135	State/Municipal Management	Provides hospitalizations and medium-to high-complexity procedures.	Open Access + Referrals
4	HR2	Regional Hospital	Currais Novos/ RN	Medium Complexity Care	123.365 ¹	78	State/Municipal Management	Only hospitals in the city offering inpatient care, with its own device management.	Open Access + Referrals
5	HR3	Regional Hospital	Macaíba/ RN	Medium Complexity Care	70.843 ¹	54	State/Municipal Management	Provides hospitalizations and medium-complexity procedures.	Closed Access
6	UPA1	Emergency Care Unit (ECU)	Parnamirim/ RN	Emergency and Urgent Care	24.666 ³	8	Municipal Management	Strategic unit for emergency care in the metropolitan region.	Open Access + Referrals
7	UPA2	Emergency Care Unit (ECU)	Macaíba/ RN	Emergency and Urgent Care	19.606 ³	7	Municipal Management	High patient flow and an essential role in triage and stabilization of patients.	Open Access + Referrals
8	SM1	Municipal Health Secretariat	Macaíba/ RN	Public Management	—	—	—	Coordinates centralized purchasing, waste management, and hospital maintenance.	—
9	SM2	Municipal Health Secretariat	Sobral/ CE	Public Management	—	—	—	Responsible for planning and standardizing local flows and processes. Coordinates purchasing/maintenance of units without financial autonomy.	—

Source: Research Data (2025). Legend: ¹<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/defthtm.exe?sih/cnv/sparn.def>

² <https://cnes.datasus.gov.br/pages/estabelecimentos/consulta.jsp>

³ Internal report provided by the unit. ⁴ Average number of procedures performed between March, April, May, and June.

A total of 11 specialists participated in this stage, whose characteristics are presented in Table 14. Each specialist was identified by a code to preserve confidentiality. Following methodological recommendations, evaluations with a CR above the acceptable threshold were discarded from the final consolidation. The weight of each criterion was obtained by averaging the consistent judgments, forming the prioritization matrix used in this study.

Table 14 – Characterization of the specialists participating in the study

Code	Position/Role	Field of Expertise	Years of Experience in the Area	State (UF)
R1	University Professor	Production Engineering	3 to 5 years	Santa Catarina
R2	University Professor / Entrepreneur	Software Development	More than 10 years	Ceará
R3	Clinical Engineering Technician	Full Clinical Engineering Technician	5 to 10 years	São Paulo
R4	University Professor	Information Science and Management	More than 10 years	Paraná
R5	University Professor	Production Engineering	More than 10 years	Minas Gerais
R6	Process Engineering Analyst II	Operational Excellence Consultant	More than 10 years	Ceará
R7	Technical and University Professor	Information Systems Development	More than 10 years	Rio Grande do Norte
R8	University Professor	Information Systems Development	3 to 5 years	Rio Grande do Norte
R9	Senior Developer	Information Systems Development	More than 10 years	São Paulo
R10	Continuous Improvement Analyst	Specialist / experienced in Industry 4.0 technologies	3 to 5 years	Ceará
R11	Information Technology Coordinator	IT Professional and MSc in Information Technology	More than 10 years	Rio Grande do Norte

Source: Research Data (2025).

In the third stage, the 13 Industry 4.0 technologies identified in the literature review were evaluated by the same specialists: Internet of Things (IoT), Big Data & Analytics (BDA), Artificial Intelligence (AI), Cloud Computing (CC), 3D Printing (I3D), Cyber-Physical Systems (CPS), Blockchain (BC), Collaborative Robotics (CR), Drones (D), Augmented/Virtual Reality (AR-VR), Machine Learning (ML), Digital Twins (DT), and Smart Sensors (SS). The evaluation consisted of assigning scores from 1 to 9 to indicate the relevance of each technology in relation to each of the previously defined criteria.

For the purposes of this article, the focus was placed on the scenario associated with the criterion with the highest weight identified by the BWM method, to highlight the relative contribution of the technologies within this specific context. This methodological approach makes it possible to integrate the qualitative analysis of the DMD life cycle with a robust

quantitative assessment of digital technologies, thereby providing consistent evidence to support the formulation of management guidelines.

4 Results and Discussion

4.1 Mapping of the Management of DMDs in Public Healthcare Units

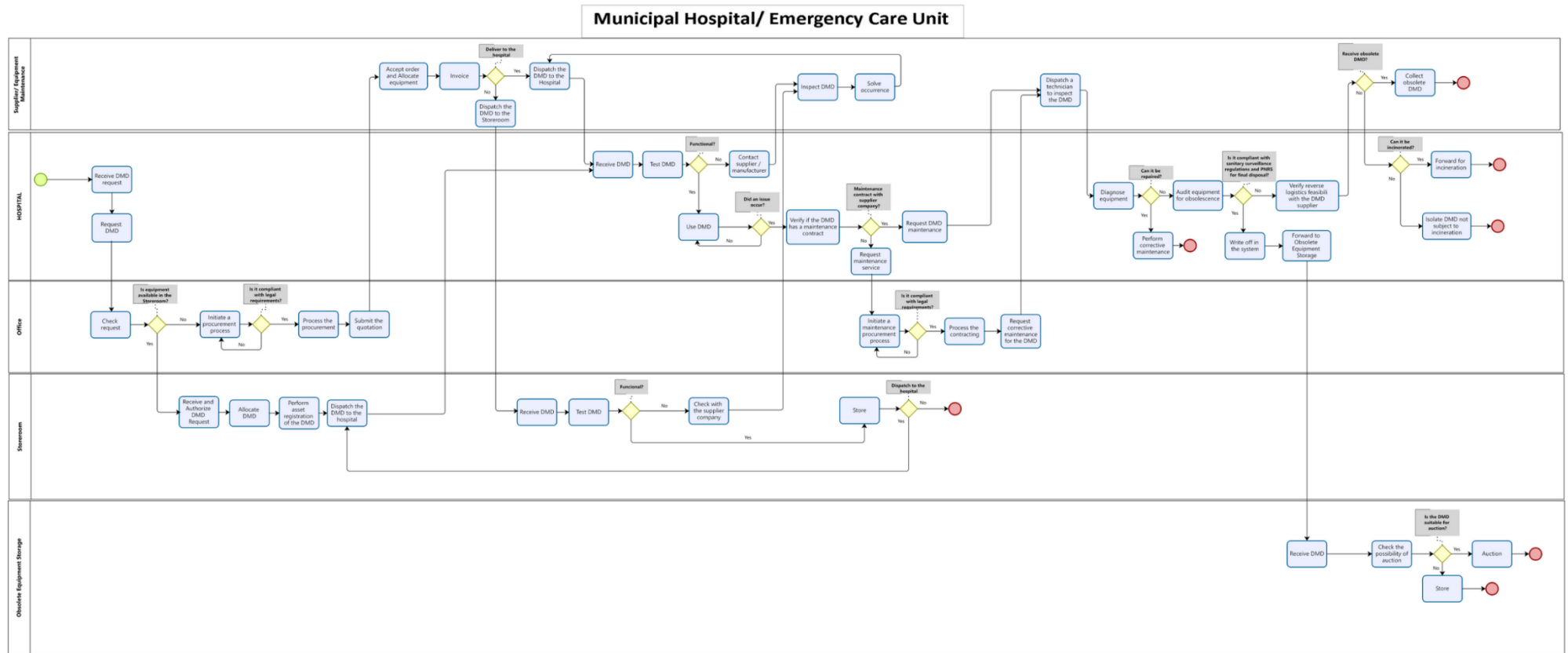
The analysis of the data collected made it possible to understand the acquisition, use, and disposal flows of DMDs in the different units investigated. Overall, it was observed that management follows very similar logic, although it presents specific particularities depending on the institutional context.

In the Emergency Care Unit (ECUs) and municipal hospitals analyzed, a lack of financial autonomy was identified, which transfers to the municipal health secretariats the responsibility for bidding, acquisition, and disposal processes of these devices. This arrangement creates administrative dependence and extends the timelines for replacement or incorporation of technologies, as also highlighted in studies analyzing process centralization in public health systems (Hoveling et al., 2024; Rowan, 2024). Depending on the size of the equipment and the nature of the contract signed, delivery may be carried out directly by the supplier company, which assumes responsibility for delivering the device to the hospital unit.

Once received, the DMD undergoes technical inspection and testing to assess its usability. If approved, it is put into operation; otherwise, the supplier company is contacted for repair or replacement. This management logic, predominantly corrective and dependent on the supplier during the warranty period, reflects practices described as insufficient to ensure reliability and extend the life cycle of equipment (Tortorella et al., 2022; Toscas et al., 2023). The absence of institutional plans for preventive or predictive maintenance reveals the fragility of a model that prioritizes emergency responses to the detriment of long-term sustainability strategies.

The flowchart on Figure 15 illustrates the main steps in the acquisition, inspection, use, maintenance, and disposal of durable medical devices in ECUs and municipal hospitals, highlighting the lack of autonomy, dependence on suppliers, and absence of preventive maintenance strategies.

Figure 15 – Life cycle of DMDs in Municipal Hospitals/ECUs from acquisition to disposal



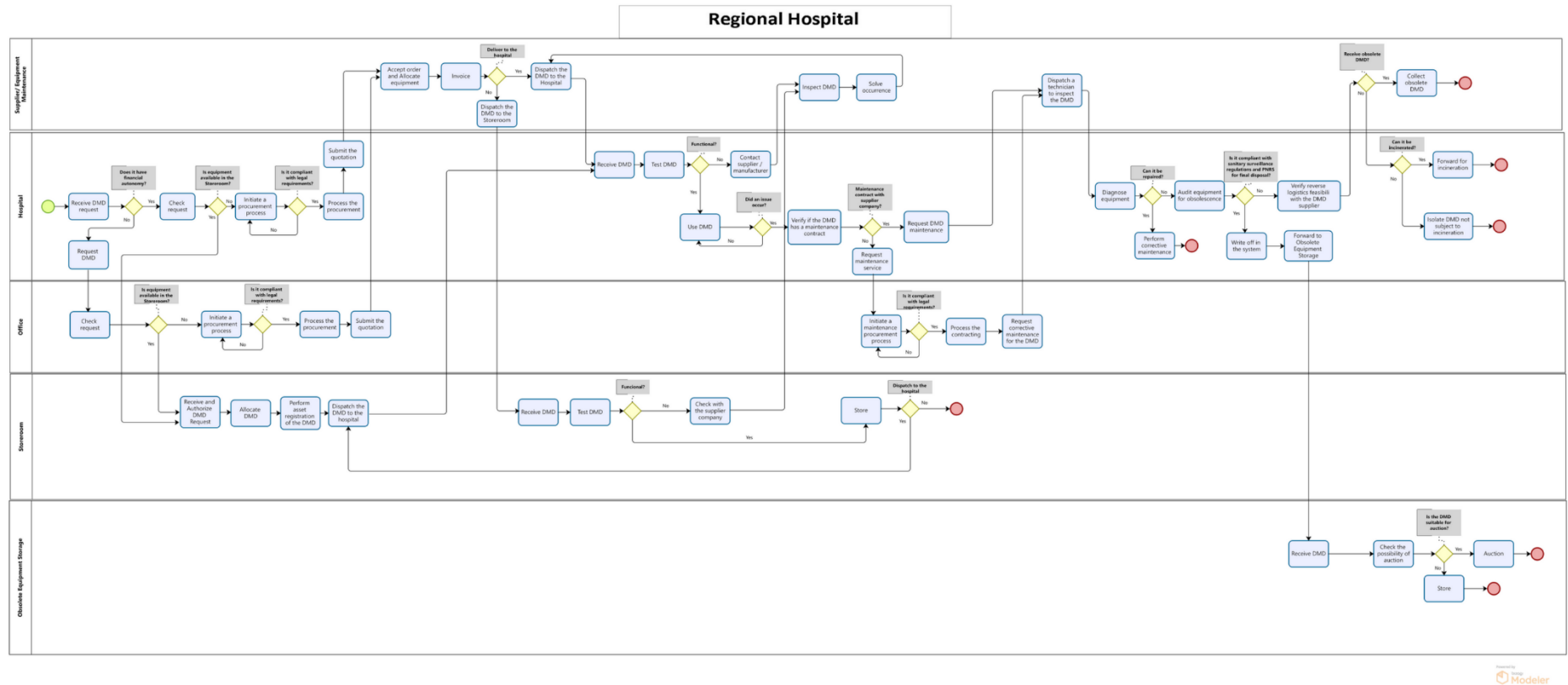
Another critical point is the absence of formalized inventories, as none of the units surveyed had digitized or automated systems to record the availability, location, and condition of DMDs. This scenario contrasts with international recommendations, which emphasize computerized inventories as essential tools for traceability, resource optimization, and evidence-based decision-making (Iadanza et al., 2021; Kartavtsev; Slabkiy, 2023). Recent studies, such as those by Aidar Neto (2024) and Toscas et al. (2023), show that the lack of systematic documentation compromises hospital asset management, resulting in waste, underutilization, and risks of service discontinuity.

In cases where DMDs present failures outside the warranty period, it is verified whether corrective maintenance contracts are linked to the purchase. If they exist, the company provides technical support; if not, the obsolescence process begins. The municipal secretariat is then informed, and an auditor evaluates the device's condition to determine its final destination, which may include incineration, chemical treatment, storage, or auction. Some studies indicate that the absence of clear protocols for obsolescence and disposal results in fragmented and often environmentally inadequate decisions, reinforcing the need for stricter national guidelines aligned with the National Solid Waste Policy (PNRS) (Elmassah, 2023; Jabbour et al., 2020).

In regional hospitals, the process is similar, but with variations related to financial autonomy. In some cases, hospitals can conduct their own bidding processes, although still in dialogue with state secretariats. While this practice speeds up acquisition, it does not resolve the structural problem of the absence of integrated inventories and digital systems that favor networked management. According to Hoveling et al. (2024), the lack of integration between local and state systems hampers the efficient allocation of resources, perpetuating bottlenecks in hospital management.

The flowchart on Figure 16 presents the management logic in regional hospitals, where partial financial autonomy allows some flexibility in procurement, but challenges persist in terms of integrated inventories, digital systems, and coordination with state health secretariats.

Figure 16 – Life cycle of DMDs in Municipal Hospitals/ECUs from acquisition to disposal



Source: Data Research (2025). Link: https://drive.google.com/file/d/1DpsvAOynhv_kGQsvwrw667JLeNt36lwP/view?usp=sharing

Thus, the flowcharts developed from the mapping of practices in municipal hospitals, ECUs, and regional hospitals highlight critical gaps that go beyond formal regulation, corroborating the literature that points out that DMD management requires not only normative processes but also robust information systems capable of coordinating planning, maintenance, and equipment disposal within a life cycle logic. The absence of such management instruments, as evidenced in this research, compromises not only economic efficiency but also patient safety and environmental sustainability, reinforcing the urgency of digital solutions aligned with Industry 4.0 to overcome these challenges.

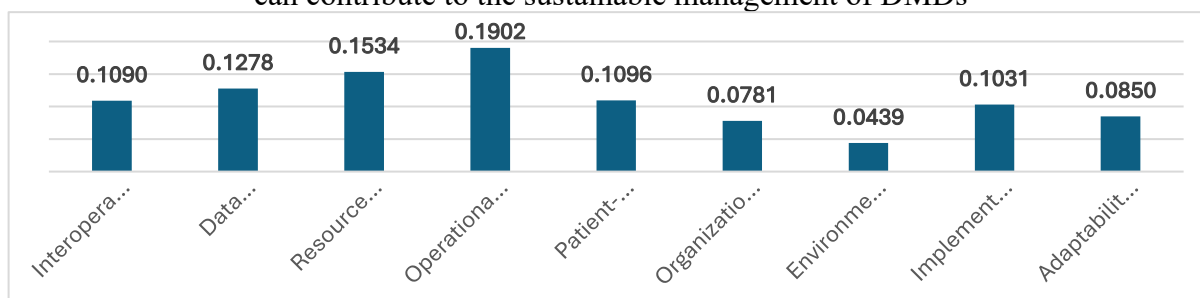
4.2 Industry 4.0 Technologies for DMD Management: Analysis and Prioritization

The prioritization process of I4.0 technologies, conducted through the application of the BWM method, made it possible to identify the most relevant criteria to guide hospital managers in selecting digital solutions aimed at the sustainable management of DMDs. The consolidated results of this method are presented in Table 15, which shows the average weights assigned to the criteria.

Analyzing the results presented in Table 15, the Consistency Ratio (CR) of respondent R3 presented a value above the threshold, which indicates inconsistency in their responses. Therefore, the average weights was calculated without considering R3's answers.

Figure 17 demonstrates the predominance of Operational Efficiency over the other criteria, confirming its central role in managerial decision making. It is also observed that criteria such as Resource Efficiency and Cost Reduction (RECR) and Data Security and Privacy (DSP) showed relevant intermediate weights, while Environmental Sustainability (ES) obtained the lowest weight, indicating that, despite its regulatory importance, it is still not perceived as a decisive factor when selecting digital technologies.

Figure 17 – Average weights associated with the criteria for selecting I4.0 technologies that can contribute to the sustainable management of DMDs



Source: Research Data (2025).

Table 15 – BWM Prioritization Matrix: consolidated weights of the evaluation criteria for I4.0 technologies applied to DMD management

Criteria/ Respondent	Interoperability and Integration	Data Security and Privacy	Resource Efficiency and Cost Reduction	Operational Efficiency	Patient- Centered Care	Organizational Transformation and Workforce Training	Environmental Sustainability	Implementation Feasibility	Adaptability and Scalability across Hospital Sizes	Input-Based CR
R1	0.1046	0.1569	0.1569	0.2473	0.1046	0.0627	0.0258	0.0784	0.0627	0.3095
R2	0.1046	0.1569	0.1569	0.2473	0.1046	0.0627	0.0258	0.0784	0.0627	0.0417
R3	0.0988	0.0988	0.0988	0.1790	0.0988	0.1481	0.0309	0.0988	0.1481	0.8333
R4	0.1046	0.1569	0.1569	0.2473	0.1046	0.0627	0.0258	0.0784	0.0627	0.1429
R5	0.1046	0.1569	0.1569	0.2473	0.1046	0.0627	0.0258	0.0784	0.0627	0.2857
R6	0.1046	0.1569	0.1569	0.2473	0.1046	0.0627	0.0258	0.0784	0.0627	0.0500
R7	0.1046	0.1569	0.1569	0.2473	0.1046	0.0627	0.0258	0.0784	0.0627	0.0972
R8	0.1016	0.0726	0.3075	0.0847	0.0847	0.1016	0.0357	0.0847	0.1270	0.2143
R9	0.1183	0.0920	0.1183	0.1035	0.0920	0.1380	0.1164	0.1183	0.1035	0.3194
R10	0.1184	0.1184	0.1053	0.1053	0.1053	0.1184	0.1053	0.1053	0.1184	0.3194
R11	0.1244	0.0533	0.0622	0.1244	0.1866	0.0466	0.0262	0.2520	0.1244	0.0714
Average without R3	0.1090	0.1278	0.1534	0.1902	0.1096	0.0781	0.0439	0.1031	0.0850	
Ranking	5°	3°	2°	1°	4°	8°	9°	6°	7°	

Source: Research Data (2025).

Table 16 – Ranking of I4.0 digital technologies for DMD management

I4.0 Technology	Internet of Things	Big Data & Analytics	Artificial Intelligence	Cloud Computing	3D Printing	Cyber- Physical Systems	Blockchain	Blockchain	Drones	Augmented/ Virtual Reality	Machine Learning	Digital Twins	Smart Sensors
Sum of Scores without R3	66	72	72	66	51	53	55	54	42	53	64	56	58
Ranking	2°	1°	1°	2°	9°	8°	6°	7°	10°	8°	3°	5°	4°

Source: Research Data (2025).

In the next stage, the weights obtained were used to evaluate the 13 digital technologies analyzed in this study, as illustrated in Table 16.

The prioritization showed that AI and BDA achieved the highest scores, confirming the perception of specialists that these solutions are currently the most relevant for ensuring operational efficiency gains. This finding is consistent with the literature, which highlights the capacity of AI and BDA to transform clinical and operational data into strategic information, enabling faster diagnoses, predictive maintenance, and efficient resource allocation (Ali; Kannan, 2022b; Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021a; Kazançoglu et al., 2021).

Next, Cloud Computing and IoT stood out as technologies that enhance the integration and interoperability of hospital systems, corroborating studies that emphasize their relevance for real-time tracking of DMDs and for creating collaborative healthcare management platforms (Hoosain; Paul; Ramakrishna, 2020; Liu; Song; Liu, 2023b). In addition, ML and SS, although with relatively lower scores, were also perceived as promising technologies, capable of strengthening diagnostic efficiency and the reliability of monitoring processes, aligning with international trends in hospital digitalization (Han et al., 2024; Rowan, 2024).

On the other hand, technologies such as Drones, 3D Printing, AR/VR, and CPS were found to be less relevant in the analyzed context. In the case of drones, the low score reflects the Brazilian reality, marked by regulatory and structural limitations that hinder their application in hospital logistics processes, unlike international experiences in developed countries (Bongomin et al., 2020; Pandey et al., 2022). Similarly, 3D Printing, AR/VR, and CPS are still at an incipient stage of adoption, lacking infrastructure, investment, and professional training to generate an effective impact on DMD management within the SUS.

These results demonstrate that, although the full adoption of emerging technologies is still limited, there is a consistent movement towards hospital digitalization, starting with the prioritization of solutions with proven capacity for integration and process optimization. In this sense, the combination of AI, BDA, CC, and IoT emerges as a strategic initial core to support the digital health transition, consistent with what has been reported in the international literature on digital transformation in hospitals.

5 Theoretical, Practical, and Managerial Contributions

The results of this study offer significant contributions in three complementary dimensions. From a theoretical perspective, the research advances literature by integrating the

concepts of DMDs with the application of Industry 4.0 digital technologies, under the lens of digital transformation in public hospitals.

Although there is a growing body of research on circular economy in healthcare and on the role of emerging technologies in organizational sustainability, studies that establish a direct relationship between DMD management and the digitalization of hospital processes are still scarce. In this sense, the multi-criteria analysis conducted here, by prioritizing criteria such as operational efficiency, cost reduction, security, and interoperability, provides a solid conceptual basis for the formulation of new models of intelligent healthcare management. This aligns with the outcomes of authors such as Bai et al. (2022, 2023), Beltrami et al. (2021) e Ghobakhloo et al. (2021), who point to Industry 4.0 as a vector of systemic transformation.

From a practical standpoint, the study contributes by offering a detailed mapping of the acquisition, use, and disposal flows of DMDs at different levels of hospital management, identifying critical gaps related to the absence of inventories, lack of digitized systems, and the predominance of corrective practices over preventive planning. This finding resonates with recent studies that highlight the fragility of manual and fragmented processes in hospital environments, which compromise equipment traceability and hinder evidence-based decision-making (Jabbour et al., 2020; Rowan, 2024).

By proposing objective criteria for the selection of digital technologies, the study guides hospital managers on how to align their choices with real needs for efficiency and sustainability, suggesting concrete pathways to overcome operational barriers and improve the management of critical assets for healthcare delivery.

At the managerial level, the main contribution lies in the formulation of guidelines that enable public hospital managers and health secretariats to understand which digital technologies should be prioritized to enhance DMD management. The prioritization of Artificial Intelligence and Big Data & Analytics as the most relevant technologies reinforces the need for investments in data analysis systems, predictive maintenance, and real-time decision support, which are fundamental elements for the consolidation of smart hospitals.

Furthermore, by pointing to emerging technologies such as Machine Learning, Smart Sensors, and IoT as promising tools, this study indicates the path toward building a more connected, secure, and sustainable hospital ecosystem, aligned with the SUS Digital agenda and the National Solid Waste Policy (PNRS).

These findings have direct implications for the design of public policies and for the training of managers, as they demonstrate that the digital transformation of healthcare depends

not only on technological infrastructure but also on the integration of strategic planning, institutional governance, and organizational innovation.

Thus, the contributions of this study go beyond the academic field by providing inputs applicable to the reality of Brazilian public hospitals, strengthening the theoretical foundation of digital health management, offering practical tools for hospital operations, and pointing to strategic directions for management and policymaking.

6 Conclusions

The management of DMDs in public hospitals represents one of the greatest contemporary challenges for healthcare sustainability, especially in developing countries, where infrastructure and governance limitations compromise process efficiency. Despite the growing recognition of the importance of digitalization, there are still few studies that systematically connect hospital managers' decision-making criteria to the concrete possibilities offered by Industry 4.0 technologies.

This study advances in this direction by combining the detailed mapping of DMD management flows with the application of the BWM method, providing empirical and analytical evidence that makes it possible to understand which criteria and technologies should be prioritized in the construction of smarter and more sustainable hospital models.

The results revealed that Operational Efficiency emerged as the most decisive criterion when opting for the adoption of digital technologies applied to DMD management. This finding reflects the immediate need to reduce failures, increase equipment availability, and optimize processes in a scenario marked by budget constraints and high care demand. Thus, technological choices by managers tend to be strongly influenced by solutions capable of generating tangible gains in operational performance.

Considering this criterion, Artificial Intelligence and Big Data & Analytics were identified as the most relevant technologies, corroborating international literature that highlights these tools as pillars for the digitalization of healthcare systems and evidence-based management. Other technologies, such as Cloud Computing and the Internet of Things, also stood out, revealing their potential to enhance integration and support traceability and interoperability of devices. Emerging technologies such as Machine Learning and Smart Sensors were also valued, signaling evolutionary trends in the hospital context.

On the other hand, resources such as drones, 3D printing, augmented/virtual reality, and

cyber-physical systems were found to be less relevant at this time, reflecting contextual barriers such as infrastructure limitations, costs, and alignment with the immediate demands of the SUS.

Beyond the multi-criteria analysis, the mapping of DMD management flows in municipal hospitals, ECUs, and regional hospitals revealed important structural weaknesses, such as the absence of inventories, the lack of digitized records, and the predominance of reactive practices in equipment maintenance. These gaps reinforce the urgency of digital transformation as a structuring axis of hospital sustainability, indicating that the implementation of digital technologies must be accompanied by institutional changes and governance mechanisms that ensure their effectiveness.

In terms of implications, the study contributes to theoretical advancement by consolidating priority criteria and technologies that dialogue with the literature on circular economy and I4.0 in healthcare, while also generating practical and managerial inputs by pointing out pathways for hospital managers and public policymakers. The prioritization of digital technologies based on objective criteria strengthens the decision-making capacity of institutions while broadening perspectives for the creation of smarter, more resilient, and more sustainable hospitals.

Thus, although this study was conducted in the context of Brazilian public hospitals and based on the perceptions of selected specialists, its findings open avenues for broader research agendas. Future investigations should consider private hospitals, different regional realities, and international comparisons, as well as the application of complementary multi-criteria methods to deepen the analysis of emerging technologies. Even so, the evidence presented here consolidates a relevant contribution to the field of hospital management, by demonstrating how Industry 4.0 technologies can redefine practices, support strategic decisions, and drive the transition toward smarter, safer, and more sustainable healthcare systems.

References

- Abdel-Basset, M., Mohamed, R., & Chang, V. (2025). A Multi-Criteria Decision-Making Framework to Evaluate the Impact of Industry 5.0 Technologies: Case Study, Lessons Learned, Challenges and Future Directions. *Information Systems Frontiers*, 27(2), 791–821. <https://doi.org/10.1007/s10796-024-10472-3>
- Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). (2021). Resolução da Diretoria Colegiada – RDC no 579, de 26 de dezembro de 2021. Dispõe sobre os requisitos sanitários para a realização de estudos clínicos com dispositivos médicos no Brasil. seção 1, Brasília, DF, n. 245, p. 201.
- Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). (2022). Resolução da Diretoria Colegiada – RDC no 751, de 15 de setembro de 2022. Dispõe sobre a classificação de risco, regime de notificação e de registro de dispositivos médicos, e dá outras providências. seção 1, Brasília, DF, n. 177, p. 125.

- Aidar Neto, F. M. M. (2024). Gerenciamento de dispositivos e equipamentos médicos baseados e métodos de acreditação internacional JC, QMENTUM e normas ABNT IEC 60601. *RCMOS - Revista Científica Multidisciplinar O Saber*, 2(2), 299–315. <https://doi.org/10.51473/rcmos.v2i2.336>
- Alasa, D. K. (2021). Enhanced business intelligence through the convergence of big data analytics, AI, Machine Learning, IoT and Blockchain. *Open Access Research Journal of Science and Technology*, 2(2), 023–030. <https://doi.org/10.53022/oarjst.2021.2.2.0042>
- Ali, I., & Kannan, D. (2022). Mapping research on healthcare operations and supply chain management: a topic modelling-based literature review. *Annals of Operations Research*, 315(1), 29–55. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04596-5>
- Aronson, J. K., Heneghan, C., & Ferner, R. E. (2020). Medical Devices: Definition, Classification, and Regulatory Implications. *Drug Safety*, 43(2), 83–93. <https://doi.org/10.1007/s40264-019-00878-3>
- Bai, C., Orzes, G., & Sarkis, J. (2022). Exploring the impact of Industry 4.0 technologies on social sustainability through a circular economy approach. *Industrial Marketing Management*, 101(1), 176–190. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2021.12.004>
- Bai, C., Zhou, H., & Sarkis, J. (2023). Evaluating Industry 4.0 technology and sustainable development goals – a social perspective. *International Journal of Production Research*, 61(23), 8094–8114. <https://doi.org/10.1080/00207543.2022.2164375>
- Beltrami, M., Orzes, G., Sarkis, J., & Sartor, M. (2021). Industry 4.0 and sustainability: Towards conceptualization and theory. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127733. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127733>
- Bongomin, O., Yemane, A., Kembabazi, B., Malanda, C., Mwape, M. C., Mpofu, N. S., & Tigalana, D. (2020). Industry 4.0 Disruption and Its Neologisms in Major Industrial Sectors: A State of the Art. *Journal of Engineering*, 2020(1), 1–45. <https://doi.org/10.1155/2020/8090521> WE - Emerging Sources Citation Index (ESCI)
- Brasil. Ministério da Saúde. (2024a). Manual Instrutivo SUS Digital - Planos de Ação. Ministério da Saúde.
- Brasil. Ministério da Saúde. (2024b). Portaria GM/MS no 3.232, de 1o de março de 2024, altera a Portaria de Consolidação GM/MS no 5, de 28 de setembro de 2017, para instituir o Programa SUS Digital. Ministério Da Saúde. https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2024/prt3232_04_03_2024.html
- Chauhan, A., Jakhar, S. K., & Chauhan, C. (2021). The interplay of circular economy with industry 4.0 enabled smart city drivers of healthcare waste disposal. *Journal of Cleaner Production*, 279(1), 123854. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123854> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)
- Das, S., Karmakar, S., & Saha, H. N. (2022). Secure Digital Health Data Management in Internet of Things Using Blockchain and Machine Learning. In *Digital Health Transformation with Blockchain and Artificial Intelligence* (pp. 23–45). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003247128-2>
- Daú, G., Scavarda, A., Scavarda, L. F., & Portugal, V. J. T. (2019). The Healthcare Sustainable Supply Chain 4.0: The Circular Economy Transition Conceptual Framework with the Corporate Social Responsibility Mirror. *Sustainability*, 11(12), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su11123259>
- Deepa, S., Sridhar, K. P., Baskar, S., Mythili, K. B., Reethika, A., & Hariharan, P. R. (2023). IoT-enabled smart healthcare data and health monitoring based machine learning algorithms. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 44(2), 2927–2941. <https://doi.org/10.3233/JIFS-221274>
- Elmassah, S. (2023). Industry 4.0 and Circular Economy: Opportunities of MENA Countries on the Path to the Sustainable Development. *International Journal of Economy, Energy and Environment*, 8(4), 59–81. <https://doi.org/10.11648/j.ijeee.20230804.11>
- Faramondi, L., Oliva, G., Setola, R., & Vollero, L. (2019). IIoT in the Hospital Scenario: Hospital 4.0, Blockchain and Robust Data Management. In *Security and Privacy Trends in the Industrial Internet of Things* (pp. 271–285). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12330-7_13
- Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Grybauskas, A., Vilkas, M., & Petraitė, M. (2021). Industry 4.0, innovation, and sustainable development: A systematic review and a roadmap to sustainable innovation. *Business Strategy and the Environment*, 30(8), 4237–4257. <https://doi.org/10.1002/bse.2867>
- Ghosh, J., & Banerji, O. (2024). The socio-legal challenges of privacy issues in smart healthcare 4.0 ecosystem. *International Journal of Technology, Policy and Management*, 24(2), 145–168.

<https://doi.org/10.1504/IJTPM.2024.137824>

- Gil, A. C. (2022). *Como Elaborar Projetos de Pesquisa* (G. Gen (ed.); 7th edição). Grupo Gen. <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9786559771653>
- Han, H., Yao, J., Wu, Y., Dou, Y., & Fu, J. (2024). Quantum communication based cyber security analysis using artificial intelligence with IoMT. *Optical and Quantum Electronics*, 56(565), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-06185-7> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED)
- Hazra, A., Adhikari, M., Amgoth, T., & Srirama, S. N. (2023). A Comprehensive Survey on Interoperability for IIoT: Taxonomy, Standards, and Future Directions. *ACM Computing Surveys*, 55(1), 1–35. <https://doi.org/10.1145/3485130>
- Hollenbeck, D., Zulevic, D., & Chen, Y. (2021). Advanced leak detection and quantification of methane emissions using sUAS. *Drones*, 5(4). <https://doi.org/10.3390/drones5040117>
- Hoosain, M. S., Paul, B. S., & Ramakrishna, S. (2020). The Impact of 4IR Digital Technologies and Circular Thinking on the United Nations Sustainable Development Goals. *Sustainability (Switzerland)*, 12(23), 10143. <https://doi.org/10.3390/su122310143>
- Hoveling, T., Svindland Nijdam, A., Monincx, M., Faludi, J., & Bakker, C. (2024). Circular economy for medical devices: Barriers, opportunities and best practices from a design perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 208(107719), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107719>
- Iadanza, E., Cerofolini, S., Lombardo, C., Satta, F., & Gherardelli, M. (2021). Medical devices nomenclature systems: a scoping review. *Health and Technology*, 11(4), 681–692. <https://doi.org/10.1007/s12553-021-00567-1>
- Jabbour, C. J. C., Fiorini, P. D. C., Wong, C. W. Y., Jugend, D., Jabbour, A. B. L. D. S., Seles, B. M. R. P., Pinheiro, M. A. P., & Silva, H. M. R. da. (2020). First-mover firms in the transition towards the sharing economy in metallic natural resource-intensive industries: Implications for the circular economy and emerging industry 4.0 technologies. *Resources Policy*, 66(September 2019), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101596>
- Joshi, U. (2022). The Future of AI, IoT, Big Data and Block Chain Technology in Healthcare Industry: In *Transformation in Healthcare with Emerging Technologies* (pp. 175–197). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781003201960-10>
- Karatas, M., Eriskin, L., Deveci, M., Pamucar, D., & Garg, H. (2022). Big Data for Healthcare Industry 4.0: Applications, challenges and future perspectives. *Expert Systems with Applications*, 200, 116912. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116912>
- Kartavtsev, R. L., & Slabkiy, G. O. (2023). Purpose and tasks of the national classifier of medical devices. *Ukraine. Nation's Health*, 4, 96–98. <https://doi.org/10.32782/2077-6594/2023.4/15>
- Kazançoglu, Y., Sagnak, M., Lafci, Ç., Luthra, S., Kumar, A., & Taçoğlu, C. (2021). Big Data-Enabled Solutions Framework to Overcoming the Barriers to Circular Economy Initiatives in Healthcare Sector. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(14), 1–21. <https://doi.org/10.3390/ijerph18147513> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) WE - Social Science Citation Index (SSCI)
- Krotkiewicz, M., Szykaruk, A., & Stachyra, A. (2025). Digital Transformation in Healthcare Management: From Artificial Intelligence to Blockchain. *Wiadomości Lekarskie*, 3, 578–583. <https://doi.org/10.36740/WLek/202445>
- Kumar, A., & Chatterjee, K. (2024). Securing internet of medical devices using energy efficient blockchain for healthcare 4.0. *Cluster Computing*, 27(6), 8333–8348. <https://doi.org/10.1007/s10586-024-04437-z>
- Kumar, A., Gupta, D. N., & Kumar, R. (2022). Integration Aspects of AI, IoT, Big Data, and Blockchain in Healthcare Industry. In *Transformation in Healthcare with Emerging Technologies* (pp. 81–104). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781003201960-5>
- Kute, S. S., Tyagi, A. K., & Aswathy, S. U. (2022). Industry 4.0 Challenges in e-Healthcare Applications and Emerging Technologies. In *Intelligent Interactive Multimedia Systems for e-Healthcare Applications* (pp. 265–290). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6542-4_14
- Leppälä, K., Vornanen, L., & Savinen, O. (2023). Lifecycle extension of single-use medical device sensors: Case study of an engineering sustainability transition program. *Journal of Cleaner Production*, 423(138518),

- 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138518>
- Liang, F., Brunelli, M., & Rezaei, J. (2020). Consistency issues in the best worst method: Measurements and thresholds. *Omega*, 96, 102175. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2019.102175>
- Liu, L., Song, W., & Liu, Y. (2023). Leveraging digital capabilities toward a circular economy: Reinforcing sustainable supply chain management with Industry 4.0 technologies. *Computers & Industrial Engineering*, 178(109113), 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109113>
- Mishra, D., Singh, P., & Agarwal, S. (2022). AI- and IoT-Based Architecture in Healthcare. In *Transformation in Healthcare with Emerging Technologies* (pp. 1–18). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781003201960-1>
- Nascimento, D. L. M., Alencastro, V., Quelhas, O. L. G., Caiado, R. G. G., Garza-Reyes, J. A., Rocha-Lona, L., & Tortorella, G. (2019). Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(3), 607–627. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2018-0071>
- Oluwadare, A., Akintayo, B. D., Babatunde, O. M., & Olanrewaju, O. A. (2024). Assessing the Impact of Healthcare 4.0 Technologies on Healthcare Supply Chain Management: A Multi-Criteria Evaluation Framework. *Logistics*, 8(2), 44. <https://doi.org/10.3390/logistics8020044>
- Omprakash, K., J. S. B., Bajulunisha, A., Kavitha, S., Aiyasamy, V., & S. U. M. (2024). Employing IoT in Biomedical Devices: Improving Remote Health Monitoring, Diagnosis, and Treatment with Sophisticated Sensor Networks and Data Connectivity. 2024 International Conference on Emerging Technologies and Innovation for Sustainability (EmergIN), 674–679. <https://doi.org/10.1109/EmergIN63207.2024.10960857>
- Osama, M., Ateya, A. A., Sayed, M. S., Hammad, M., Pławiak, P., Abd El-Latif, A. A., & Elsayed, R. A. (2023). Internet of Medical Things and Healthcare 4.0: Trends, Requirements, Challenges, and Research Directions. *Sensors*, 23(17), 7435. <https://doi.org/10.3390/s23177435>
- Pandey, S., Twala, B., Singh, R., Gehlot, A., Singh, A., Montero, E. C., & Priyadarshi, N. (2022). Wastewater Treatment with Technical Intervention Inclination towards Smart Cities. *Sustainability*, 14(18), 1–16. <https://doi.org/10.3390/su141811563> WE - Science Citation Index Expanded (SCI-EXPANDED) WE - Social Science Citation Index (SSCI)
- Piscicelli, L. (2023). The sustainability impact of a digital circular economy. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 61, 101251. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2022.101251>
- Ravichandran, R., Balakrishnan, R. P., Batcha, J. S. D., Ravi, A. L., & Sam, N. C. (2020). Medical device: a complete overview. *International Journal of Clinical Trials*, 7(4), 285. <https://doi.org/10.18203/2349-3259.ijct20204487>
- Rezaei, J. (2015). Best-worst multi-criteria decision-making method. *Omega*, 53, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.11.009>
- Rezaei, J. (2016). Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. *Omega*, 64, 126–130. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.12.001>
- Roopalakshmi, S., Paranjay Reddy, N. S., Deelaksha, K., Mythra, K., & Mrudula, R. (2025). Automated Medical Device Classification. *International Journal of Innovative Research in Information Security*, 11(02), 106–109. <https://doi.org/10.26562/ijiris.2025.v1102.07>
- Rossetti, A. P. L., Tortorella, G. L., Bouzon, M., Gao, S., & Chan, T. K. (2024). Identifying Industry 4.0 technologies enablers for knowledge management – a scoping review. *The TQM Journal*, 36(1), 340–360. <https://doi.org/10.1108/TQM-05-2022-0173>
- Rowan, N. J. (2024). Digital technologies to unlock safe and sustainable opportunities for medical device and healthcare sectors with a focus on the combined use of digital twin and extended reality applications: A review. *Science of the Total Environment*, 926(1), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171672>
- Schlemitz, A., & Mezhyuev, V. (2024). Approaches for data collection and process standardization in smart manufacturing: Systematic literature review. *Journal of Industrial Information Integration*, 38, 100578. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2024.100578>
- Schmidt, J., Schutte, N. M., Buttigieg, S., Novillo-Ortiz, D., Sutherland, E., Anderson, M., de Witte, B., Peolsson, M., Unim, B., Pavlova, M., Stern, A. D., Mossialos, E., & van Kessel, R. (2024). Mapping the regulatory

- landscape for artificial intelligence in health within the European Union. *Npj Digital Medicine*, 7(1), 229. <https://doi.org/10.1038/s41746-024-01221-6>
- Sriramalakshmi, P., Vondivillu, S. T., & Govind, A. S. K. (2022). Role of IoT, AI, and Big Data Analytics in Healthcare Industry. In *Transformation in Healthcare with Emerging Technologies* (pp. 19–43). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781003201960-2>
- Suthagar, K. S., & Mishra, U. (2024). Sustainable green circular economic model with controllable waste and emission in healthcare system. *Environment Development and Sustainability*, 1, 1–43. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04254-1>
- Swayamsiddha, S., Nanda, S., Ray, K., Mishra, S. N., Rao, B. N., & Dash, S. K. (2025). Development of an IoT-Enabled Smart Healthcare Monitoring System for Real-Time Patient Health Surveillance. 2025 3rd International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT), 796–800. <https://doi.org/10.1109/IDCIOT64235.2025.10914909>
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. Y. C. (2019). Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, 5(4), 653–661. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- Tortorella, G. L., Fogliatto, F. S., Sunder M, V., Cawley Vergara, A. Mac, & Vassolo, R. (2022). Assessment and prioritisation of Healthcare 4.0 implementation in hospitals using Quality Function Deployment. *International Journal of Production Research*, 60(10), 3147–3169. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1912429>
- Toscas, F. S., Dias, E. M., Dias, M. L., Santos, T. R., & Oliveira, E. J. V. (2023). Management of medical equipment in the Brazilian public health system (SUS), historical situation and the context of the pandemic COVID-19: a cut for lung ventilators. *Health and Technology*, 13(3), 515–521. <https://doi.org/10.1007/s12553-023-00752-4>
- Wanyama, J., Bwambale, E., Kiraga, S., Katimbo, A., Nakawuka, P., Kabenge, I., & Oluk, I. (2024). A systematic review of fourth industrial revolution technologies in smart irrigation: Constraints, opportunities, and future prospects for sub-Saharan Africa. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100412. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100412>
- Wójcicki, K., Biegańska, M., Paliwoda, B., & Górna, J. (2022). Internet of Things in Industry: Research Profiling, Application, Challenges and Opportunities—A Review. *Energies*, 15(5), 1806. <https://doi.org/10.3390/en15051806>
- Zardo, D. J., Granela, A. P., Sehnem, S., & Julkovski, D. J. (2025). Circular supply chain and circular practices: An analysis from the perspective of sustainability and Industry 4.0. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 32(2), 1831–1846. <https://doi.org/10.1002/csr.3022>

PROPOSTAS E CONCLUSÕES DA TESE

7 PROPOSTA DE PLANO DIRETOR PARA GERENCIAMENTO DE DISPOSITIVOS MÉDICOS DURÁVEIS

Proposta a ser compartilhada com o Ministério da Saúde e
a Secretaria de Informação e Saúde Digital

Eliana de Jesus Lopes, Marina Bouzon
Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil.

Apresentação

A crescente complexidade dos sistemas de saúde, caracterizada por pressões demográficas, tecnológicas e financeiras, exige novas formas de governança capazes de conciliar sustentabilidade, inovação e eficiência no uso dos recursos públicos (Govindan et al., 2024; Johannessen, 2022). No contexto brasileiro, esse desafio é particularmente sensível no Sistema Único de Saúde (SUS), que enfrenta simultaneamente demandas crescentes por serviços de alta complexidade e restrições orçamentárias persistentes (Campos; Pereira Jr., 2021). A escassez de diretrizes nacionais para a gestão integrada e circular de Dispositivos Médicos Duráveis (DMDs) representa uma lacuna significativa, uma vez que tais equipamentos concentram alto valor agregado e impacto estratégico sobre a resiliência, transparência, digitalização e a responsabilidade ambiental dos sistemas hospitalares (Beltrami et al., 2021; Bai; Orzes; Sarkis, 2022).

O Plano Diretor de Gestão de Dispositivos Médicos Duráveis (PDGDMD) é uma iniciativa que visa instituir diretrizes estratégicas, normativas, operacionais e tecnológicas para a gestão sustentável de DMDs no âmbito do SUS. Essa proposta parte do reconhecimento da importância desses dispositivos como ativos de alto valor agregado, potencial de reuso e remanufatura, longa vida útil e rastreabilidade, características que os tornam elementos-chave para a transição circular na saúde pública brasileira (Ghobakhloo et al., 2021; Westover, 2024).

A formulação deste Plano Diretor está ancorada nos princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos, da Estratégia de Saúde Digital 2020–2028 (ESD28), da Política Nacional de Informação e Informática em Saúde (PNIIS/2021), do Plano Nacional de Saúde 2024–2027 (PNS24-27), bem como nas diretrizes da Lei nº 14.133/2021, da Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD) e do Índice Nacional de Maturidade em Saúde Digital (INMSD). Sua estrutura também

dialoga diretamente com o Plano Diretor de Tecnologia da Informação e Comunicação (PDTIC) do Ministério da Saúde, reforçando a convergência entre inovação, governança digital, sustentabilidade e responsabilidade social (Savaget et al., 2019; Govindan et al., 2024).

Além do alinhamento com a regulação nacional, o PDGDMD fortalece o compromisso do Brasil com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 3, que visa assegurar saúde e bem-estar, e o ODS 12, voltado para padrões sustentáveis de consumo e produção (ONU, 2015). Ao tratar dos DMDs como recursos estratégicos, o plano contribui para reduzir desperdícios, otimizar investimentos públicos e aumentar a transparência na utilização de equipamentos críticos (Beltrami et al., 2021).

Esta proposta é fruto de um processo técnico-científico articulado a partir de evidências empíricas e revisão sistemática da literatura, e propõe-se a orientar o Ministério da Saúde na definição de ações nacionais que, a partir de sua deliberação, possam ser implementadas em hospitais, Unidades de Pronto Atendimento (UPAs) e, posteriormente, estendidas às demais unidades da rede assistencial. Trata-se, portanto, de um plano que requer governança verticalizada, com planejamento, execução e controle conduzidos pelo nível central do SUS, em linha com a literatura que defende que políticas de saúde duradouras dependem de liderança governamental clara, institucionalização e mecanismos de monitoramento centralizados (Campos; Pereira Jr., 2021; Mintzberg, 1996).

Com o PDGDMD, o Ministério da Saúde avança na construção de um modelo de gestão que compreende os DMDs não apenas como recursos assistenciais, mas como elementos estratégicos para a sustentabilidade do SUS, com capacidade de catalisar transformações institucionais orientadas pelos princípios da Economia Circular (EC), das Tecnologias da Indústria 4.0 (I4.0).

1 Cenário Atual e Fundamentação da Proposta

A gestão de DMDs nos serviços públicos de saúde configura-se, atualmente, como um dos principais desafios para a sustentabilidade institucional, a rastreabilidade tecnológica e a eficiência operacional do SUS. Os estudos de caso realizados nesta tese evidenciaram que a fragmentação dos processos de aquisição, uso e manutenção compromete a eficiência organizacional e dificulta a segurança do paciente. Essa constatação converge com a literatura internacional, que aponta a ausência de padronização e rastreabilidade como fatores que aumentam custos e reduzem a vida útil dos dispositivos (Beltrami et al., 2021; Govindan et al.,

2024).

Apesar do valor estratégico dos DMDs para a qualidade assistencial e para o uso racional dos recursos públicos, o Brasil carece de normativas nacionais capazes de orientar de maneira integrada, digital e sustentável todo o ciclo de vida desses equipamentos. A análise documental conduzida nesta pesquisa revelou que instrumentos recentes do Ministério da Saúde, como o PDTIC, a ESD28 e o PNS24-27, priorizam a digitalização e a governança de dados, mas não abordam de forma específica a gestão de DMDs. Esse diagnóstico decorre de uma análise documental sistemática, realizada a partir de critérios de seleção (vigência, escopo nacional e relevância normativa) e de categorização temática que permitiram condensar as informações desses instrumentos em eixos temáticos. Tal procedimento assegura rigor metodológico e evita a seleção arbitrária de conteúdos, em consonância com as recomendações da literatura sobre formulação de políticas públicas em saúde (Savaget et al., 2019; Qureshi et al., 2024). Essa lacuna reforça a necessidade de um plano dedicado a essa categoria de dispositivos.

O panorama vigente é marcado por uma gestão fragmentada, com baixa integração entre áreas técnicas, ausência de classificação padronizada, registros de uso incompletos ou descontinuados, obsolescência precoce de dispositivos e fraca articulação com práticas de circularidade e inovação tecnológica. Essa realidade foi confirmada tanto a partir da análise de hospitais (2 hospitais municipais e 3 hospitais regionais) e de Unidades de Pronto Atendimento (UPA) (2 UPAS), com base em protocolos de observação do ciclo de vida dos DMDs e aplicação de questionários a gestores hospitalares (Artigo 4), quanto a partir da triangulação com as revisões sistemáticas apresentadas nos Artigos 2 e 3. Tais fragilidades impactam não apenas a eficiência hospitalar, mas também a sustentabilidade ambiental e a credibilidade institucional do SUS frente aos compromissos internacionais da Agenda 2030 (ONU, 2015).

Em outros setores produtivos, a adoção de princípios da EC e das Tecnologias da I4.0 já demonstra resultados expressivos na redução de resíduos, na extensão da vida útil dos produtos e na criação de valor por meio da reintegração de materiais aos processos produtivos (Bai; Orzes; Sarkis, 2022; Ghobakhloo et al., 2021). Contudo, no campo da saúde pública, a inserção dessas inovações ainda encontra barreiras culturais, técnicas e institucionais, como a ausência de padronização, inexistência de inventários sistematizados ou iniciativas fragmentadas de registro, limitações regulatórias e resistência organizacional à adoção de novas práticas (Artigos 2 e 3; Beltrami et al., 2021).

Nessa perspectiva, a literatura sobre políticas públicas em saúde reforça que mudanças institucionais duradouras exigem coordenação centralizada, planejamento estratégico e

mecanismos de monitoramento verticalizados, de modo a garantir a efetividade e a institucionalização das ações (Campos; Pereira Jr., 2021; Mintzberg, 1996). Os DMDs, por seu caráter estratégico e alto valor agregado, constituem uma oportunidade singular para iniciar a transição rumo a modelos de gestão que conciliem inovação digital, sustentabilidade e governança pública. Nesse sentido, dada a estrutura hierárquica do SUS, a liderança da implantação de um plano nacional deve ser exercida pelo Ministério da Saúde, sob coordenação de instâncias como a SEIDIGI e o DATASUS, para que os estados, municípios e unidades de saúde possam alinhar seus processos a partir de diretrizes centralizadas.

Essa necessidade dialoga diretamente com as lentes teóricas que sustentam esta tese. A Teoria das Capacidades Dinâmicas ajuda a compreender como os hospitais poderão reconfigurar seus recursos frente às novas diretrizes; a Teoria da Complexidade evidencia os desafios de gerir sistemas interdependentes e adaptativos como o SUS; e a Teoria Sociotécnica reforça a importância de alinhar tecnologias, processos e atores humanos para que a gestão dos DMDs seja sustentável e legítima.

Sendo assim, o PDGDMD é proposto como um instrumento inovador, resultante da triangulação entre evidências empíricas, revisões sistemáticas da literatura e análise documental de políticas e normativas nacionais. Ao articular fundamentos técnicos, regulatórios e operacionais em um único documento, o plano consolida-se como base científica e institucional para orientar a atuação coordenada dos diferentes níveis da federação. Estruturado para promover modelos de gestão sustentáveis, digitais e alinhados aos princípios da circularidade, este plano busca preencher a lacuna existente na gestão dos DMDs e oferecer diretrizes robustas para fortalecer a sustentabilidade do SUS.

2 Objetivos

O PDGDMD tem como finalidade orientar, em nível nacional, a gestão eficiente, segura e sustentável desses dispositivos no âmbito do SUS, com base em diretrizes institucionais e nas políticas públicas vigentes.

2.1 Objetivo Geral

Estabelecer diretrizes estratégicas e ações estruturadas para a padronização, rastreabilidade, uso racional e revalorização dos Dispositivos Médicos Duráveis no SUS,

promovendo a sustentabilidade, a segurança sanitária, a inovação digital e a otimização do uso de recursos públicos.

2.2 Objetivos específicos

- Alinhar a gestão de DMDs às principais políticas e estratégias nacionais de saúde digital e sustentabilidade, como a Estratégia de Saúde Digital (ESD), o Programa SUS Digital e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS);
- Estabelecer diretrizes para critérios nacionais de classificação, aquisição, monitoramento e descarte de DMDs, incluindo indicadores de desempenho que favoreçam a eficiência, rastreabilidade e a redução de perdas;
- Propor o uso de tecnologias da I4.0 que ampliem a rastreamento e monitoramento dos DMDs, favorecendo a interoperabilidade com a Rede Nacional de Dados em Saúde (RNDS);
- Orientar gestores na adoção de soluções práticas que promovam o reuso seguro, a remanufatura e a destinação final adequada de DMDs, em conformidade com a legislação vigente;
- Estimular a atuação coordenada entre as áreas técnicas do Ministério da Saúde, redes assistenciais, entes federativos e parceiros institucionais, de modo a assegurar governança centralizada e implementação articulada do plano.

3 Alinhamento Estratégico do PDGDMD 2026/2028

Com base nos normativos que regem as funções de governança da saúde digital, sustentabilidade e gestão de tecnologias no setor público, o PDGDMD foi estruturado a partir de uma análise documental sistemática dos principais normativos, legislações e instrumentos de planejamento em vigor no Brasil relacionados à saúde, à sustentabilidade e à transformação digital. A análise documental, reconhecida como procedimento essencial para consolidar evidências em pesquisas aplicadas em políticas públicas (Bowen, 2009), permitiu organizar e condensar informações de documentos oficiais em categorias temáticas, de modo a sustentar a formulação das diretrizes do plano.

O processo considerou como critérios de inclusão a vigência, o escopo nacional, a relevância normativa e a aplicabilidade direta à gestão de DMDs. A categorização em eixos

(instrumentos estratégicos de governo, legislações e normativas sanitárias) possibilitou articular os fundamentos legais e institucionais com as necessidades práticas de gestão dos DMDs no SUS. Essa sistematização reforça a coerência entre a proposta do plano e as políticas públicas existentes, assegurando que as diretrizes formuladas tenham respaldo técnico e institucional (Savaget et al., 2019; Campos; Pereira Jr., 2021). O Quadro 6 ilustra estes instrumentos que fundamentam o PDGDMD.

Quadro 6 – Instrumentos estratégicos e normativos que fundamentam o PDGDMD

Eixo de referência	Documento / Norma	Contribuição para o PDGDMD
Planejamento governamental	Lei nº 14.820/2024 – PPA 2024–2027	Programas estruturantes da União; base de articulação federativa em saúde, digitalização e sustentabilidade.
	Plano Nacional de Saúde 2024–2027	Diretrizes, objetivos e metas nacionais; orienta prioridades assistenciais e de gestão.
	Portaria de Consolidação GM/MS nº 2/2017	Consolida normas de organização do SUS; estabelece a estrutura regulatória da assistência.
	Lei nº 8.080/1990 - Lei Orgânica da Saúde	Define a estrutura e os princípios do SUS, estabelece competências de gestão e regulação e prevê a formulação de políticas sobre equipamentos e tecnologias em saúde, oferecendo base legal e institucional para o PDGDMD.
Saúde digital	Decreto nº 12.069/2024 – ENGD	Estratégia Nacional de Governo Digital; foco em interoperabilidade e serviços digitais.
	Política Nacional de Informação e Informática em Saúde – PNIIS (2021)	Fundamentos da informação em saúde, interoperabilidade e segurança de dados.
	Estratégia de Saúde Digital – ESD 2020–2028	Base da transformação digital no SUS; prevê rastreabilidade e governança digital.
	Portaria GM/MS nº 3.232/2024 – SUS Digital	Diretrizes para digitalização do SUS; promove níveis de maturidade digital.
	Portaria GM/MS nº 3.682/2020 – INMSD	Ferramenta de diagnóstico da maturidade digital; essencial para avaliar rastreabilidade de DMDs.
	Portaria GM/MS nº 1.748/2023	Institui o Comitê de Governança Digital e Inovação da Saúde; instância de coordenação estratégica.
Sustentabilidade e gestão pública	Lei nº 12.305/2010 – PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos; estabelece diretrizes de reuso, reciclagem e logística reversa.
	Lei nº 14.133/2021 – Nova Lei de Licitações	Regula aquisições e contratos públicos; impacto direto na compra e gestão de DMDs.

	Lei nº 13.709/2018 – LGPD	Proteção de dados pessoais; aplicável a sistemas de rastreamento e monitoramento de DMDs.
Regulação sanitária (ANVISA)	RDC nº 751/2022	Classificação de risco, registro e rastreabilidade de dispositivos médicos.
	RDC nº 156/2006	Normas para reuso e rotulagem de dispositivos médicos.
	RDC nº 67/2009	Boas práticas de reprocessamento de produtos médicos reutilizáveis.
	RDC nº 579/2021	Regulação específica para dispositivos usados ou reconicionados.

Fonte: Dados da Pesquisa (2025).

A organização dos instrumentos apresentados no Quadro 6 em eixos de referência evidencia a complexidade de alinhar um plano nacional às múltiplas dimensões legais, estratégicas e regulatórias que orientam a gestão pública em saúde. Essa complexidade reflete o caráter adaptativo e interdependente do SUS, em consonância com a Teoria da Complexidade, que explica os desafios de articular diferentes atores, normas e processos em sistemas dinâmicos (Burnes, 2005; Johannessen, 2022).

Ao mesmo tempo, a necessidade de reconfiguração das práticas de gestão hospitalar frente a diretrizes legais e digitais dialoga com a Teoria das Capacidades Dinâmicas, que sustenta a importância da aprendizagem organizacional e da renovação contínua dos recursos em ambientes mutáveis (Teece, 2007; Zhang et al., 2023a). Finalmente, a Teoria Sociotécnica reforça que as normas e políticas analisadas só terão impacto efetivo se as tecnologias e processos forem alinhados aos profissionais e às práticas institucionais (Bakhuis et al., 2024; Savaget et al., 2019).

Essa leitura sistemática, portanto, não se limita à descrição normativa, mas oferece uma base crítica para compreender como o PDGDMD pode se estruturar como política pública nacional, ancorada em fundamentos científicos e institucionais, e ao mesmo tempo capaz de responder às barreiras empíricas identificadas nesta pesquisa.

4 Inventário das Necessidades do PDGDMD

O inventário de necessidades do PDGDMD foi construído a partir da triangulação de evidências provenientes de três fontes principais: (i) análise documental dos normativos nacionais de saúde digital, sustentabilidade e regulação sanitária, apresentados na seção anterior; (ii) resultados das revisões sistemáticas realizadas nesta tese, em especial o Artigo 2,

que mapeou barreiras e impulsionadores à implementação da EC em hospitais; e (iii) dados empíricos obtidos em estudos de caso e questionários aplicados a gestores hospitalares, que permitiram mapear o ciclo de vida dos DMDs e as dificuldades práticas de gestão (Artigos 1 e 4). O Artigo 3, por sua vez, contribuiu ao identificar tecnologias da I4.0 aplicáveis à gestão hospitalar, permitindo associar as necessidades levantadas a potenciais soluções digitais. Esse procedimento metodológico, alinhado às recomendações de Govindan et al. (2024) para análise documental e à perspectiva de rigor em políticas públicas discutida por Savaget et al. (2019), assegura que o inventário aqui apresentado não se trata de uma percepção isolada, mas de uma síntese fundamentada em múltiplas fontes de evidência.

A sistematização das necessidades visa subsidiar a elaboração de diretrizes, propostas de ações e indicadores de monitoramento, assegurando alinhamento com os instrumentos de planejamento e com os objetivos do Programa SUS Digital.

As necessidades identificadas foram organizadas em cinco macrocampos:

- a) Governança e Integração Institucional;
- b) Classificação e Padronização dos DMDs;
- c) Rastreabilidade e Informação;
- d) Sustentabilidade e Circularidade de DMDs;
- e) Capacitação e Suporte Técnico.

a) Governança e Integração Institucional

A ausência de uma política nacional específica para a gestão de DMDs evidencia a fragilidade da governança do setor. O Artigo 2 destacou a desarticulação entre áreas técnicas como engenharia clínica, compras, TI, controle de infecção e resíduos, configurando uma barreira institucional recorrente.

O Artigo 4 confirmou empiricamente essa fragmentação em hospitais públicos brasileiros, revelando práticas locais que não dialogam com estratégias nacionais. Esse diagnóstico converge com Beltrami et al. (2021), que ressaltam a relevância da integração intersetorial para a sustentabilidade hospitalar, e com Govindan et al. (2024), que apontam a ausência de mecanismos formais de monitoramento como obstáculo à implementação de políticas sustentáveis.

b) Classificação e Padronização dos DMDs

Outro obstáculo identificado é a inexistência de uma classificação nacional padronizada

dos DMDs, o que compromete uma gestão integrada e a interoperabilidade entre sistemas. O Artigo 1 mostrou que há uma diversidade de códigos e nomenclaturas adotadas nos hospitais estudados. O Artigo 2 reforçou criticamente essa lacuna, indicando a ausência de critérios claros para determinar vida útil, obsolescência e possibilidades de circularidade. Essa necessidade também foi evidenciada nos diagnósticos de maturidade digital relatados no Artigo 4, que apontaram falhas na integração da classificação nacional com padrões internacionais, dificultando inclusive processos de importação e exportação.

c) Rastreabilidade e Informação

A rastreabilidade dos DMDs ainda é um desafio central, visto que não há sistemas específicos para acompanhar todo o ciclo de vida desses dispositivos, desde sua aquisição até seu descarte. O Artigo 1 mostrou, de forma exploratória, a falta de informatização e de registros sistematizados nos fluxos de DMDs.

O Artigo 4 aprofundou esse achado, evidenciando a ausência de sistemas que acompanhem todo o ciclo de vida dos dispositivos e a desconexão com a RNDS. Esses achados empíricos dialogam com a literatura internacional, que aponta a inexistência de identificação única, como o *Unique Device Identification* (UDI), como barreira à segurança e à interoperabilidade (Westover, 2024). O Artigo 3 complementa esse diagnóstico ao indicar tecnologias da I4.0, como IoT e blockchain, como potenciais soluções para superar as lacunas de rastreabilidade, o que é confirmado na análise empírica do Artigo 4.

d) Sustentabilidade e Circularidade

Do ponto de vista da sustentabilidade, os problemas concentram-se no descarte precoce de dispositivos ainda operacionais, o que gera desperdício de recursos e aumento de resíduos hospitalares. O Artigo 2 identificou essas questões como barreiras estruturais à implementação da EC em hospitais. O Artigo 4 confirmou essa realidade em unidades brasileiras, onde foram observados desperdícios e baixo aproveitamento de logística reversa. Tais achados se alinham às análises de Ghobakhloo et al. (2021), que destacam barreiras institucionais à circularidade, e à necessidade de indicadores nacionais que monitorem o ciclo de vida e o reaproveitamento, fundamentais para políticas públicas baseadas em evidências.

e) Capacitação e Suporte Técnico

A gestão de DMDs é também prejudicada pela carência de formação técnica de gestores

e equipes, que muitas vezes não possuem capacitação adequada para adotar boas práticas sustentáveis. O Artigo 2 identificou a falta de qualificação como barreira institucional e cultural à circularidade. Essa constatação foi reforçada pelo Artigo 4, em que gestores hospitalares relataram baixa familiaridade com protocolos de sustentabilidade e tecnologias da I4.0. Além disso, a ausência de materiais técnicos padronizados, como manuais e fluxogramas, compromete a homogeneidade entre hospitais, enquanto o baixo engajamento em processos de inovação aberta restringe a capacidade adaptativa do sistema. Esses achados dialogam com Campos e Pereira Jr. (2021), que ressaltam a importância da qualificação contínua para fortalecer a governança em saúde.

A organização das necessidades em cinco macrocampos evidencia que os desafios da gestão de DMDs no SUS não se restringem a aspectos técnicos, mas envolvem dimensões institucionais, normativas e sociotécnicas. Tais achados dialogam com as lentes teóricas que sustentam esta tese: a Teoria das Capacidades Dinâmicas ajuda a compreender como os hospitais precisam reconfigurar seus recursos diante de exigências normativas e tecnológicas; a Teoria da Complexidade evidencia o caráter interdependente e adaptativo do SUS, em que múltiplos atores e sistemas precisam ser coordenados; e a Teoria Sociotécnica reforça a necessidade de alinhar tecnologias, processos e pessoas para que práticas de rastreabilidade e circularidade sejam efetivas. Assim, o inventário aqui apresentado constitui não apenas uma descrição de fragilidades, mas uma síntese analítica baseada em evidências científicas e empíricas, que fundamenta a formulação das diretrizes estratégicas do PDGDMD.

5 Diretrizes Estratégicas do PDGDMD

As diretrizes estratégicas do PDGDMD definem o conjunto de orientações fundamentais que norteiam as ações a serem implementadas no âmbito do SUS, considerando o cenário atual, as necessidades identificadas e os marcos legais e programáticos em vigor. Estas diretrizes foram formuladas com base no inventário de necessidades, nas evidências oriundas dos artigos da tese e nos instrumentos de planejamento do Ministério da Saúde, em especial o PPA 2024–2027, o PNS 2024–2027, a ESD28, a PNRS, o Programa SUS Digital e o INMSD. Essas diretrizes traduzem em eixos de ação os principais desafios identificados no contexto hospitalar, assegurando aderência normativa e respaldo científico.

A Figura 18 apresenta as diretrizes estratégicas do Plano Diretor para a Gestão de DMDs, estruturadas em sete eixos que visam orientar a implementação de um modelo

integrado, digital e sustentável no contexto hospitalar. Cada diretriz foi elaborada de modo a responder a fragilidades apontadas tanto nas revisões sistemáticas (Artigo 2), quanto nos estudos empíricos e questionários (Artigos 1 e 4), além de se articular às soluções tecnológicas mapeadas no contexto da Indústria 4.0 (Artigo 3).

Figura 18 – Diretrizes Estratégicas para a Gestão Sustentável e Digital de DMDs



Fonte: Elaboração própria com base nos documentos normativos e cenário atual de gestão de DMD (2025).

Percebe-se na Figura 18, que as diretrizes abrangem dimensões de governança, padronização, rastreabilidade, sustentabilidade, qualificação, segurança e monitoramento, compondo um arcabouço que busca alinhar práticas hospitalares às políticas nacionais de saúde, à legislação vigente e às boas práticas internacionais.

A ausência de instâncias coordenadoras nacionais foi identificada como uma das barreiras centrais à gestão sustentável de DMDs (Artigo 2). Os estudos de caso confirmaram a fragmentação das práticas entre hospitais, sem diretrizes claras para reuso, remanufatura ou descarte (Artigo 4). A literatura aponta que mudanças duradouras dependem de coordenação centralizada e planejamento estratégico (Campos; Pereira Jr., 2021; Mintzberg, 1996), em linha com a Teoria da Complexidade, que destaca a necessidade de articulação de múltiplos atores em sistemas adaptativos (Johannessen, 2022). Assim, a diretriz prevê a criação de mecanismos de governança centralizada pelo Ministério da Saúde, conforme atribuições da Lei Orgânica da Saúde (Lei nº 8.080/1990) e da Portaria GM/MS nº 1.748/2023, com vistas a alinhar estados e municípios em torno de diretrizes unificadas.

A falta de padronização de classificações e nomenclaturas foi constatada nos estudos exploratórios (Artigo 1) e aprofundada como barreira pela revisão sistemática (Artigo 2). Esse problema afeta a interoperabilidade entre sistemas e dificulta a integração com padrões

internacionais. Autores como Beltrami et al. (2021) e David, Tolbert e Boghossian (2019) reforçam que a ausência de critérios objetivos para vida útil e obsolescência compromete a eficiência hospitalar. A diretriz propõe a padronização nacional em conformidade com a RDC nº 751/2022, articulando-se com boas práticas regulatórias e critérios de circularidade previstos na PNRS (Lei nº 12.305/2010).

O Artigo 4 demonstrou que não há sistemas consolidados para monitorar o ciclo de vida dos DMDs, enquanto o Artigo 3 mapeou tecnologias da I4.0, como IoT e blockchain, que podem superar essa lacuna. A ausência de interoperabilidade com a RNDS e de identificação única dos dispositivos foi identificada como um entrave crítico, convergindo com a literatura que aponta a rastreabilidade como eixo central da transformação digital (Westover, 2024; Bai; Orzes; Sarkis, 2022). Esta diretriz prevê a integração digital com base no INMSD (2020) e no Programa SUS Digital (2024), assegurando interoperabilidade e monitoramento contínuo.

A carência de capacitação de profissionais foi confirmada tanto como barreira institucional (Artigo 2) quanto pelos questionários aplicados a gestores hospitalares (Artigo 4). A literatura reforça que a qualificação contínua é condição essencial para implementar mudanças organizacionais (Campos; Pereira Jr., 2021; Bakhuis et al., 2024). Essa diretriz propõe ações permanentes de capacitação, cooperação com universidades e incentivo à inovação aberta em parceria com ICTs, em consonância com a Teoria Sociotécnica, que ressalta a integração entre pessoas, processos e tecnologias (Savaget et al., 2019).

O descarte precoce de dispositivos e a ausência de protocolos nacionais de biossegurança foram identificados como barreiras críticas (Artigo 2), confirmadas nos casos estudados (Artigo 4). A literatura evidencia que a circularidade em hospitais depende de políticas que conciliem eficiência econômica, segurança e redução de impactos ambientais (Chauhan; Jakhar; Chauhan, 2021; Ghobakhloo et al., 2021; Saxena; Seetharaman; Shawarikar, 2024). Esta diretriz orienta a criação de protocolos de reuso e remanufatura alinhados à RDC nº 156/2006 e à RDC nº 67/2009, bem como o fortalecimento da logística reversa prevista na PNRS.

A revisão das normativas sanitárias mostra que a conformidade com a RDC nº 579/2021 e com a LGPD (Lei nº 13.709/2018) é imprescindível para a gestão dos DMDs. A proteção de dados pessoais e clínicos deve ser assegurada em todos os sistemas digitais implementados. A literatura indica que a governança digital e a transparência de dados são fundamentais para manter a confiança dos usuários e a legitimidade institucional (Savaget et al., 2019; Govindan et al., 2024). Esta diretriz integra segurança sanitária e digitalização, garantindo integridade das

informações e proteção dos pacientes.

O monitoramento contínuo foi apontado como lacuna nos estudos empíricos (Artigo 4), que identificaram inexistência de indicadores nacionais para o ciclo de vida dos dispositivos. Essa carência impede a avaliação do desempenho econômico, ambiental e institucional. A literatura defende que políticas públicas precisam de mecanismos de monitoramento verticalizados e indicadores robustos (Qureshi et al., 2024; Bai; Zhou; Sarkis, 2023). Esta diretriz propõe a adoção de indicadores alinhados ao INMSD, instrumentos de avaliação periódica e mecanismos de melhoria contínua, consolidando a gestão baseada em evidências.

Sendo assim, as sete diretrizes propostas constituem a espinha dorsal do PDGDMD e respondem de forma integrada às lacunas empíricas, documentais e teóricas mapeadas nesta tese. A governança nacional fortalece a coordenação centralizada, a padronização garante bases técnicas unificadas, a digitalização viabiliza rastreabilidade e interoperabilidade, a qualificação amplia capacidades institucionais, a circularidade introduz práticas sustentáveis, a proteção de dados assegura integridade e confiança, e o monitoramento contínuo garante a institucionalização das mudanças. Em consonância com a Teoria das Capacidades Dinâmicas, a Teoria da Complexidade e a Teoria Sociotécnica, essas diretrizes configuram um marco estratégico de política pública para o SUS, orientando a transição para um modelo de gestão de DMDs sustentável, digital e replicável em todo o território nacional.

6 Plano de Ação do PDGDMD

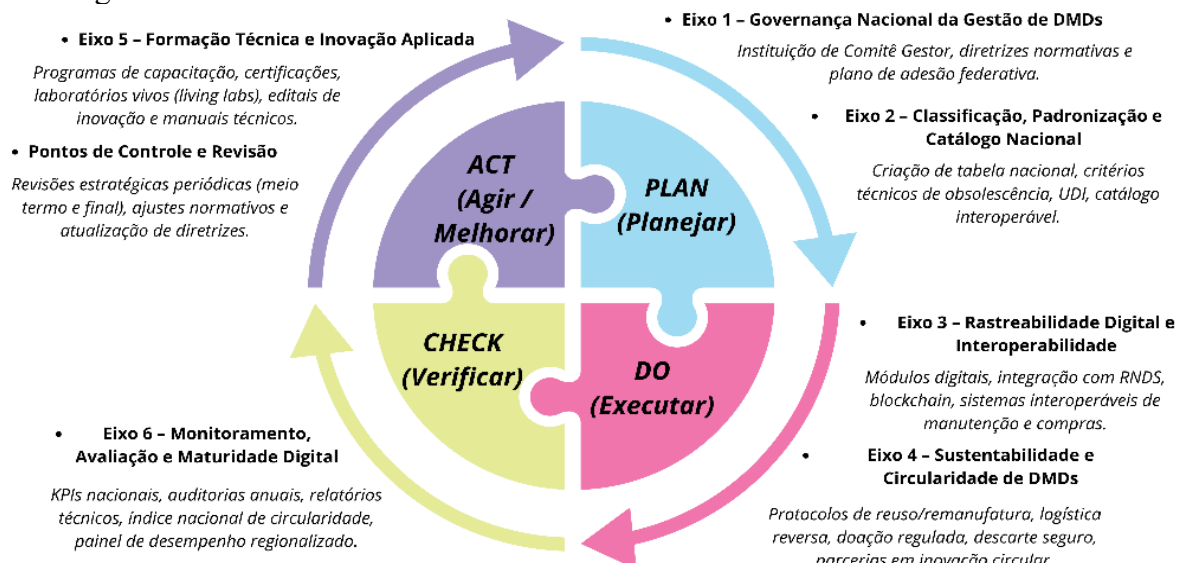
A implementação do PDGDMD está estruturada em seis eixos estratégicos, compostos por ações detalhadas que refletem a complexidade técnica, institucional e federativa da gestão de DMDs no SUS. Esses eixos sintetizam os principais desafios identificados no inventário de necessidades (seção 4) e traduzidos em diretrizes estratégicas (seção 5), sendo definidos a partir da triangulação entre as evidências das revisões sistemáticas sobre barreiras e impulsionadores da EC em hospitais (Artigo 2), a análise das tecnologias da I4.0 aplicáveis ao setor (Artigo 3) e os resultados empíricos dos estudos de caso e questionários junto a gestores hospitalares (Artigos 1 e 4). Dessa forma, sua formulação resulta de um processo analítico rigoroso, fundamentado em múltiplas fontes de evidência.

Cada eixo compreende ações estruturantes e articuladas, que deverão ser priorizadas por meio da metodologia GUTRIC (instrumento de gestão já adotado pelo Ministério da Saúde), considerando os critérios de Gravidade, Urgência, Tendência, Relevância, Impacto e Custo.

- Eixo 1 – Governança Nacional da Gestão de DMDs: consolida mecanismos de coordenação centralizada pelo Ministério da Saúde, essenciais para reduzir a fragmentação das práticas e fortalecer a integração federativa.
- Eixo 2 – Classificação, Padronização e Catálogo Nacional: estabelece critérios técnicos unificados e um repositório oficial que permita padronização, interoperabilidade e comparabilidade entre hospitais e sistemas.
- Eixo 3 – Rastreabilidade Digital e Interoperabilidade: promove a integração de sistemas digitais para acompanhar o ciclo de vida completo dos DMDs, assegurando alinhamento com a RNDS e padrões internacionais de identificação.
- Eixo 4 – Sustentabilidade e Circularidade de DMDs: orienta práticas de reuso, remanufatura e logística reversa em conformidade com protocolos de biossegurança, ampliando a vida útil dos dispositivos e reduzindo impactos ambientais.
- Eixo 5 – Formação Técnica e Inovação Aplicada: contempla a capacitação contínua de gestores e equipes, além do estímulo à cooperação com universidades e instituições científicas, criando condições para inovação aberta e gestão qualificada.
- Eixo 6 – Monitoramento, Avaliação e Maturidade Digital: propõe mecanismos de acompanhamento sistemático por indicadores, em consonância com o Índice Nacional de Maturidade em Saúde Digital (INMSD), assegurando melhoria contínua e transparência.

A operacionalização dos seis eixos estratégicos foi estruturada de forma a seguir a lógica do ciclo PDCA (Plan–Do–Check–Act), permitindo que as ações sejam compreendidas não apenas como iniciativas isoladas, mas como partes de um processo dinâmico de planejamento, execução, verificação e melhoria contínua. A Figura 19 apresenta a disposição dos eixos do Plano Diretor segundo essa abordagem de gestão.

Figura 19 - Eixos do Plano Diretor de Gestão de DMDs estruturados no ciclo PDCA



Fonte: Elaboração própria (2025).

A representação evidencia que cada eixo do Plano Diretor não atua de maneira independente, mas em sinergia, fortalecendo a governança, a padronização, a rastreabilidade, a sustentabilidade, a capacitação e o monitoramento em um fluxo contínuo de retroalimentação. Essa estrutura confere ao PDGDMD caráter sistêmico e adaptativo, fundamental para orientar gestores do SUS na implementação de práticas de EC apoiadas pelas tecnologias da I4.0.

6.1 Metodologia GUTRIC

A metodologia GUTRIC é uma evolução dos modelos clássicos de priorização de problemas e ações, como o método GUT (Gravidade, Urgência e Tendência) (Kepner; Tregoe, 2006; Righi; Andrade, 2020), bastante utilizado em gestão da qualidade e análise de riscos. Enquanto o GUT original limita-se a três dimensões, o GUTRIC expande a análise ao incorporar os critérios Retorno (R), Investimento (I) e Complexidade (C), tornando-se um instrumento mais abrangente para processos decisórios complexos em organizações públicas e privadas.

Essa adaptação tem sido aplicada em contextos que demandam maior racionalidade e transparência na alocação de recursos, como saúde pública, projetos de sustentabilidade e inovação tecnológica (Ribeiro et al., 2021; Oliveira; Machado, 2023).

O cálculo da prioridade (P) é realizado pela soma dos escores atribuídos a cada critério, segundo a fórmula:

$$P = G + U + T + R + I + C$$

(1)

Dessa forma, problemas ou ações com maior pontuação são priorizados, considerando não apenas a gravidade e urgência da situação, mas também o retorno esperado, os investimentos necessários e a complexidade de implementação.

Tabela 17 – Critérios da matriz GUTRIC

Critério	Peso
Gravidade (G)	1
Urgência (U)	1
Tendência (T)	1
Retorno (R)	1
Investimento (I)	1
Complexidade (C)	1
Prioridade (P)	G+U+T+R+I+C

Fonte: Plano Nacional de Saúde (2024).

A gravidade é avaliada conforme o impacto que o problema pode causar se não for solucionado. Em gestão hospitalar, por exemplo, um dispositivo médico crítico que apresente falhas frequentes poderia ser classificado como de “gravidade extrema” (5), pois compromete diretamente a segurança do paciente. Estudos sobre análise de risco em saúde reforçam a importância desse critério, especialmente em contextos de recursos limitados (Fonseca; Vasconcelos, 2022). A urgência relaciona-se ao tempo disponível para agir. Uma situação que exige resposta imediata, como a substituição de equipamentos de suporte à vida, recebe pontuação máxima. Esse critério está alinhado às práticas de priorização adotadas em metodologias de gestão de riscos e incidentes críticos em saúde (WHO, 2021). A tabela 2 apresenta os critérios de avaliação utilizados para definir a pontuação de G e de U.

Tabela 18 – Critérios de avaliação da Gravidade (G) e da Urgência (U)

Gravidade (G)	Analisada pela intensidade ou impacto que o problema pode causar se não for solucionado. A pontuação varia de 1 a 5:		Urgência (U)	Analisada pela pressão do tempo para resolver a situação. A pontuação varia de 1 a 5:	
	1	Sem gravidade		1	Pode esperar
	2	Pouco grave		2	Pouco urgente
	3	Grave		3	Urgente
	4	Muito grave		4	Muito Urgente
	5	Extremamente grave		5	Necessidade de ação imediata

Fonte: Plano Nacional de Saúde (2024).

A tendência reflete a evolução esperada da situação ao longo do tempo. Questões com rápida deterioração exigem maior atenção. Por exemplo, falhas recorrentes em sistemas digitais hospitalares tendem a agravar-se rapidamente se não houver manutenção, justificando pontuação alta. Segundo Ribeiro et al. (2021), a análise da tendência permite antecipar cenários e evitar custos exponenciais de correção. O retorno considera os ganhos potenciais da implementação da ação. Em projetos públicos, o retorno pode ser traduzido em eficiência operacional, redução de custos ou impacto social. A literatura sobre gestão estratégica destaca a importância desse critério para justificar investimentos em ambientes com restrição de recursos (Porter; Heppel, 2020). A tabela 3 apresenta os critérios de avaliação utilizados para definir a pontuação de T e de R.

Tabela 19 – Critérios de avaliação da Tendência (T) e da Retorno (R)

Tendência (T)	Analisada pelo padrão ou tendência de evolução da situação. A pontuação varia de 1 a 5:		Retorno (R)	Quanto a organização irá se beneficiar com a execução da ação. A pontuação varia de 1 a 5:	
	1	Não irá mudar		1	Benefício de pouco impacto
	2	Írá piorar a longo prazo		2	Algum benefício operacional mensurável
	3	Írá piorar a médio prazo		3	Impacto razoável no desempenho da organização
	4	Írá piorar a curto prazo		4	Benefícios grandes que geram grande valor
	5	Írá piorar rapidamente		5	Vital importância para os serviços do DATASUS

Fonte: Plano Nacional de Saúde (2024).

O investimento mede o volume de recursos financeiros, humanos ou tecnológicos necessários para executar a ação. Iniciativas que exigem baixo investimento e trazem grande retorno tendem a ser priorizadas. De acordo com Oliveira e Machado (2023), essa perspectiva assegura decisões mais equilibradas entre custos e benefícios. A complexidade avalia os riscos e dificuldades técnicas de execução. Projetos com alta complexidade demandam maior articulação interinstitucional e suporte especializado, como ocorre em políticas nacionais de saúde digital. Pesquisas recentes destacam que considerar a complexidade é essencial para reduzir taxas de insucesso em projetos de inovação (Cunha; Barbosa, 2022). A tabela 4 apresenta os critérios de avaliação utilizados para definir a pontuação de I e de C.

Tabela 20 – Critérios de avaliação da Investimento (I) e da Complexidade (C)

Investimento (I)	Qual será o investimento necessário para realizar a ação. A pontuação varia de 1 a 5:		Complexidade (C)	Grau de dificuldade técnica e riscos para implantação da solução proposta. A pontuação varia de 1 a 5:	
	1	Alto		1	Alta complexidade de implementação, excede os limites de autoridade da organização, envolvendo outras organizações
	2	Médio Alto		2	Pouca facilidade de implementação, tecnologias novas ou mudanças de paradigmas tecnológicos
	3	Médio		3	Média facilidade de implementação, depende do conhecimento de tecnologias específicas e disponibilidade destes conhecimentos no mercado
	4	Médio Baixo		4	Fácil implementação, com possível apoio de terceiros
	5	Baixo		5	Grande facilidade de implementação com recursos da organização

Fonte: Plano Nacional de Saúde (2024).

O método GUTRIC amplia a objetividade da tomada de decisão ao integrar variáveis técnicas, financeiras e temporais, oferecendo uma visão sistêmica para gestores. Sua aplicação no campo da saúde, especialmente em hospitais públicos, possibilita maior racionalidade na priorização de investimentos, atendendo tanto às necessidades imediatas quanto às estratégias de longo prazo. Assim, o GUTRIC representa um avanço metodológico frente às ferramentas tradicionais de priorização, configurando-se como uma abordagem robusta para apoiar políticas públicas e processos de gestão organizacional.

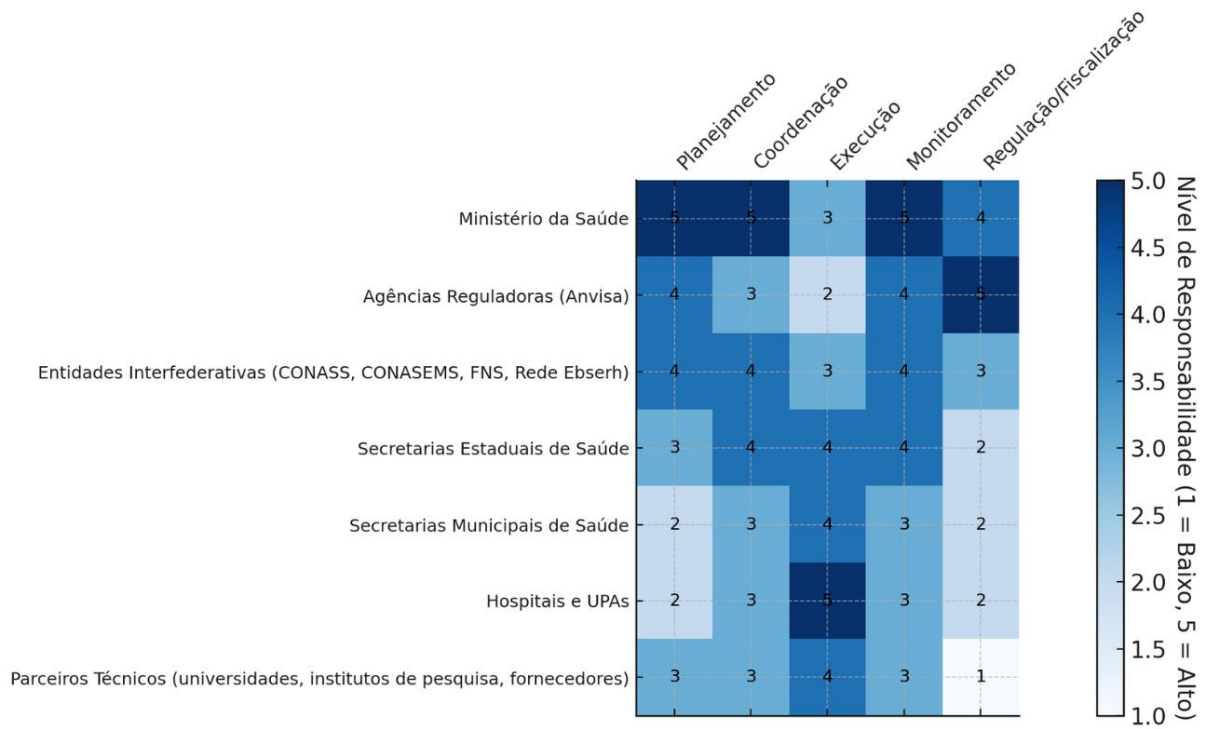
6.2 Matriz de Responsabilidade

Uma etapa essencial para a implementação do PDGDMD consiste na definição clara das atribuições institucionais, de modo a garantir a articulação entre os diferentes níveis de governo, órgãos reguladores, entidades interdependentes e parceiros técnicos. A matriz de responsabilidades foi construída a partir da análise documental de normativos nacionais (como a PNRS, a ESD28, a PNIIS e as RDCs da Anvisa), dos achados empíricos da tese (Artigos 1 e 4) e da literatura científica sobre governança em saúde e políticas públicas (Campos; Pereira Jr., 2021; Polojärvi; Palmer; Dunford, 2023; Govindan et al., 2024). Esse processo permitiu consolidar papéis estratégicos e operacionais de forma coerente com as evidências levantadas.

Nesse contexto, a matriz de responsabilidades permite visualizar o grau de envolvimento de cada ator nas funções de planejamento, coordenação, execução,

monitoramento e regulação/fiscalização, evidenciando os papéis estratégicos e operacionais que sustentam a governança do plano. A Figura 20 apresenta essa distribuição, indicando o nível de responsabilidade atribuído a cada instituição, em uma escala de 1 (baixo) a 5 (alto), o que evidencia o nível de responsabilidade atribuído a cada instituição.

Figura 20 – Matriz de Responsabilidades do PDGDMD



Fonte: Elaboração própria com base nos dados da pesquisa (2024).

Cada responsabilidade está detalhada no Quadro 7, o qual ilustra as principais atribuições dos atores envolvidos em cada nível do sistema de saúde.

Quadro 7 – Níveis e principais responsabilidades dos atores envolvidos no PDGDMD

Nível / Ator	Principais Responsabilidades
Ministério da Saúde (Nível Federal)	Liderar e coordenar o Comitê Gestor Nacional de DMDs.
	Editar portarias, normas e diretrizes nacionais.
	Garantir financiamento e apoio técnico.
	Publicar relatórios nacionais e indicadores estratégicos.
	Conduzir auditorias nacionais e revisões estratégicas.
Agências Reguladoras (ex.: Anvisa)	Definir requisitos sanitários para reuso, reprocessamento e descarte.
	Emitir notas técnicas e regulamentos específicos.
	Fiscalizar conformidade regulatória.
Entidades Interfederativas (CONASS, CONASEMS, FNS, Rede Ebserh)	Apoiar articulação entre estados e municípios.
	Disseminar boas práticas e promover capacitações.
	Contribuir na validação e pactuação de metas regionais.

Secretarias Estaduais de Saúde	Coordenar a implementação do PDGDMD em sua rede.
	Garantir adesão das unidades estaduais e municipais.
	Monitorar indicadores estaduais e reportar ao MS.
	Intermediar a capacitação regional.
Secretarias Municipais de Saúde	Implementar diretrizes em UPAs e hospitais municipais.
	Alimentar sistemas nacionais com dados de DMDs.
	Garantir conformidade das unidades sob sua gestão.
Hospitais e UPAs (Nível Local)	Cadastrar e manter atualizado o inventário de DMDs.
	Adotar protocolos de rastreabilidade, reuso e descarte.
	Realizar manutenção preventiva e corretiva conforme normas.
	Participar de capacitações e avaliações periódicas.
	Alimentar bases de dados e indicadores.
Parceiros Técnicos (Universidades, Institutos de Pesquisa, Fornecedores)	Apoiar desenvolvimento de soluções tecnológicas.
	Fornecer suporte técnico especializado.
	Conduzir testes, pilotos e inovações (living labs).

Fonte: Elaboração própria (2025).

A distribuição de responsabilidades no PDGDMD evidencia a necessidade de uma governança multinível e colaborativa, na qual cada ator desempenha funções complementares e interdependentes. Enquanto o Ministério da Saúde e as agências reguladoras assumem papéis de liderança normativa, estratégica e fiscalizatória, as entidades interfederativas e secretarias estaduais atuam como articuladoras da integração entre diferentes níveis de gestão. Já as secretarias municipais e os hospitais, por estarem mais próximos da realidade operacional, concentram-se na implementação, monitoramento cotidiano e garantia da conformidade. Por fim, os parceiros técnicos, como universidades e fornecedores, contribuem com suporte científico e tecnológico, favorecendo inovação e qualificação contínua.

Essa configuração fortalece a capacidade institucional do sistema e reflete as lentes teóricas da tese. A Teoria da Complexidade permite compreender a interdependência entre os atores; a Teoria das Capacidades Dinâmicas explica a necessidade de reconfigurar processos e recursos conforme diretrizes nacionais; e a Teoria Sociotécnica destaca o alinhamento entre normas técnicas e práticas sociais na gestão hospitalar. Nesse sentido, a matriz de responsabilidades não apenas distribui funções, mas constitui um mecanismo de institucionalização do PDGDMD, essencial para garantir sua efetividade como política pública sustentável e digital para o SUS.

6.3 Plano de Gestão por Eixos

O PDGDMD foi estruturado em eixos estratégicos que traduzem, de forma integrada, nas necessidades diagnosticadas no inventário nacional de demandas (Seção 4) e as diretrizes

estratégicas definidas previamente (Seção 5). Esses eixos e ações foram delineados com base em múltiplas evidências: a revisão sistemática sobre barreiras e impulsionadores da EC em hospitais (Artigo 2), o mapeamento das tecnologias da I4.0 aplicáveis à saúde (Artigo 3), os estudos de caso e questionários realizados com gestores hospitalares (Artigos 1 e 4), além da análise documental de normativos nacionais como a PNRS, a ESD28, a PNIIS e as RDCs da Anvisa.

A sistematização em planos por eixo permite que a gestão dos DMDs seja concebida de forma uniforme, eficiente e sustentável, contemplando aspectos normativos, estratégicos e operacionais para garantir maior segurança, rastreabilidade e eficiência no uso dos DMDs.

A estrutura do plano segue a mesma lógica e coerência já adotada em documentos de referência, como o Plano Nacional de Saúde e o Programa SUS Digital, o que reforça sua legitimidade e potencial de aplicabilidade. Esse alinhamento metodológico assegura que o PDGDMD se insira no marco regulatório e estratégico vigente, fortalecendo a governança em saúde digital e garantindo que os resultados esperados contribuam diretamente para a melhoria da qualidade assistencial e da sustentabilidade do sistema de saúde brasileiro.

O Quadro 8 apresenta as ações por eixo estratégico do PDGDMD, indicando de forma organizada seus objetivos, metas, atividades propostas, estratégias associadas, atores envolvidos, mecanismos de monitoramento e os resultados esperados.

Quadro 8 – Planos por eixo estratégico

Eixo	Código da Ação	Descrição da Ação/Atividade	Metas	Atividades Propostas	Estratégias	Indivíduos Envolvidos	Indicadores de Monitoramento e Avaliação	Estratégias de Monitoramento e Avaliação	Resultados Esperados
EIXO 1	E1.1	Instituir Comitê Gestor Nacional de Gestão de DMDs no SUS.	Comitê instituído e em funcionamento até 12 meses após publicação do PDGDMD.	Publicar portaria de criação; definir membros; realizar reuniões trimestrais.	Alinhamento com instâncias já existentes do MS e Saúde Digital.	Representantes do MS, Anvisa, CONASS, CONASEMS, Rede Ebserh, hospitais de referência.	Comitê instituído; número de reuniões realizadas; atas publicadas.	Monitoramento via relatórios trimestrais e verificação de atas.	Coordenação nacional fortalecida e articulada com atores-chave.
	E1.2	Criar Grupo Técnico-Executivo com Anvisa, CONASS, CONASEMS, FNS, Rede Ebserh e Coordenação-Geral de Engenharia Clínica.	Grupo técnico estabelecido em até 6 meses.	Nomear integrantes; definir plano de trabalho; realizar reuniões mensais.	Uso de plataformas digitais colaborativas (Gov.br, Teams/MS).	Técnicos das instituições envolvidas.	Grupo formalizado; número de reuniões e entregas técnicas.	Relatórios bimestrais de atividades; acompanhamento pelo Comitê Gestor.	Suporte técnico contínuo para implementação das ações do PDGDMD.
	E1.3	Estabelecer plano de adesão federativa (com metas e pactuações).	100% das UFs aderindo ao PDGDMD até o segundo ano.	Elaborar minuta do plano; pactuar metas com estados e municípios.	Integração com pactuações da CIT (Comissão Intergestores Tripartite).	MS, secretarias estaduais e municipais de saúde.	Percentual de UFs e municípios aderentes.	Monitoramento via sistema digital de adesão federativa.	Adesão ampla e compromissada das esferas federativas.
	E1.4	Regulamentar o PDGDMD via Portaria Ministerial.	Portaria publicada até 6 meses após aprovação do plano.	Redigir texto normativo; submeter a consulta interna; publicar no DOU.	Alinhamento jurídico com legislações vigentes (SUS Digital, PNRS, LGPD).	MS (Secretaria de Atenção Especializada à Saúde, Consultoria Jurídica).	Portaria publicada no DOU.	Verificação no DOU e no sistema de normativos do MS.	Base legal para execução nacional do PDGDMD.

	E2.5	Criar banco de dados nacional com DMDs prioritários para circularidade.	Banco implantado até 18 meses.	Definir critérios de prioridade; cadastrar dispositivos; disponibilizar consulta pública.	Parceria com hospitais de referência e indústrias para dados.	MS, Anvisa, Rede Ebserh, fornecedores.	Banco publicado; número de acessos e atualizações.	Relatórios semestrais de uso e impacto.	Subsídio para políticas de reutilização e revalorização.
	E2.6	Estabelecer critérios técnicos de obsolescência e revalorização.	Critérios definidos e validados até 12 meses.	Revisar literatura; validar com especialistas; publicar guia técnico.	Adotar parâmetros técnicos e regulatórios nacionais.	MS, Anvisa, associações de fabricantes, ABNT.	Guia publicado; uso dos critérios em processos de gestão.	Monitoramento por auditoria documental.	Processos de substituição e reuso mais eficientes.
	E2.7	Garantir alinhamento com normas da ABNT e padrões GS1.	100% das classificações e códigos compatíveis com normas vigentes.	Revisar normas; capacitar equipes; ajustar tabelas e sistemas.	Participação em comitês técnicos da ABNT e GS1 Brasil.	MS, Anvisa, ABNT, GS1 Brasil.	Percentual de alinhamento; certificações obtidas.	Auditorias anuais de conformidade.	Interoperabilidade nacional e internacional garantida.
	E2.8	Revisar periodicamente a Tabela Nacional de Classificação.	Atualização anual da tabela.	Coletar feedback; incorporar novas tecnologias e critérios de circularidade.	Mecanismo de consulta pública e grupo de atualização permanente.	MS, Comitê Gestor, especialistas setoriais.	Número de revisões realizadas; tempo médio de atualização.	Relatórios de atualização publicados anualmente.	Tabela sempre atualizada e compatível com avanços tecnológicos.
EIXO 3	E3.1	Desenvolver módulo específico em plataforma nacional (Hórus, SIGEM ou e-SUS).	Módulo implementado e funcional em 18 meses.	Levantamento de requisitos; desenvolvimento; integração com sistemas existentes.	Uso de arquitetura modular e APIs abertas.	DATASUS, MS, equipes de TI hospitalares.	Módulo desenvolvido; percentual de unidades integradas.	Testes de usabilidade e desempenho; relatórios trimestrais.	Plataforma unificada para gestão de DMDs no SUS.
	E3.2	Criar sistema de registro e histórico técnico dos dispositivos por unidade.	80% das unidades piloto registrando dados até 2 anos.	Desenvolvimento de funcionalidades; capacitação de usuários.	Integração com manutenção preventiva e calibração.	Engenheiros clínicos, equipes de TI.	Número de registros; tempo médio de atualização.	Auditoria de registros e cruzamento com inventários físicos.	Histórico técnico completo para cada DMD.
	E3.3	Definir protocolo de integração com a RNDS.	Protocolo aprovado e implementado em 12 meses.	Mapeamento de dados; definição de padrões; testes de integração.	Alinhamento com padrões HL7 e FHIR.	DATASUS, ConecteSUS, MS.	Protocolo publicado; integrações realizadas.	Testes de interoperabilidade e relatórios de conformidade.	Dados de DMDs integrados à RNDS.

E3.4	Estabelecer requisitos mínimos de segurança e conformidade com a LGPD.	Publicação de guia técnico em 9 meses.	Revisão legal; definição de parâmetros de segurança; validação.	Adoção de criptografia e controle de acesso baseado em perfis.	MS, ANPD, especialistas em segurança digital.	Guia publicado; conformidade das unidades.	Auditorias de segurança e análise de incidentes.	Proteção de dados pessoais e sigilo das informações.
E3.5	Validar piloto de interoperabilidade com hospitais públicos.	Piloto concluído em até 12 meses após desenvolvimento.	Seleção de hospitais; execução de testes; ajustes finais.	Escolher unidades de referência com diferentes portes e perfis.	MS, Rede Ebserh, hospitais estaduais e municipais.	Pilotos concluídos; taxa de sucesso na interoperabilidade.	Relatórios de avaliação e reuniões de feedback.	Modelo validado para expansão nacional.
E3.6	Capacitar equipes locais para uso do sistema.	100% das unidades implantadas com equipe treinada.	Cursos EAD e presenciais; manuais técnicos.	Parcerias com escolas de saúde pública e universidades.	Engenheiros clínicos, técnicos de TI, gestores hospitalares.	Número de profissionais capacitados; satisfação dos usuários.	Avaliações pós-treinamento e acompanhamento do uso.	Equipes aptas a operar sistemas de rastreabilidade.
E3.7	Disponibilizar painel de dados abertos sobre rastreamento de DMDs.	Painel disponível no portal do MS em 18 meses.	Desenvolvimento de dashboard; integração com base nacional.	Uso de ferramentas de BI (Power BI, Tableau).	DATASUS, MS, CGU.	Painel ativo; número de acessos.	Monitoramento mensal de uso e feedback de usuários.	Transparência e acesso público a informações consolidadas.
E3.8	Integrar rastreabilidade com sistemas de manutenção e calibração.	Integração concluída em até 24 meses.	Mapear sistemas existentes; criar conexões automáticas.	Padrões de interoperabilidade para manutenção hospitalar.	MS, fornecedores de software, engenheiros clínicos.	Percentual de sistemas integrados; registros sincronizados.	Auditorias e validação cruzada de dados.	Gestão técnica integrada e otimizada.
E3.9	Adotar tecnologias como blockchain para garantir integridade e auditabilidade dos dados.	Projeto piloto com blockchain implementado em até 18 meses.	Selecionar casos de uso; desenvolver e testar.	Parceria com universidades e empresas de tecnologia.	MS, DATASUS, parceiros tecnológicos.	Taxa de registros validados em blockchain.	Avaliação de desempenho e segurança da solução.	Confiabilidade e inviolabilidade dos registros.
E3.10	Integrar rastreabilidade com módulos de compras públicas (Gov.br Compras).	Integração operacional em até 24 meses.	Conectar dados de licitação, entrega, uso e descarte.	Uso de APIs do ComprasNet e Gov.br.	MS, Ministério da Economia, DATASUS.	Percentual de processos com rastreabilidade completa.	Relatórios semestrais de integração.	Cadeia de suprimentos de DMDs 100% rastreável.

EIXO 4	E4.1	Elaborar Diretriz Nacional para Reuso, Reprocessamento e Logística Reversa.	Publicar diretriz em até 12 meses.	Revisão bibliográfica; consulta a especialistas; validação com Anvisa.	Alinhamento com PNRS e legislações sanitárias.	MS, Anvisa, CONASS, CONASEMS.	Diretriz publicada; número de adesões estaduais.	Monitoramento de aplicação via relatórios estaduais.	Normatização nacional para práticas seguras e sustentáveis.
	E4.2	Publicar Nota Técnica com a Anvisa sobre remanufatura segura.	Publicação em até 9 meses.	Revisão técnica; análise de riscos; elaboração conjunta.	Utilizar evidências científicas e experiências internacionais.	MS, Anvisa, indústria.	Nota publicada; número de acessos.	Avaliação de implementação em auditorias sanitárias.	Segurança e confiabilidade na remanufatura.
	E4.3	Identificar fornecedores habilitados para remanufatura e certificação.	Cadastro disponível em até 12 meses.	Mapeamento nacional; validação de requisitos; publicação da lista.	Parcerias com órgãos de acreditação.	MS, Anvisa, fornecedores.	Número de fornecedores certificados.	Atualização anual do cadastro.	Rede confiável de fornecedores qualificados.
	E4.4	Lançar programa de doação regulada de DMDs.	Implantação piloto em 12 meses.	Definir critérios; criar sistema de registro; monitorar entregas.	Parcerias com hospitais e entidades filantrópicas.	MS, hospitais, ONGs.	Quantidade de DMDs doados; beneficiários atendidos.	Relatórios semestrais de doações.	Ampliação do acesso a DMDs e redução de descarte.
	E4.5	Estabelecer critérios sanitários para descarte ambientalmente adequado.	Guia técnico publicado em 9 meses.	Consulta pública; validação por órgãos ambientais e sanitários.	Alinhamento com CONAMA e PNRS.	MS, IBAMA, Anvisa.	Guia publicado; conformidade em inspeções.	Auditorias e inspeções ambientais.	Redução de impactos ambientais do descarte.
	E4.6	Articular com PNRS e consórcios públicos de resíduos.	Firmar 10 parcerias até 2 anos.	Estabelecer acordos de cooperação; definir fluxos logísticos.	Uso de estruturas já existentes de gestão de resíduos.	MS, consórcios, prefeituras.	Número de parcerias; volume de resíduos recolhidos.	Relatórios semestrais de execução.	Logística de resíduos mais eficiente e integrada.
	E4.7	Criar mecanismos de rastreio e retorno logístico de DMDs usados.	Implantar sistema piloto em 18 meses.	Desenvolvimento de sistema; integração com rastreabilidade nacional.	Aplicação de etiquetas RFID e UDI.	MS, hospitais, fornecedores.	Percentual de DMDs rastreados no retorno.	Auditoria de processos logísticos.	Aumento do reaproveitamento e rastreabilidade.

	E4.8	Desenvolver protocolo de descomissionamento seguro.	Publicar protocolo em 12 meses.	Revisão técnica; validação com especialistas; divulgação.	Basear-se em normas internacionais e ABNT.	MS, engenheiros clínicos, Anvisa.	Protocolo publicado; uso em auditorias.	Fiscalização em campo e relatórios anuais.	Segurança e padronização no descomissionamento.
	E4.9	Implantar sistema de logística reversa em parceria com fornecedores.	Implantar em 50% das UFs até 3 anos.	Acordos de cooperação; treinamento de equipes.	Parcerias público-privadas.	MS, fornecedores, hospitais.	Número de DMDs recolhidos via logística reversa.	Relatórios de desempenho logístico.	Fluxo reverso estruturado e eficiente.
	E4.10	Estabelecer parcerias com instituições de ciência e tecnologia para pesquisa em remanufatura segura.	5 parcerias formalizadas em 2 anos.	Identificar parceiros; definir projetos de pesquisa; buscar fomento.	Editais específicos de pesquisa aplicada.	MS, universidades, CNPq, Finep.	Número de projetos desenvolvidos.	Relatórios de resultados das pesquisas.	Avanço tecnológico e segurança na remanufatura.
	E4.11	Desenvolver campanha nacional de sensibilização para gestores e equipes sobre circularidade de DMDs.	Lançamento em até 9 meses.	Criar materiais educativos; promover eventos; divulgar em mídias.	Uso de redes sociais, TV e rádios comunitárias.	MS, hospitais, sociedade civil.	Número de ações realizadas; alcance da campanha.	Avaliação de engajamento e mudança de práticas.	Cultura institucional favorável à circularidade.
EIXO 5	E5.1	Desenvolver curso EAD nacional com certificação para técnicos.	Capacitar 5.000 técnicos em 2 anos.	Elaborar conteúdo; criar plataforma EAD; aplicar avaliações.	Parceria com UNA-SUS e instituições de ensino técnico.	MS, universidades, escolas técnicas.	Número de alunos certificados; taxa de conclusão.	Relatórios semestrais de participação e desempenho.	Profissionais capacitados em gestão de DMDs.
	E5.2	Produzir manual técnico de gestão de DMDs.	Manual publicado em 9 meses.	Levantamento de boas práticas; redação e revisão técnica.	Alinhamento com normas nacionais e internacionais.	MS, engenheiros clínicos, especialistas em manutenção.	Manual publicado; número de downloads.	Atualização bienal do conteúdo.	Documento de referência para padronização.
	E5.3	Lançar linha de fomento à inovação para rastreabilidade e circularidade.	Edital publicado em 12 meses.	Definir critérios; captar recursos; selecionar projetos.	Parceria com CNPq, Finep e agências estaduais.	MS, órgãos de fomento, ICTs.	Número de projetos financiados; impacto dos resultados.	Avaliação de resultados ao final de cada projeto.	Desenvolvimento de soluções inovadoras aplicadas à gestão de DMDs.

	E5.4	Articular projetos com universidades e IFs.	20 projetos articulados em 3 anos.	Formalizar parcerias; desenvolver pesquisas aplicadas.	Estímulo a TCCs, dissertações e teses sobre o tema.	MS, universidades, institutos federais.	Número de projetos ativos; produção científica.	Relatórios anuais de acompanhamento.	Ampliação do conhecimento técnico e científico sobre DMDs.
	E5.5	Criar programa de certificação por níveis (básico, intermediário, avançado) voltado à maturidade digital e sustentável.	Certificar 2.000 profissionais em 3 anos.	Desenvolver matriz de competências; criar provas e cursos.	Uso de plataforma digital de certificação.	MS, universidades, escolas técnicas.	Número de certificações emitidas; evolução de nível.	Monitoramento da progressão dos certificados.	Profissionais reconhecidos por competência técnica e digital.
	E5.6	Implantar laboratórios vivos (living labs) em hospitais de referência para testar soluções inovadoras.	Implantar 5 living labs em 3 anos.	Selecionar hospitais; instalar infraestrutura; executar pilotos.	Parcerias com startups e empresas de tecnologia.	MS, hospitais de referência, empresas.	Número de soluções testadas; taxa de adoção.	Relatórios de avaliação e análise de viabilidade.	Ambientes de experimentação que aceleram a inovação no SUS.
EIXO 6	E6.1	Definir conjunto de KPIs para o ciclo de vida dos DMDs.	Lista validada em 9 meses.	Identificar indicadores relevantes; validar com especialistas; alinhar com padrões internacionais.	Usar benchmarks de gestão hospitalar e circularidade.	MS, gestores hospitalares, especialistas em indicadores.	KPIs definidos e divulgados.	Revisão anual dos indicadores.	Monitoramento consistente do desempenho.
	E6.2	Estabelecer metas de implantação por região e porte hospitalar.	Metas publicadas em 6 meses.	Analisar perfil regional; definir metas proporcionais; pactuar com gestores estaduais.	Utilizar dados epidemiológicos e de capacidade instalada.	MS, secretarias estaduais e municipais.	Percentual de alcance das metas.	Acompanhamento trimestral de resultados.	Distribuição equilibrada da implantação.
	E6.3	Incluir DMDs nos relatórios do INMSD.	Inclusão no próximo ciclo do INMSD.	Adaptar formulário; treinar equipes para preenchimento; integrar sistemas.	Parceria com equipe técnica do INMSD.	MS, CGISD, gestores hospitalares.	Relatórios contendo dados de DMDs.	Verificação anual da completude dos dados.	Inclusão do tema na maturidade digital nacional.

E6.4	Publicar relatório nacional anual com recomendações técnicas.	1 relatório anual publicado.	Compilar dados; elaborar análises; publicar no portal MS.	Transparência e acesso aberto às informações.	MS, universidades, órgãos de controle.	Relatórios publicados e acessados.	Avaliação do uso das recomendações.	Disseminação de boas práticas e ajustes estratégicos.
E6.5	Criar ferramenta de autoavaliação digital para hospitais.	Ferramenta disponível em 12 meses.	Desenvolver plataforma; criar questionários; gerar relatórios automáticos.	Basear-se em metodologias já utilizadas pelo SUS Digital.	MS, equipe de TI, hospitais.	Número de hospitais que utilizam a ferramenta.	Relatórios de adesão e resultados.	Autodiagnóstico e melhoria contínua da gestão.
E6.6	Implantar painel de desempenho regionalizado.	Painel ativo em 18 meses.	Integrar dados; criar filtros por região e porte; disponibilizar publicamente.	Uso de ferramentas de BI e dados abertos.	MS, DATASUS, gestores regionais.	Acessos e consultas ao painel.	Atualização mensal dos dados.	Transparência e gestão baseada em evidências.
E6.7	Realizar auditorias anuais amostrais para verificar conformidade e qualidade dos dados.	1 auditoria por ano.	Definir amostra; aplicar checklists; emitir relatórios.	Parceria com órgãos de controle e auditoria do SUS.	MS, CGU, secretarias de saúde.	Percentual de conformidade encontrado.	Relatórios de auditoria com recomendações.	Confiabilidade dos dados e processos.
E6.8	Criar índice nacional de circularidade de DMDs como indicador estratégico.	Índice calculado anualmente.	Definir metodologia; coletar dados; divulgar resultados.	Basear-se em práticas internacionais e métricas de economia circular.	MS, universidades, especialistas em sustentabilidade.	Valor do índice; evolução anual.	Publicação em relatórios técnicos.	Medição da efetividade da circularidade.
E6.9	Propor e estruturar o Índice Nacional de Maturidade em Gestão de DMDs (INMG-DMD).	Índice piloto em 2 anos.	Definir critérios; criar ferramenta de avaliação; aplicar em hospitais-piloto.	Inspirar-se no INMSD e em modelos internacionais.	MS, universidades, consultores em gestão.	Pontuação média dos hospitais avaliados.	Comparativos regionais e nacionais.	Avaliação estruturada da maturidade na gestão de DMDs.

Fonte: Elaboração própria com base no contexto atual de gestão de DMDs e nos documentos normativos (2025).

O Plano de Gestão, estruturado em eixos estratégicos, apresenta-se como uma resposta organizada e sistêmica às fragilidades identificadas no inventário de necessidades dos DMDs. Ao articular governança, regulação, práticas sustentáveis, capacitação técnica, inovação e monitoramento contínuo, o plano propõe um conjunto de ações integradas que dialogam diretamente com os diferentes níveis de atenção à saúde.

A disposição das atividades em eixos garante clareza, objetividade e foco na execução, ao mesmo tempo em que mantém alinhamento com diretrizes nacionais, como o Plano Nacional de Saúde e o Programa SUS Digital. Dessa forma, o PDGDMD não se limita a um conjunto de ações isoladas, mas configura-se como uma estratégia abrangente e coordenada, capaz de fortalecer a gestão de DMDs em todo o território nacional, promovendo maior eficiência, sustentabilidade e segurança sanitária.

O alinhamento com as lentes teóricas adotadas nesta tese é igualmente claro: a Teoria da Complexidade permite compreender a articulação de múltiplos atores em um sistema adaptativo como o SUS; a Teoria das Capacidades Dinâmicas explica a necessidade de reconfiguração contínua de recursos e processos para atender novas demandas; e a Teoria Sociotécnica destaca o equilíbrio entre tecnologias, normas e práticas humanas na gestão dos DMDs. Dessa forma, o Plano de Gestão por Eixos constitui não apenas uma ferramenta de planejamento, mas um instrumento estratégico e científico, endossado por evidências empíricas, normativas e teóricas, para a transformação sustentável da saúde pública brasileira.

7 Riscos e Estratégias para Mitigação no PDGDMD

A identificação dos riscos e a proposição de estratégias de mitigação constituem etapas fundamentais para assegurar a efetividade e a sustentabilidade do PDGDMD. Essa sistematização foi construída a partir da consolidação das fragilidades evidenciadas no inventário de necessidades, dos achados das revisões de literatura que mapearam barreiras à implementação da Economia Circular em hospitais (Artigo 2), das evidências empíricas coletadas junto a gestores hospitalares (Artigo 4) e da análise de documentos normativos nacionais e internacionais aplicáveis à gestão de dispositivos médicos. Dessa forma, os riscos aqui apresentados não decorrem de percepções isoladas, mas de um processo analítico fundamentado em múltiplas fontes de evidência.

Trata-se de uma etapa essencial, pois reconhece a complexidade do contexto hospitalar e a multiplicidade de atores envolvidos, reforçando a necessidade de planejamento preventivo e de articulação institucional. O Quadro 9, intitulada “Riscos e Estratégias de Mitigação do

PDGDMD”, apresenta a sistematização desses riscos para cada eixo estratégico, acompanhados das respectivas medidas de mitigação sugeridas.

Quadro 9 – Riscos *versus* mitigação por eixo estratégico

Eixo	Código da Ação	Descrição da Ação/ Atividade	Risco	Estratégia para Mitigação
Eixo 1	E1.1	Instituir Comitê Gestor Nacional de Gestão de DMDs no SUS.	Resistência institucional ou conflitos de interesse entre órgãos.	Realizar reuniões de sensibilização, alinhamento de objetivos e definição clara de papéis desde o início.
	E1.2	Criar Grupo Técnico-Executivo com Anvisa, CONASS, CONASEMS, FNS, Rede Ebserh e Coordenação-Geral de Engenharia Clínica.	Dificuldade de engajamento e participação contínua dos membros.	Formalizar compromissos via portaria, com cronograma fixo e metas pactuadas.
	E1.3	Estabelecer plano de adesão federativa (com metas e pactuações).	Baixa adesão de estados e municípios por limitações orçamentárias ou técnicas.	Criar incentivos financeiros e suporte técnico para adesão, priorizando regiões com maior vulnerabilidade.
	E1.4	Regulamentar o PDGDMD via Portaria Ministerial.	Atrasos na tramitação normativa.	Antecipar articulação com áreas jurídicas e técnicas, elaborando minuta com base em consensos prévios.
	E1.5	Incluir diretrizes do PDGDMD no Planejamento Estratégico do MS.	Competição com outras prioridades estratégicas do Ministério.	Demonstrar evidências de impacto positivo em custo-efetividade e sustentabilidade do sistema.
	E1.6	Integrar o PDGDMD às instâncias do Comitê Nacional de Saúde Digital para alinhamento contínuo.	Falta de integração entre agendas digitais e de gestão de DMDs.	Criar agenda conjunta de reuniões e painéis de monitoramento compartilhados.
Eixo 2	E2.1	Consolidar Tabela Nacional de Classificação de DMDs.	Falta de consenso técnico sobre critérios de classificação.	Criar grupo de especialistas multidisciplinar e realizar consulta pública.
	E2.2	Publicar ficha técnica por grupo de DMD.	Inconsistência de dados ou desatualização.	Estabelecer revisão periódica com base em evidências e dados de mercado.

	E2.3	Alinhar o catálogo de DMDs ao SIGEM, SIASG e demais bases públicas.	Problemas de interoperabilidade entre sistemas.	Utilizar padrões internacionais de codificação e integração.
	E2.4	Incorporar identificadores únicos por dispositivo (UDI).	Falta de infraestrutura hospitalar para registro.	Fornecer kits tecnológicos e capacitação para uso do UDI.
	E2.5	Criar banco de dados nacional com DMDs prioritários para circularidade.	Dados incompletos ou inconsistentes.	Implantar mecanismos de validação e integração automática de informações.
	E2.6	Estabelecer critérios técnicos de obsolescência e revalorização.	Resistência de fornecedores e gestores.	Fundamentar critérios em normas técnicas e estudos de custo-benefício.
	E2.7	Garantir alinhamento com normas da ABNT e padrões GS1 para interoperabilidade com fornecedores.	Divergência entre padrões nacionais e internacionais.	Adotar harmonização regulatória com participação de órgãos técnicos.
	E2.8	Revisar periodicamente a Tabela Nacional de Classificação incorporando inovações tecnológicas e novos critérios de circularidade.	Falta de atualização tempestiva.	Instituir calendário fixo de revisão com participação do setor produtivo.
	E3.1	Desenvolver módulo específico em plataforma nacional.	Atrasos no desenvolvimento tecnológico.	Adotar gestão ágil de projetos e contratos de desempenho.
	E3.2	Criar sistema de registro e histórico técnico dos dispositivos por unidade.	Baixa adesão das unidades de saúde.	Oferecer treinamentos e integrar sistema a processos já existentes.
Eixo 3	E3.3	Definir protocolo de integração com a RNDS.	Incompatibilidade técnica com sistemas locais.	Testes-piloto e ajustes técnicos antes da implementação nacional.
	E3.4	Estabelecer requisitos mínimos de segurança e conformidade com a LGPD.	Vazamento ou mau uso de dados.	Auditorias periódicas e uso de criptografia robusta.
	E3.5	Validar piloto de interoperabilidade com hospitais públicos.	Falhas no piloto comprometendo a escala.	Selecionar hospitais representativos e acompanhar de perto a execução.

	E3.6	Capacitar equipes locais para uso do sistema.	Alta rotatividade de profissionais treinados.	Criar cursos EAD e manuais técnicos permanentes.
	E3.7	Disponibilizar painel de dados abertos sobre rastreamento de DMDs.	Uso indevido ou interpretação incorreta dos dados.	Fornecer dados anonimizados e guias de interpretação.
	E3.8	Integrar rastreabilidade com sistemas de manutenção e calibração.	Dificuldade técnica de integração.	Utilizar APIs abertas e padrões compatíveis.
	E3.9	Adotar tecnologias como blockchain para garantir integridade e auditabilidade dos dados.	Custo elevado de implementação.	Buscar parcerias público-privadas para cofinanciamento.
	E3.10	Integrar rastreabilidade com módulos de compras públicas.	Resistência de fornecedores.	Sensibilização e capacitação dos fornecedores para adequação.
	E4.1	Elaborar Diretriz Nacional para Reuso, Reprocessamento e Logística Reversa.	Resistência regulatória e técnica.	Envolver Anvisa e especialistas desde a elaboração inicial.
	E4.2	Publicar Nota Técnica com a Anvisa sobre remanufatura segura.	Divergências regulatórias.	Basear nota em evidências científicas e normas internacionais.
	E4.3	Identificar fornecedores habilitados para remanufatura e certificação.	Escassez de fornecedores qualificados.	Criar programa de capacitação e certificação.
	E4.4	Lançar programa de doação regulada de DMDs.	Risco de doações inadequadas.	Criar critérios rigorosos de aceitação e rastreio.
	E4.5	Estabelecer critérios sanitários para descarte ambientalmente adequado.	Descarte irregular de resíduos.	Fiscalização e penalidades em caso de descumprimento.
Eixo 4	E4.6	Articular com PNRS e consórcios públicos de resíduos.	Falta de adesão dos entes federados.	Incentivos financeiros e compartilhamento de infraestrutura.
	E4.7	Criar mecanismos de rastreio e retorno logístico de DMDs usados.	Perda de dispositivos no transporte.	Sistemas de rastreio em tempo real.
	E4.8	Desenvolver protocolo de descomissionamento seguro.	Descarte inadequado por falta de padrão.	Treinamento e padronização de procedimentos.

	E4.9	Implantar sistema de logística reversa em parceria com fornecedores.	Custo elevado de transporte e processamento.	Negociação de contratos de logística compartilhada.
	E4.10	Estabelecer parcerias com instituições de ciência e tecnologia para pesquisa em remanufatura segura.	Falta de interesse acadêmico ou recursos.	Programas de fomento e editais específicos.
	E4.11	Desenvolver campanha nacional de sensibilização para gestores e equipes sobre circularidade de DMDs.	Baixa adesão à campanha.	Estratégia de comunicação segmentada e multiplataforma.
Eixo 5	E5.1	Desenvolver curso EAD nacional com certificação para técnicos.	Baixa participação.	Divulgar amplamente e integrar a programas de progressão funcional.
	E5.2	Produzir manual técnico de gestão de DMDs.	Não utilização pelos profissionais.	Distribuição obrigatória e integração em treinamentos.
	E5.3	Lançar linha de fomento à inovação para rastreabilidade e circularidade.	Falta de propostas qualificadas.	Realizar workshops preparatórios com potenciais proponentes.
	E5.4	Articular projetos com universidades e IFs.	Baixo interesse acadêmico.	Criar incentivos financeiros e reconhecimento institucional.
	E5.5	Criar programa de certificação por níveis voltado à maturidade digital e sustentável.	Falta de adesão das instituições.	Vincular certificação a benefícios em editais e contratos.
	E5.6	Implantar laboratórios vivos em hospitais de referência.	Infraestrutura inadequada.	Seleção criteriosa de hospitais e financiamento específico.
Eixo 6	E6.1	Definir conjunto de KPIs para o ciclo de vida dos DMDs.	Indicadores mal definidos ou irrelevantes.	Consultar especialistas e revisar periodicamente.
	E6.2	Estabelecer metas de implantação por região e porte hospitalar.	Metas incompatíveis com a realidade local.	Adotar abordagem gradual e adaptativa.
	E6.3	Incluir DMDs nos relatórios do INMSD.	Falta de integração de dados.	Automatizar processos de coleta.
	E6.4	Publicar relatório nacional anual com recomendações técnicas.	Atrasos na publicação.	Cronograma fixo com responsabilidades definidas.

	E6.5	Criar ferramenta de autoavaliação digital para hospitais.	Subutilização da ferramenta.	Treinamentos e suporte contínuo.
	E6.6	Implantar painel de desempenho regionalizado.	Dados inconsistentes ou desatualizados.	Validação automática e auditorias periódicas.
	E6.7	Realizar auditorias anuais amostrais para verificar conformidade e qualidade dos dados.	Resistência das instituições auditadas.	Comunicação prévia e foco em melhoria contínua.
	E6.8	Criar índice nacional de circularidade de DMDs como indicador estratégico.	Falta de dados para cálculo.	Exigir dados como contrapartida em financiamentos.
	E6.9	Propor e estruturar o Índice Nacional de Maturidade em Gestão de DMDs (INMG-DMD).	Complexidade na coleta e padronização dos dados.	Desenvolver metodologia simples e validada previamente.

Fonte: Elaboração própria com base no contexto atual de gestão de DMDs e nos documentos normativos (2025).

De modo geral, a análise evidencia que os riscos variam desde resistências institucionais, dificuldades técnicas e insuficiências de infraestrutura, até lacunas normativas, culturais e limitações na adesão federativa. Destacam-se a resistência de gestores e profissionais à adoção de novas práticas, a insuficiência de infraestrutura tecnológica, a fragmentação de responsabilidades entre diferentes níveis federativos, a carência de capacitação técnica continuada e lacunas em normativas específicas para circularidade e rastreabilidade de dispositivos. Esses pontos refletem barreiras já amplamente documentadas pela literatura sobre saúde pública e sustentabilidade hospitalar (Beltrami et al., 2021; Govindan et al., 2024; Qureshi et al., 2024).

As estratégias de mitigação propostas incluem mecanismos de sensibilização e pactuação política nos fóruns interfederativos, fortalecimento da governança nacional, investimentos em infraestrutura e interoperabilidade digital, capacitação permanente das equipes técnicas, adoção de referências internacionais para padronização e fortalecimento de marcos regulatórios nacionais. Tais estratégias buscam não apenas responder a riscos imediatos, mas também criar condições estruturantes para a institucionalização do plano no longo prazo.

Ao antecipar potenciais barreiras e propor soluções práticas, o mapeamento de riscos e estratégias de mitigação confere maior robustez ao PDGDMD, assegurando que sua implementação não apenas responda às necessidades identificadas, mas também esteja preparada para lidar com barreiras previsíveis, fortalecendo sua viabilidade e sustentabilidade

em longo prazo. Assim, a análise contribui para garantir que a implementação do plano não seja comprometida por obstáculos previsíveis, mas sim fortalecida por uma lógica preventiva, adaptativa e sustentada em evidências científicas e normativas.

8 Pontos de Controle e Revisão do PDGDMD

A definição de pontos de controle e mecanismos de revisão periódica constitui uma etapa essencial para assegurar a efetividade do PDGDMD e evitar a recorrência das fragilidades observadas na gestão de dispositivos médicos duráveis no SUS. A ausência de inventários sistematizados, os registros incompletos e a baixa integração entre instâncias gestoras, evidenciados nos estudos empíricos (Artigo 4) e confirmados pelas revisões sistemáticas sobre barreiras institucionais (Artigo 2), indicam a necessidade de instrumentos permanentes de acompanhamento e avaliação. Essa proposta dialoga diretamente com recomendações normativas presentes no Plano Nacional de Saúde 2024–2027, no Programa SUS Digital e na Estratégia Nacional de Governo Digital, que destacam a importância da governança de dados, do monitoramento contínuo e da transparência como princípios estruturantes da gestão pública em saúde (Savaget et al., 2019; Govindan et al., 2024).

Nesse contexto, os pontos de controle e revisão do PDGDMD foram estruturados em quatro dimensões complementares, de modo a garantir acompanhamento contínuo, transparência, retroalimentação das ações e capacidade adaptativa diante de mudanças institucionais, regulatórias ou tecnológicas.

- a) **Periodicidade dos Checkpoints** – Prevê a realização de checkpoints semestrais para avaliar o andamento das ações em cada eixo estratégico. Essa periodicidade foi definida em consonância com práticas já previstas no PNS 2024–2027, permitindo equilíbrio entre acompanhamento próximo e viabilidade operacional. Esses encontros, presenciais ou online, envolverão o Comitê Gestor Nacional, coordenadores estaduais e parceiros estratégicos. Cada checkpoint deverá gerar relatórios parciais com status (concluído, em andamento ou não iniciado) e apontamento de riscos emergentes, permitindo um monitoramento tempestivo e responsivo.
- b) **Auditorias Técnicas e Operacionais** – Serão conduzidas auditorias internas pelo Comitê Gestor, com foco no cumprimento de prazos, aderência às normas, eficiência no uso de recursos e conformidade regulatória. Auditorias externas anuais realizadas por órgãos como CGU e TCU reforçarão a credibilidade e a legitimidade do processo, alinhando o PDGDMD

a práticas consolidadas de *accountability* pública (Campos; Pereira Jr., 2021). Estão previstas também auditorias específicas por eixo, como interoperabilidade e segurança da informação, rastreabilidade sanitária e validação de indicadores estratégicos, assegurando aderência às exigências técnicas e regulatórias nacionais.

- c) Relatórios Nacionais Anuais com Recomendações – Produzidos pelo Comitê Gestor e divulgados pelo Ministério da Saúde, esses relatórios trarão um resumo executivo do avanço por eixo, indicadores de desempenho (KPIs), análise de riscos e recomendações de ajuste. Também funcionarão como instrumentos de transparência, incluindo boas práticas, contribuições de estados, municípios e parceiros, sendo submetidos ao Conselho Nacional de Saúde e ao Comitê Nacional de Saúde Digital para validação, de modo a fortalecer a pactuação social e institucional.
- d) Revisão Estratégica – Prevista em duas etapas, a primeira ocorrerá em 2027, com revisão de prioridades, cronograma e incorporação de inovações. A segunda será a revisão final em 2028, destinada a consolidar os resultados alcançados, avaliar a continuidade das ações e preparar a base para o próximo ciclo (2029–2031). Essa lógica garante aderência ao ciclo PDCA e reforça a necessidade de reconfiguração contínua das capacidades institucionais, em consonância com a literatura sobre políticas adaptativas e capacidades dinâmicas (Govindan et al., 2024).

Em conjunto, esses pontos de controle asseguram não apenas a execução ordenada do plano, mas também sua capacidade de adaptação frente a mudanças no contexto tecnológico, regulatório e institucional e desafios emergentes. Ao articular checkpoints, auditorias, relatórios e revisões estratégicas, o PDGDMD avança na institucionalização de uma governança baseada em evidências, em conformidade com as recomendações da literatura e das normativas nacionais. Esse processo contribui para a consolidação de um modelo de gestão de dispositivos médicos duráveis que seja sustentável, transparente e capaz de responder à complexidade do SUS.

9 Cronograma de Implementação do PDGDMD

O cronograma de implementação do PDGDMD, apresentado na Figura 21, estabelece uma trajetória progressiva e estruturada para a consolidação de um sistema nacional de gestão sustentável. O planejamento foi dividido em três fases principais, iniciando em 2026 com a estruturação e normatização, avançando em 2027 para a integração e implementação piloto e,

finalmente, em 2028 alcançando a escala nacional e o monitoramento. Cada etapa contempla marcos específicos – como a criação de comitês, definição de KPIs, alinhamento de sistemas de informação e implantação de programas de certificação – que asseguram coerência metodológica e viabilidade prática para o alcance dos objetivos estratégicos do plano.

Figura 21 – Cronograma de implementação do PDGDMD



Fonte: Elaboração própria com base no contexto atual de gestão de DMDs e nos documentos normativos (2025).

A adoção desse horizonte temporal e de marcos graduais revela-se fundamental para garantir a maturação das iniciativas, possibilitando que as bases legais, técnicas e operacionais sejam consolidadas antes da expansão em larga escala. O ano de 2027, por exemplo, é destinado à integração de sistemas e testes-piloto, momento crucial para validar protocolos, capacitar equipes e assegurar interoperabilidade entre plataformas.

Já 2028 representa a fase de consolidação, com a implantação definitiva de ferramentas de monitoramento, auditorias periódicas e indicadores nacionais de circularidade e maturidade em gestão de DMDs. Dessa forma, o cronograma não apenas orienta a execução, mas também cria condições para que o plano seja testado, ajustado e fortalecido em etapas, garantindo que os resultados esperados se traduzam em ganhos efetivos para o sistema de saúde. O Quadro 10 apresenta um *roadmap* com as atividades organizadas no horizonte de tempo e as tecnologias da I4.0 que podem ser implementadas nesse contexto.

O *roadmap* apresentado organiza de forma sistemática as ações estratégicas do PDGDMD ao longo do período de 2026 a 2028, permitindo visualizar a sequência temporal e a integração das iniciativas por eixo. A estruturação do cronograma está segmentada nos 6 seis eixos temáticos, o que assegura coerência entre objetivos estratégicos, responsabilidades institucionais e tecnologias aplicadas.

Cada ação é codificada e distribuída nos semestres correspondentes à sua implementação, de modo a evidenciar tanto atividades de caráter fundacional, como a criação de comitês, grupos técnicos e regulamentações iniciais, quanto ações de médio e longo prazo, voltadas à consolidação de práticas de rastreabilidade, circularidade e monitoramento digital. A incorporação das tecnologias da I4.0 foi indicada por meio de siglas específicas (IoT – Internet das Coisas, ML – *Machine Learning*, BDA – *Big Data & Analytics*, AI – Inteligência Artificial, CC – Computação em Nuvem, SS – *Smart Sensors*), inseridas diretamente nas células da tabela, o que facilita a identificação da aplicabilidade tecnológica em cada etapa. Esse recurso visual, complementado pela legenda, permite reconhecer com clareza o papel de cada tecnologia no avanço da maturidade digital e sustentável dos hospitais.

A distribuição temporal também considera a lógica de dependência entre etapas: inicialmente, privilegia-se a consolidação de marcos institucionais e normativos (Eixo 1), que servem de base para a padronização e interoperabilidade (Eixos 2 e 3). Em seguida, ações de sustentabilidade, circularidade e inovação aplicada (Eixos 4 e 5) ganham centralidade, culminando no monitoramento contínuo e na avaliação da maturidade digital (Eixo 6). Dessa forma, o *roadmap* funciona não apenas como um cronograma, mas como um instrumento de gestão estratégica que integra ações institucionais, tecnológicas e regulatórias em uma trajetória progressiva de transformação.

Quadro 10 – Roadmap Estratégico de Implementação do PDGDMD com Aplicação de Tecnologias da I4.0 (2026–2028)

EIXO	CÓDIGO DA AÇÃO	DESCRIÇÃO DA AÇÃO/ATIVIDADE	INDIVÍDUOS ENVOLVIDOS	2026/1	2026/2	2027/1	2027/2	2028/1	2028/2
Eixo 1 – Governança Nacional da Gestão de DMDs	E1.1	Instituir Comitê Gestor Nacional de Gestão de DMDs no SUS.	Representantes do MS, Anvisa, CONASS, CONASEMS, Rede Ebserh, hospitais de referência.	CC					
	E1.2	Criar Grupo Técnico-Executivo com Anvisa, CONASS, CONASEMS, FNS, Rede Ebserh e Coordenação-Geral de Engenharia Clínica.	Técnicos das instituições envolvidas.	CC					
	E1.3	Estabelecer plano de adesão federativa (com metas e pactuações).	MS, secretarias estaduais e municipais de saúde.		BDA, CC				
	E1.4	Regulamentar o PDGDMD via Portaria Ministerial.	MS (Secretaria de Atenção Especializada à Saúde, Consultoria Jurídica).		CC				
	E1.5	Incluir diretrizes do PDGDMD no Planejamento Estratégico do MS.	Secretaria-Executiva do MS, áreas técnicas.			BDA			
	E1.6	Integrar o PDGDMD às instâncias do Comitê Nacional de Saúde Digital para alinhamento contínuo.	MS, Comitê Nacional de Saúde Digital, DATASUS.			BDA, CC			
Eixo 2 – Classificação, Padronização e Catálogo Nacional	E2.1	Consolidar Tabela Nacional de Classificação de DMDs	MS, Anvisa, ABNT, CONASS, CONASEMS, especialistas em engenharia clínica.	BDA, CC					
	E2.2	Publicar ficha técnica por grupo de DMD	MS, hospitais de referência, fabricantes, Anvisa.		CC				
	E2.3	Alinhar o catálogo de DMDs ao SIGEM, SIASG e demais bases públicas	DATASUS, ComprasNet, equipes de TI do MS.			CC, IoT			
	E2.4	Incorporar identificadores únicos por dispositivo (UDI)	MS, Anvisa, fornecedores, engenheiros clínicos.			IoT, SS			
	E2.5	Criar banco de dados nacional com DMDs prioritários para circularidade	MS, Anvisa, Rede Ebserh, fornecedores.			BDA, CC			
	E2.6	Estabelecer critérios técnicos de obsolescência e revalorização	MS, Anvisa, associações de fabricantes, ABNT.				ML, AI, BDA		
	E2.7	Garantir alinhamento com normas da ABNT e padrões GS1 para	MS, Anvisa, ABNT, GS1 Brasil.			BDA, CC			

		interoperabilidade com fornecedores.							
	E2.8	Revisar periodicamente a Tabela Nacional de Classificação incorporando inovações tecnológicas e novos critérios de circularidade.	MS, Comitê Gestor, especialistas setoriais.					ML, AI, BDA	
Eixo 3 – Rastreabilidade Digital e Interoperabilidade	E3.1	Desenvolver módulo específico em plataforma nacional (Hórus, SIGEM ou e-SUS).	DATASUS, MS, equipes de TI hospitalares.		CC, IoT				
	E3.2	Criar sistema de registro e histórico técnico dos dispositivos por unidade.	Engenheiros clínicos, equipes de TI.			IoT, SS			
	E3.3	Definir protocolo de integração com a RNDS.	DATASUS, ConecteSUS, MS.			BDA, CC			
	E3.4	Estabelecer requisitos mínimos de segurança e conformidade com a LGPD.	MS, ANPD, especialistas em segurança digital.			AI, CC			
	E3.5	Validar piloto de interoperabilidade com hospitais públicos.	MS, Rede Ebserh, hospitais estaduais e municipais.				IoT, CC		
	E3.6	Capacitar equipes locais para uso do sistema.	Engenheiros clínicos, técnicos de TI, gestores hospitalares.				CC		
	E3.7	Disponibilizar painel de dados abertos sobre rastreamento de DMDs.	DATASUS, MS, CGU.					BDA, CC	
	E3.8	Integrar rastreabilidade com sistemas de manutenção e calibração.	MS, fornecedores de software, engenheiros clínicos.					IoT, SS	
	E3.9	Adotar tecnologias como blockchain para garantir integridade e auditabilidade dos dados.	MS, DATASUS, parceiros tecnológicos.					BDA, AI, CC	
	E3.10	Integrar rastreabilidade com módulos de compras públicas (Gov.br Compras) para acompanhamento desde licitação até descarte.	MS, Ministério da Economia, DATASUS.					BDA, CC	
Eixo 4 – Sustentabilidade e Circularidade de DMDs	E4.1	Elaborar Diretriz Nacional para Reuso, Reprocessamento e Logística Reversa	MS, Anvisa, CONASS, CONASEMS.	BDA, CC					
	E4.2	Publicar Nota Técnica com a Anvisa sobre remanufatura segura	MS, Anvisa, indústria.		CC				
	E4.3	Identificar fornecedores habilitados para remanufatura e certificação	MS, Anvisa, fornecedores.			BDA, AI			
	E4.4	Lançar programa de doação regulada de	MS, hospitais, ONGs.			BDA, CC			

		DMDs							
	E4.5	Estabelecer critérios sanitários para descarte ambientalmente adequado	MS, IBAMA, Anvisa.				ML, AI, BDA		
	E4.6	Articular com PNRS e consórcios públicos de resíduos	MS, consórcios, prefeituras.				BDA, CC		
	E4.7	Criar mecanismos de rastreio e retorno logístico de DMDs usados	MS, hospitais, fornecedores.				IoT, SS		
	E4.8	Desenvolver protocolo de descomissionamento seguro	MS, engenheiros clínicos, Anvisa.				IoT, AI		
	E4.9	Implantar sistema de logística reversa em parceria com fornecedores	MS, fornecedores, hospitais.					IoT, BDA, CC	
	E4.10	Estabelecer parcerias com instituições de ciência e tecnologia para pesquisa em remanufatura segura.	MS, universidades, CNPq, Finep.					ML, AI	
	E4.11	Desenvolver campanha nacional de sensibilização para gestores e equipes sobre circularidade de DMDs.	MS, hospitais, sociedade civil.					BDA, CC	
Eixo 5 – Formação Técnica e Inovação Aplicada	E5.1	Desenvolver curso EAD nacional com certificação para técnicos	MS, universidades, escolas técnicas.		CC				
	E5.2	Produzir manual técnico de gestão de DMDs	MS, engenheiros clínicos, especialistas em manutenção.			CC			
	E5.3	Lançar linha de fomento à inovação para rastreabilidade e circularidade	MS, órgãos de fomento, ICTs.				ML, AI, BDA		
	E5.4	Articular projetos com universidades e IFs	MS, universidades, institutos federais.				BDA, CC		
	E5.5	Criar programa de certificação por níveis (básico, intermediário, avançado) voltado à maturidade digital e sustentável.	MS, universidades, escolas técnicas.					BDA, AI, CC	
	E5.6	Implantar laboratórios vivos (living labs) em hospitais de referência para testar soluções inovadoras.	MS, hospitais de referência, empresas.					IoT, ML, AI, BDA, CC, SS	
Eixo 6 – Monitoramento, Avaliação e Maturidade	E6.1	Definir conjunto de KPIs para o ciclo de vida dos DMDs	MS, gestores hospitalares, especialistas em indicadores.		BDA, CC				
	E6.2	Estabelecer metas de implantação por região e porte hospitalar	MS, secretarias estaduais e municipais.			BDA, CC			

Digital	E6.3	Incluir DMDs nos relatórios do INMSD	MS, CGISD, gestores hospitalares.				CC		
	E6.4	Publicar relatório nacional anual com recomendações técnicas	MS, universidades, órgãos de controle.				BDA, CC		
	E6.5	Criar ferramenta de autoavaliação digital para hospitais	MS, equipe de TI, hospitais.					BDA, AI, CC	
	E6.6	Implantar painel de desempenho regionalizado	MS, DATASUS, gestores regionais.					BDA, CC	
	E6.7	Realizar auditorias anuais amostrais para verificar conformidade e qualidade dos dados.	MS, CGU, secretarias de saúde.					ML, AI, BDA	
	E6.8	Criar índice nacional de circularidade de DMDs como indicador estratégico.	MS, universidades, especialistas em sustentabilidade.					ML, AI, BDA	
	E6.9	Propor e estruturar o Índice Nacional de Maturidade em Gestão de DMDs (INMG-DMD)	MS, universidades, consultores em gestão.						ML, AI, BDA

Fonte: Elaboração própria (2025). Legenda – Tecnologias da I4.0 aplicadas ao PDGDMD: IoT – Internet das Coisas; ML – Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*); BDA – Big Data & Analytics; AI – Inteligência Artificial; CC – Computação em Nuvem (*Cloud Computing*); SS – *Smart Sensors*.

10 Potenciais parceiros por eixo estratégico

A execução do PDGDMD depende de uma governança verticalizada, em que as ações propostas sejam implementadas em todos os níveis da cadeia de responsabilidade, partindo do Ministério da Saúde e alcançando secretarias estaduais, secretarias municipais e hospitais. Essa estrutura assegura que a coordenação nacional oriente a execução local, evitando fragmentação e garantindo que os parceiros externos atuem de forma integrada ao arranjo institucional já consolidado.

A definição dos potenciais parceiros decorreu da análise das necessidades identificadas no inventário (Seção 4), das diretrizes estratégicas (Seção 5) e da estruturação do plano por eixos (Seção 6). Além disso, foram consideradas as evidências empíricas da pesquisa, que apontaram a importância da cooperação interinstitucional para enfrentar barreiras de infraestrutura, capacitação e inovação tecnológica, e as recomendações de literatura sobre governança colaborativa em saúde (Campos; Pereira Jr., 2021; Savaget et al., 2019; Govindan et al., 2024). Dessa forma, os parceiros foram definidos não como uma lista arbitrária, mas como resultado de um processo analítico fundamentado em evidências científicas, normativas e empíricas.

A lógica adotada estabelece que cada eixo estratégico demanda tipos específicos de parceiros, de modo a fortalecer capacidades técnicas, operacionais e científicas que extrapolam o escopo interno do SUS. Universidades e centros de pesquisa contribuem com capacitação e inovação aplicada; fornecedores e indústrias oferecem soluções tecnológicas; organismos internacionais trazem padrões globais de referência; enquanto entidades representativas garantem articulação política e pactuação federativa. Essa rede de cooperação amplia a capacidade de implementação do PDGDMD e favorece a institucionalização de práticas de Economia Circular e Saúde Digital.

A matriz apresentada no Quadro 3 sistematiza os potenciais parceiros por eixo estratégico do PDGDMD, indicando o papel esperado de cada categoria de ator institucional. Essa disposição permite visualizar a lógica de governança verticalizada, partindo do Ministério da Saúde até os hospitais, mas incorporando atores regulatórios, técnicos, científicos e internacionais de forma transversal.

Quadro 11 – Matriz de potenciais parceiros e seu papel em cada eixo estratégico do PDGDMD

Eixos estratégicos	MS e órgãos federais	Agências reguladoras	Entidades interfederativas	Secretarias Estaduais de Saúde	Secretarias Municipais de Saúde	Conselhos de Saúde	Universidades e centros de pesquisa	Empresas e provedores de tecnologia	Organismos internacionais	Órgãos de controle e auditoria
Eixo 1 – Governança Nacional da Gestão de DMDs	MS (SCTIE, SAS, SGEP): coordenação do Comitê Gestor Nacional; edição de portarias; financiamento. CGEC/MS: orientação técnica em engenharia clínica.	Anvisa: emissão de regulamentos e notas técnicas; harmonização regulatória.	CONASS e CONASEMS : pactuação federativa; apoio técnico e político. Rede Ebserh: integração de hospitais universitários.	Coordenação regional; alinhamento das diretrizes nacionais; monitoramento estadual.	Implementação em UPAs e hospitais municipais; alimentação de sistemas nacionais.	Validação social; fiscalização cidadã da execução; recomendações deliberativas.	Apoio metodológico em governança e avaliação de políticas.	—	OPAS/OMS : apoio técnico internacional e alinhamento global.	—
Eixo 2 – Classificação, Padronização e Catálogo Nacional	MS: institucionalização do catálogo nacional e sua atualização.	Anvisa: alinhamento regulatório de classificação e rotulagem.	ABNT: normalização. ABIMO: adesão setorial. GS1 Brasil: padrões UDI.	Adaptação da classificação às redes estaduais; capacitação regional.	Alimentação dos sistemas locais com codificação padronizada.	Acompanhamento da adoção e fiscalização da aplicação local.	INMETRO, IPT, Institutos de tecnologia: metrologia, testes e banco de dados.	Indústria de equipamentos médicos: metadados técnicos e rotulagem.	ISO, IEC: harmonização internacional de normas.	—
Eixo 3 – Rastreabilidade e Digital e Interoperabilidade	Departamento de Saúde Digital/MS: especificações de interoperabilidade; integração RNDS, SIGEM, SIASG. SERPRO: desenvolvimento e hospedagem segura.	—	—	Coordenação estadual da interoperabilidade; integração dos sistemas regionais.	Execução em hospitais e UPAs; inserção de dados na RNDS.	Monitoramento da transparência no uso de dados em saúde.	UFSC, USP, UFRGS, UnB, IFs: P&D em interoperabilidade; testes de conformidade.	Empresas de rastreamento, blockchain, Sebrae, Senai CIMATEC: soluções digitais.	GS1 Global, HIMSS: boas práticas e maturidade digital.	—

Eixo 4 – Sustentabilidade e Circularidade de DMDs	Ministério do Meio Ambiente: diretrizes PNRS; articulação logística reversa.	Anvisa: validação de protocolos de reuso e biossegurança.	ABIMO: qualificação de fornecedores. Consórcios públicos de resíduos: apoio técnico.	Coordenação regional da logística reversa; capacitação e monitoramento.	Execução local da coleta, reuso e descarte; contratos de destinação.	Participação social na fiscalização de resíduos e biossegurança.	SENAI, IPT, universidades: pesquisa em materiais e avaliação de ciclo de vida.	Empresas de logística reversa, transportadoras: coleta e transporte seguro.	—	—
Eixo 5 – Formação Técnica e Inovação Aplicada	CAPES, CNPq, Embrapii: fomento à pesquisa e inovação.	—	Associações profissionais (SOBRAC, SBEB): certificação profissional.	Oferta de capacitações regionais; integração com hospitais de ensino.	Formação local de equipes técnicas; incentivo a laboratórios vivos.	Inclusão da sociedade em debates sobre inovação em saúde.	Universidades e IFs: cursos, residências técnicas, laboratórios vivos. Parques tecnológicos: incubação de projetos.	—	—	—
Eixo 6 – Monitoramento, Avaliação e Maturidade Digital	DATASUS: integração de dados e painéis. IBGE: bases demográficas e séries históricas.	—	—	Consolidação de indicadores estaduais; envio ao MS.	Monitoramento local de indicadores; reporte a sistemas nacionais.	Controle social sobre desempenho; validação cidadã de relatórios.	Universidades e centros de pesquisa: modelagem de indicadores; avaliação de impacto.	Empresas de BI (Power BI, Qlik, Tableau): dashboards e visualizações.	OCDE, OMS: metodologias de benchmarking e comparabilidade.	CGU e TCU: auditoria de processos e validação de dados.

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

A matriz evidencia que a implementação do PDGDMD depende de arranjos colaborativos, porém coordenados centralmente, reforçando a legitimidade política e técnica do plano. Ao mesmo tempo, permite flexibilidade para que hospitais e gestores locais adaptem as parcerias às suas realidades, sem perder a coerência com as diretrizes nacionais.

10 Considerações finais

O PDGDMD consolida-se como a principal contribuição desta tese, representando uma resposta estratégica às lacunas históricas na gestão desses ativos no SUS, promovendo um alinhamento inédito entre inovação digital, sustentabilidade e governança pública. Sua formulação decorreu da trajetória investigativa empreendida ao longo dos quatro artigos que compõem o corpo desta pesquisa: a revisão sistemática de barreiras e drivers (Artigo 2), a análise de tecnologias da I4.0 aplicáveis ao setor saúde (Artigo 3), os estudos empíricos de múltiplos casos em hospitais e UPAs (Artigo 4) e as reflexões conceituais que embasam a proposta de um modelo integrado de gestão. Esse percurso assegura que o plano não seja uma construção teórica abstrata, mas um produto técnico-científico ancorado em evidências, capaz de dialogar com a realidade das instituições de saúde brasileiras.

O PDGDMD atende plenamente ao objetivo geral e a todos os objetivos específicos desta tese. Ele alinha a gestão dos DMDs às políticas nacionais de saúde digital e sustentabilidade, estabelece diretrizes para classificação, rastreabilidade e circularidade, propõe o uso de tecnologias interoperáveis com a RNDS, orienta gestores na adoção de práticas seguras de reuso e destinação final e, por fim, estrutura uma governança verticalizada que articula Ministério da Saúde, secretarias estaduais e municipais, hospitais e conselhos de saúde, com apoio de parceiros técnicos e internacionais. Essa cobertura integral reforça a coerência entre os objetivos delineados e os resultados alcançados.

Do ponto de vista teórico, o plano dialoga com as lentes adotadas nesta tese. A Teoria das Capacidades Dinâmicas evidencia a necessidade de reconfiguração institucional e de aprendizagem contínua para que hospitais e gestores consigam adaptar-se às novas diretrizes. A Teoria da Complexidade permite compreender o SUS como um sistema adaptativo, no qual múltiplos atores interagem de forma não linear, exigindo governança coordenada, mas também flexível. Já a Teoria Sociotécnica reforça que a efetividade do PDGDMD depende do alinhamento entre tecnologias da I4.0, processos institucionais e competências humanas, sem o qual não se alcançará sustentabilidade nem legitimidade.

Embora ambicioso, o plano foi concebido como um instrumento propositivo, sustentado por rigor metodológico e por uma base normativa sólida, que inclui a Estratégia de Saúde Digital (ESD28), o Programa SUS Digital, o Plano Nacional de Saúde 2024–2027, a PNRS e as regulamentações da Anvisa. Reconhece-se que sua efetiva implementação depende de fatores políticos, financeiros e institucionais que extrapolam o escopo desta tese. Contudo, ao oferecer diretrizes estratégicas, eixos estruturados, matriz de responsabilidades, inventário de necessidades e mecanismos de monitoramento, o PDGDMD fornece as bases para que o Ministério da Saúde conduza, de forma centralizada e articulada, um processo de transformação digital e sustentável na gestão de dispositivos médicos duráveis.

Mais do que um plano operacional, o PDGDMD representa uma visão de futuro construída a partir de evidências científicas, práticas institucionais e referenciais normativos. Ao final do ciclo proposto (2026–2028), espera-se que o SUS esteja preparado para adotar um modelo de gestão de DMDs mais inteligente, circular e inovador, reconhecido como referência internacional e alinhado aos compromissos globais de sustentabilidade. Trata-se, assim, de uma contribuição acadêmica e prática que fortalece a capacidade do sistema público de saúde de responder aos desafios contemporâneos e de avançar em direção a uma governança mais eficiente, transparente e sustentável.

Referências

- BAI, C.; ORZES, G.; SARKIS, J. Industry 4.0 technologies in circular economy: a framework for healthcare applications. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 177, p. 121527, 2022.
- BELTRAMI, M. et al. Digitalization and circular economy in healthcare: opportunities and challenges. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, p. 127675, 2021.
- BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.
- BRASIL. **Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018**. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 15 ago. 2018.
- BRASIL. **Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021**. Institui a Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 01 abr. 2021.
- BRASIL. **Lei nº 14.820, de 10 de janeiro de 2024**. Institui o Plano Plurianual (PPA) 2024–2027. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 jan. 2024.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Plano Nacional de Saúde 2024–2027**. Brasília: Ministério da

Saúde, 2024.

BRASIL. **Ministério da Saúde. Programa SUS Digital: Estratégia de Saúde Digital para o Brasil 2020–2028.** Brasília: Ministério da Saúde, 2020.

CAMPOS, G. W. de S.; PEREIRA JÚNIOR, N. **Gestão e organização de serviços de saúde.** Belo Horizonte: Nescon/UFMG, 2016.

CUNHA, R.; BARBOSA, P. Gestão de projetos complexos em saúde: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Gestão em Saúde**, v. 13, n. 2, p. 55-68, 2022.

FONSECA, L.; VASCONCELOS, F. Gestão de riscos em organizações de saúde: uma revisão sistemática. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 27, n. 9, p. 3573-3586, 2022.

GHOBHAKHLOO, M. et al. Industry 4.0 and circular economy: synergistic opportunities and implementation challenges. **Sustainable Production and Consumption**, v. 27, p. 1469-1488, 2021.

GOVINDAN, K. et al. Circular economy practices in healthcare: a review and research agenda. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 190, p. 106809, 2024.

MINTZBERG, H. **Estrutura e dinâmica das organizações.** São Paulo: Atlas, 1996.

OLIVEIRA, J.; MACHADO, M. Priorização de problemas em políticas públicas: uma aplicação do método GUTRIC. **Revista de Administração Pública**, v. 57, n. 3, p. 621-642, 2023.

ONU. **Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.** Nova Iorque: ONU, 2015.

POLOJÄRVI, K.; PALMER, I.; DUNFORD, R. Complexity and healthcare governance: adaptive systems and institutional coordination. **Public Management Review**, v. 25, n. 6, p. 789-807, 2023.

PORTER, M.; HEPPEL, M. **Value-Based Health Care: Improving Outcomes while Reducing Costs.** Boston: Harvard Business Review Press, 2020.

QURESHI, A. et al. Digital transformation in healthcare: governance and sustainability implications. **International Journal of Health Planning and Management**, v. 39, n. 2, p. 220-240, 2024.

RIBEIRO, A.; SANTOS, D.; LIMA, T. Ampliação do método GUT para gestão de projetos: proposta do GUTRIC. **Production Journal**, v. 31, n. 1, p. 1-15, 2021.

RIGHI, A.; ANDRADE, F. Análise multicritério na gestão da qualidade: revisitando o método GUT. **Gestão & Produção**, v. 27, n. 4, 2020.

SAVAGET, P. et al. Governance and sustainability transitions in healthcare: lessons from digital health strategies. **Journal of Cleaner Production**, v. 237, p. 117–132, 2019.

WESTOVER, J. H. Organizational change and complexity in public health systems. **International Journal of Organizational Analysis**, v. 32, n. 1, p. 45-63, 2024.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Handbook for National Quality Policy and Strategy**. Geneva: WHO, 2021.

8 PROPOSTA DE FRAMEWORK ESTRATÉGICO E CONCLUSÕES DA TESE

Esta seção apresenta a consolidação dos resultados da pesquisa, estruturada em quatro subseções principais. Na primeira, realiza-se a síntese dos principais achados da tese, destacando a progressão entre as etapas investigativas. Em seguida, é apresentada a proposta de *framework*, construída a partir da integração teórica, empírica e normativa. A terceira subseção dedica-se à análise e discussão crítica do *framework*, confrontando-o com a literatura e evidenciando suas contribuições. Por fim, a seção de conclusões sistematiza o alcance dos objetivos da tese, bem como suas limitações e perspectivas para pesquisas futuras.

8.1 SÍNTESE DOS PRINCIPAIS ACHADOS DA PESQUISA

O percurso investigativo desenvolvido nesta tese resultou em uma sequência de achados que se complementam e se retroalimentam, formando uma linha de progressão coerente entre evidências conceituais, análises empíricas e proposições estratégicas. Os artigos e o Plano Diretor revelam uma trajetória que parte da identificação de lacunas conceituais, passa pelo mapeamento de barreiras, impulsionadores e tecnologias da I4.0, analisa criticamente a gestão do ciclo de vida dos dispositivos médicos duráveis (DMDs) em hospitais públicos e culmina na proposição de um plano aplicado e de um *framework* integrador.

Para tornar mais evidente essa progressão e destacar de que forma cada etapa contribuiu para a construção do *framework* final, o Quadro 12 sintetiza e relaciona os resultados alcançados em cada seção (Capítulos 3 a 7), suas contribuições específicas para os objetivos da tese e as evidências que serviram de base para a formulação da estrutura integradora.

Quadro 12 – Síntese dos resultados e contribuições dos capítulos 3 a 8.2

Seção	Resultados alcançados	Contribuição para a tese	Evidências que sustentam o <i>Framework</i>
3 – Artigo 1	O questionário aplicado revelou como mais relevantes os equipamentos de suporte respiratório, de diagnóstico e de terapia, e como menos relevantes os equipamentos de monitoramento, instrumentos cirúrgicos reutilizáveis e dispositivos implantáveis. Os gestores apontaram barreiras (restrições orçamentárias, ausência de normativas claras, falta de capacitação) e impulsionadores (racionalização de custos, segurança do paciente, conformidade regulatória). Quanto às tecnologias, destacaram rastreabilidade digital, big data e IA como mais promissoras.	Evidencia lacunas teóricas e empíricas sobre a integração entre Economia Circular e Indústria 4.0 no setor da saúde, especialmente na gestão de DMDs, e acrescenta a percepção prática de gestores sobre relevância, barreiras, impulsionadores e tecnologias promissoras.	Evidencia a lacuna teórica e prática, define os DMDs prioritários, apresenta barreiras e impulsionadores percebidos pelos gestores e aponta as tecnologias da I4.0 mais promissoras.
4 – Artigo 2	Foram mapeadas 55 barreiras e 51 fatores impulsionadores à adoção da EC em hospitais. A análise causal mostrou que barreiras estruturais (infraestrutura inadequada, falta de recursos) e regulatórias têm forte efeito sobre as demais. Entre os motivadores, políticas públicas, ODS e inovação tecnológica aparecem como os mais influentes. O resultado central é o mapa causal que diferencia barreiras-raiz e impulsionadores-chave.	Mapeia e categoriza barreiras e impulsionadores que orientam a formulação de estratégias para uma gestão sustentável de DMDs, evidenciando suas inter-relações e pontos críticos de intervenção.	Fornece a base para a coluna de barreiras (falta de infraestrutura, resistência, custos) e para a coluna de impulsionadores (políticas públicas, ODS, inovação), refletidos no <i>framework</i> .
5 – Artigo 3	Identificou tecnologias da I4.0 aplicáveis à circularidade hospitalar. As principais funções observadas foram rastreabilidade (IoT, <i>blockchain</i>), interoperabilidade de sistemas e análise de dados massivos (<i>big data</i> , IA). O estudo mostra que, apesar do potencial, o uso no setor hospitalar ainda é incipiente e fragmentado, sem diretrizes unificadas.	Catálogo crítico de tecnologias que, ao discutir sua aplicabilidade ao contexto hospitalar, orienta decisões técnicas e de investimento em gestão sustentável.	Sustenta os elementos centrais do framework ligados às tecnologias da I4.0 (IoT, IA, ML, big data, smart sensors), reforçando seu papel na rastreabilidade, interoperabilidade e monitoramento contínuo.
6 – Artigo 4	Mostrou grande fragmentação na gestão do ciclo de vida dos DMDs, com lacunas nos processos de aquisição, uso e descarte. A análise multicritério (BWM) indicou a Eficiência Operacional como o critério mais relevante na escolha de tecnologias da I4.0. Nesse cenário, foram priorizadas as tecnologias I4.0 a IoT, Inteligência Artificial, <i>Cloud Computing</i> , <i>Big Data & Analytics</i> , <i>Machine Learning</i> e <i>Smart Sensors</i> , destacando-se seu papel na rastreabilidade em tempo real, na interoperabilidade de plataformas de gestão de ativos e na manutenção preditiva. Os achados evidenciam um descompasso entre a relevância percebida dos DMDs e a maturidade digital existente nos hospitais públicos.	Apresenta o processo de gestão de DMDs em unidades de saúde de média e alta complexidade, destacando critérios decisórios para priorização de tecnologias da I4.0 e apontando aquelas mais aderentes ao contexto do SUS.	Fundamenta a centralidade da eficiência operacional, o fluxo de informação e materiais no ciclo de vida dos DMDs, assim como os atores envolvidos nesse processo. Além disso, valida critérios que podem ser utilizados para escolha das tecnologias mais relevantes e o conjunto de tecnologias priorizadas (IoT, IA, big data, ML, sensores inteligentes).

7 – Plano Diretor	Consolidou os achados em um produto aplicado: o Plano Diretor de Gestão de DMDs para o Ministério da Saúde. Estruturado a partir da síntese entre resultados teóricos e empíricos, o Plano oferece um roteiro estratégico que contempla diretrizes de governança, classificação e padronização, uso de tecnologias da I4.0, mitigação de riscos, pontos de controle, mecanismos de revisão e um cronograma escalonado de implementação.	Roteiro estratégico operacionalizável para gestores públicos, com visão escalonada de implementação e monitoramento.	Dá suporte ao bloco central do framework (gestão digital e circular dos DMDs), articulando barreiras, impulsionadores, tecnologias e resultados.
8.2 – Proposta de <i>Framework</i>	Framework estratégico que orienta a gestão digital e sustentável de DMDs em hospitais públicos, articulando dimensões teóricas, tecnológicas, institucionais e práticas de gestão e configurando-se como instrumento híbrido que une rigor científico e aplicabilidade concreta.	Modelo integrador que organiza de forma articulada barreiras, impulsionadores, tecnologias e atores institucionais, orientando ações estratégicas para a implementação da Economia Circular com apoio da Indústria 4.0 na gestão de DMDs.	É o produto final que materializa a integração dos achados anteriores, consolidando o <i>framework</i> representado na figura.

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

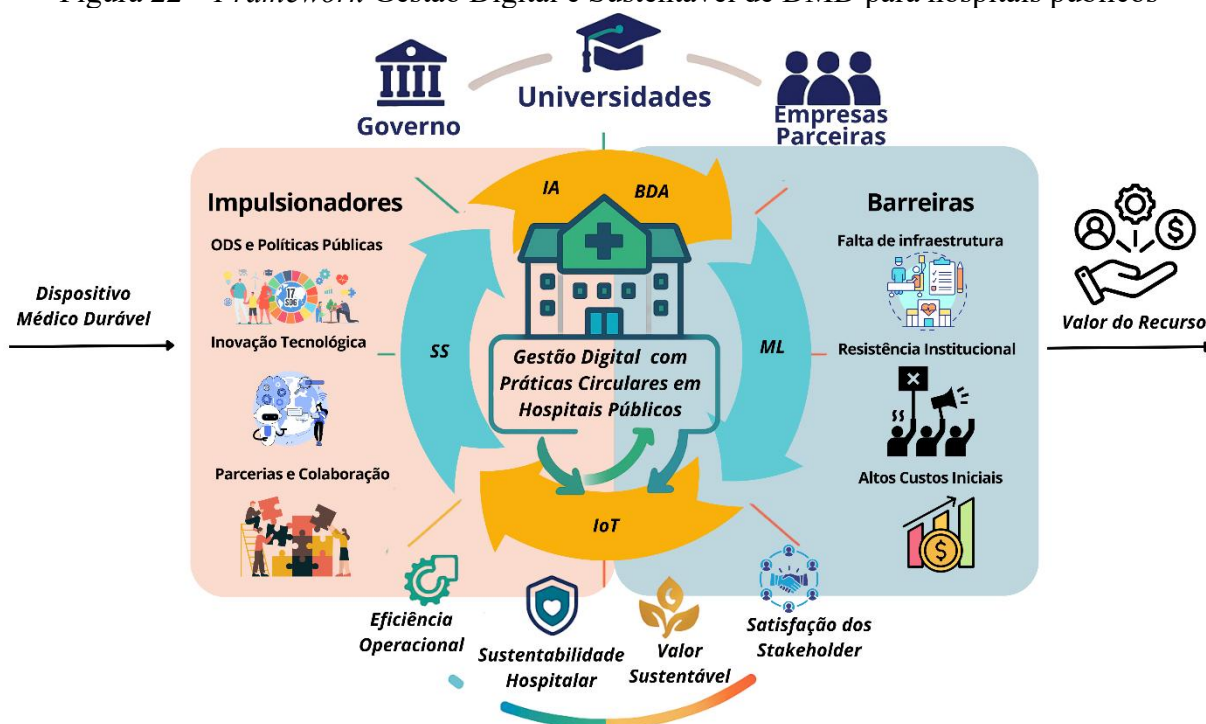
A leitura do quadro permite observar que a trajetória da pesquisa não foi linear, mas construída a partir de um processo cumulativo, no qual cada estudo contribuiu de forma específica para consolidar os elementos do *framework* final. O Artigo 1 trouxe um diagnóstico inicial, revelando a percepção de gestores quanto à relevância dos DMDs, suas barreiras e tecnologias promissoras. O Artigo 2 aprofundou essa análise ao mapear barreiras e impulsionadores com base em métodos multicritério, fornecendo insumos estratégicos para a formulação de políticas. O Artigo 3 ampliou a discussão tecnológica, destacando as funções das tecnologias da I4.0 aplicáveis à circularidade. O Artigo 4 forneceu uma visão empírica detalhada do ciclo de vida dos DMDs e critérios decisórios de priorização tecnológica. Por fim, o Plano Diretor consolidou essas evidências em um roteiro estratégico, que se materializa no *framework* proposto.

Esse encadeamento evidencia que o *framework* não foi construído de forma arbitrária, mas a partir da triangulação entre dados empíricos, literatura científica e lentes teóricas. A Teoria das Capacidades Dinâmicas permite compreender como hospitais podem reconfigurar recursos diante de pressões ambientais e tecnológicas; a Teoria da Complexidade ajuda a interpretar o SUS como um sistema adaptativo interdependente; e a Teoria Sociotécnica reforça que a gestão dos DMDs só será sustentável se houver alinhamento entre tecnologias, processos e atores humanos. Assim, a síntese dos achados reforça a estrutura metodológica da tese e pontua a lógica científica do *framework*, que se apresenta como inédito e aplicável ao contexto da saúde pública brasileira.

8.2 PROPOSTA DE *FRAMEWORK*

A análise conjunta dos artigos derivados desta tese evidencia que cada etapa contribuiu com uma peça específica para o mosaico de evidências teóricas, empíricas e normativas. Essa integração permitiu consolidar um modelo capaz de articular dimensões críticas da gestão de DMDs. A Figura 22, apresenta o *framework* resultante, estruturado em torno das barreiras, impulsionadores, tecnologias e atores institucionais, projetando uma proposta estratégica de gestão sustentável e digital de DMDs no contexto do SUS.

Figura 22 – *Framework* Gestão Digital e Sustentável de DMD para hospitais públicos



Fonte: Elaboração própria (2025) com base nos resultados da tese.

O *framework* sintetizado na Figura 22 representa a principal contribuição desta tese, tanto pelo caráter inovador quanto pela aplicabilidade prática. Nele, os impulsionadores (como políticas públicas, ODS, inovação tecnológica e parcerias interinstitucionais) aparecem como catalisadores que viabilizam a adoção de práticas circulares e digitais. Em contraste, as barreiras (infraestrutura insuficiente, resistência institucional e altos custos iniciais) funcionam como pontos críticos a serem enfrentados por gestores e formuladores de políticas. Esse equilíbrio entre forças de estímulo e de restrição reflete a realidade evidenciada nos artigos 1 e 2, em que a análise empírica e causal mostrou a centralidade desses fatores no contexto hospitalar.

As tecnologias da I4.0 (IA, *Big Data & Analytics*, *Machine Learning*, IoT e Sensores Inteligentes) representam o núcleo operacional do *framework*, pois são responsáveis por viabilizar a rastreabilidade em tempo real, a interoperabilidade entre sistemas e a manutenção preditiva, aspectos destacados nos artigos 3 e 4. Mais do que ferramentas, elas configuram capacidades dinâmicas que permitem aos hospitais reconfigurarem recursos e processos para responder a pressões regulatórias, econômicas e ambientais, assegurando eficiência e adaptabilidade (Teece; Pisano; Shuen, 1997; Zhang et al., 2023).

O bloco central do *framework*, denominado Gestão Digital com Práticas Circulares, simboliza o ponto de convergência entre inovação tecnológica, sustentabilidade e governança pública. Essa dimensão reflete a Teoria Sociotécnica, pois evidencia que os resultados somente

serão alcançados quando tecnologias e processos técnicos estiverem em harmonia com fatores sociais, humanos e institucionais, incluindo a capacitação de equipes, a coordenação interorganizacional e a legitimidade regulatória (Bakhuis et al., 2024).

A atuação articulada entre atores institucionais (governo, universidades e empresas parceiras) reforça a interdependência característica da Teoria da Complexidade, na qual os sistemas hospitalares são compreendidos como redes dinâmicas compostas por múltiplos agentes, interações não lineares e necessidade constante de adaptação (Burnes, 2005; Johannessen, 2022). Esse arranjo colaborativo assegura que o processo de gestão de DMDs se desenvolva de forma sistêmica, abrangendo desde a formulação de diretrizes nacionais até a execução local em hospitais e UPAs.

Por fim, o *framework* projeta os resultados esperados: eficiência operacional, sustentabilidade hospitalar, valor sustentável e satisfação dos *stakeholders*. Esses resultados não apenas dialogam com os compromissos internacionais assumidos pelo Brasil na Agenda 2030, como também respondem às prioridades nacionais expressas em instrumentos como o PNS 2024–2027 e a Estratégia de Saúde Digital (ESD28).

Assim, o *framework* não se limita a uma representação visual, mas constitui um instrumento científico e aplicado, capaz de orientar decisões estratégicas e políticas públicas. Ele integra evidências empíricas, fundamentos teóricos e normativos em uma estrutura conceitual, com potencial para transformar a gestão de DMDs em hospitais públicos em direção a um futuro mais digital e sustentável.

8.3 ANÁLISES E DISCUSSÕES SOBRE O FRAMEWORK

O *framework* proposto nesta tese estabelece diálogo direto com a literatura nacional e internacional sobre gestão em saúde, economia circular e tecnologias da I4.0. Pesquisadores como Beltrami et al. (2021) e Govindan et al. (2024) ressaltam que a integração entre inovação tecnológica e práticas sustentáveis permanece como um desafio em setores intensivos em recursos, como o hospitalar. Corroborando com estes autores, Bai, Orzes e Sarkis (2022) e Ghobakhloo et al. (2021) destacam que, embora a EC associada à I4.0 já esteja consolidada em cadeias produtivas industriais, sua tradução para os serviços de saúde ainda se apresenta de maneira incipiente.

Nesse sentido, o *framework* responde a essas lacunas ao estruturar, de forma integrada, as principais barreiras que dificultam a implementação de uma gestão circular e que precisam

ser superadas, assim como os impulsionadores que podem ser utilizados como base para alavancar avanços nos hospitais públicos brasileiros. Além disso, destaca as tecnologias da I4.0 prioritárias, especialmente aquelas voltadas para a eficiência operacional, e evidencia os atores institucionais envolvidos na gestão dos DMDs ao longo de todo o seu ciclo de vida, desde a aquisição até a destinação final. Dessa forma, demonstra-se que a gestão de DMDs demanda arranjos específicos e diferenciados em relação a outros setores.

Sob a ótica da Teoria das Capacidades Dinâmicas, o modelo mostra como os hospitais públicos podem reconfigurar recursos e práticas frente às pressões regulatórias, ambientais e financeiras. Zhang et al. (2023) defendem que a criação de rotinas de aprendizagem e inovação é essencial para organizações que operam em ambientes de alta incerteza, enquanto Aichouni, Silva e Ferreira (2024) enfatizam que a capacidade de adaptação tecnológica se torna diferencial competitivo no setor público. No *framework*, essa perspectiva se manifesta nas tecnologias da I4.0 como inteligência artificial, internet das coisas, *big data*, *machine learning* e sensores inteligentes, que sustentam a rastreabilidade, a interoperabilidade e a manutenção preditiva, oferecendo caminhos concretos para a superação da fragmentação observada nos hospitais brasileiros.

O caráter sistêmico do modelo também encontra respaldo na Teoria da Complexidade, que interpreta as organizações de saúde como sistemas adaptativos compostos por múltiplos atores e interações não lineares. Burnes (2005) afirma que a complexidade exige abordagens flexíveis e colaborativas, enquanto Johannessen (2022) argumenta que a governança em saúde deve considerar os padrões emergentes das interações entre gestores, profissionais e instituições. No *framework*, esse aspecto se evidencia pela presença explícita dos blocos que representam governo, universidades e empresas parceiras, reforçando a necessidade de articulação em rede e de aprendizagem contínua. Tal visão é confirmada por Polojärvi, Palmer e Dunford (2023), que demonstram como sistemas de saúde bem-sucedidos emergem da coordenação multinível e da interação entre políticas públicas e práticas locais.

O núcleo central do *framework*, denominado gestão digital com práticas circulares, encontra sustentação na Teoria Sociotécnica, que defende o equilíbrio entre subsistemas técnicos e sociais como condição para o desempenho organizacional (Bakhuis et al., 2024). Savaget et al. (2019) complementam essa visão ao destacar que a efetividade das inovações digitais depende de arranjos institucionais que alinhem tecnologias, pessoas e processos em torno de objetivos comuns. No contexto hospitalar, essa perspectiva é essencial para compreender por que iniciativas isoladas de digitalização não produzem ganhos significativos.

Apenas quando associadas a estratégias de qualificação de equipes, padronização normativa e cooperação interinstitucional essas tecnologias podem gerar valor sustentável e legitimidade institucional, como apontado também por Westover (2024).

Outro ponto central diz respeito à origem e ao enfrentamento das barreiras identificadas. Beltrami et al. (2021) já haviam indicado a falta de infraestrutura e de clareza regulatória como entraves recorrentes na adoção de práticas circulares em hospitais. Este estudo avança ao mostrar que esses fatores, combinados à resistência institucional e aos custos iniciais elevados, constituem barreiras capazes de comprometer todo o processo de gestão de DMDs. A proposição do *framework*, ao incluir estratégias de mitigação vinculadas a políticas públicas, inovação e parcerias, confirma a análise de Govindan et al. (2024), segundo os quais a superação de barreiras depende de instrumentos institucionais claros e de coordenação centralizada.

Os resultados projetados pelo *framework*, como eficiência operacional, sustentabilidade hospitalar, valor sustentável e satisfação dos *stakeholders*, estão alinhados tanto com as metas da Agenda 2030 da ONU (2015) quanto com os objetivos do Plano Nacional de Saúde 2024–2027. Essa convergência evidencia que a proposta desta tese ultrapassa o campo teórico e contribui de maneira efetiva para o avanço dos ODS, contemplando de forma equilibrada as três dimensões da sustentabilidade – social, ambiental e institucional.

A pesquisa contribui diretamente para os ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), 4 (Educação de Qualidade), 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), ODS 16 (Paz, Justiça e Instituições Eficazes) e ODS 17 (Parcerias e Meios de Implementação).

Esta tese atende ao ODS 3, ao propor mecanismos que aprimoram a qualidade, a segurança e a continuidade dos serviços hospitalares por meio da gestão sustentável e digital dos DMDs. Dialoga ainda com o ODS 4, ao enfatizar a aprendizagem organizacional, a qualificação técnica e a formação continuada como fundamentos para o fortalecimento das capacidades institucionais.

O ODS 9 é atendido ao propor o uso de tecnologias da I4.0 à governança hospitalar, promovendo eficiência e modernização da infraestrutura pública de saúde. O ODS 12 é contemplado pelo modelo de circularidade aplicado aos DMDs, que estimula o reuso, o reprocessamento e o descarte ambientalmente adequados, reduzindo custos e impactos ambientais. Já ODS 13 é alcançado de modo indireto, por meio da racionalização do uso de recursos, da redução de resíduos hospitalares e da adoção de práticas de eficiência energética.

O ODS 16 é fortalecido pela estrutura de governança e pelos mecanismos de monitoramento e transparência previstos no *framework*, que asseguram responsabilidade institucional e conformidade regulatória. E, por fim, o ODS 17 é materializado nas propostas de cooperação entre gestores, órgãos públicos, universidades e fornecedores, consolidando uma rede interinstitucional voltada à inovação e à sustentabilidade em saúde.

No contexto hospitalar, a tese demonstra que a integração entre tecnologias da I4.0, práticas circulares e mecanismos de governança fortalece a capacidade institucional de planejar, monitorar e avaliar o uso de recursos críticos, como os DMDs. Campos e Pereira Júnior (2021) ressaltam que a governança em saúde pública deve estar ancorada em mecanismos de monitoramento verticalizados, enquanto Mintzberg (1996) reforça que a durabilidade de políticas depende da liderança governamental e de sua capacidade de institucionalização. Nesse sentido, o modelo proposto traduz os achados empíricos e teóricos em um instrumento de gestão aplicável, que não apenas responde às fragilidades diagnosticadas nos artigos desta tese, mas também une processos de monitoramento, inovação tecnológica e controle estratégico.

O modelo proposto traduz os achados em um instrumento de governança e gestão estratégica capaz de promover o uso eficiente de recursos, o aprendizado organizacional e a prestação de contas, contribuindo simultaneamente para o cumprimento de metas globais de desenvolvimento sustentável. Mais do que um arranjo conceitual, este *framework* representa uma contribuição estratégica que responde a lacunas evidenciadas pela literatura e pelos achados empíricos desta tese. Sua originalidade reside em oferecer uma proposta com rigor científico e aplicabilidade concreta, capaz de dialogar com as políticas públicas de saúde e orientar decisões em diferentes níveis da gestão hospitalar.

Ao articular teoria, evidências e prática, o modelo amplia a compreensão sobre os caminhos para a digitalização e a sustentabilidade no SUS, reafirmando o papel da engenharia de produção e da gestão hospitalar na construção de sistemas de saúde resilientes, transparentes e sustentáveis, alinhados aos princípios da Agenda 2030 e às diretrizes nacionais de fortalecimento da governança pública. Além disso, abre espaço para que futuras pesquisas aprofundem seus elementos, testem sua aplicabilidade em diferentes contextos e o aprimorem como instrumento de governança pública.

8.4 CONCLUSÕES

Esta seção apresenta as conclusões da tese, organizadas de modo a evidenciar o

cumprimento dos objetivos propostos, as contribuições alcançadas e os limites do estudo. Inicialmente, detalha-se como os resultados obtidos ao longo das diferentes etapas atenderam ao objetivo geral e aos objetivos específicos da pesquisa. Em seguida, discutem-se as limitações encontradas durante o desenvolvimento do trabalho e as oportunidades que elas abrem para investigações futuras, assegurando continuidade e aprofundamento científico no campo da gestão sustentável e digital de dispositivos médicos duráveis.

8.4.1 Objetivos da tese alcançados

A Economia Circular aplicada aos hospitais desponta como um caminho inevitável para a construção de sistemas de saúde mais sustentáveis e orientados à inovação. Ao articular essa perspectiva com as tecnologias da I4.0, abre-se a possibilidade de avançar para modelos de gestão capazes de responder simultaneamente a demandas de eficiência operacional, segurança do paciente e responsabilidade socioambiental. Os resultados consolidados nesta tese confirmam que essa integração é não apenas desejável, mas viável, desde que apoiada em diretrizes claras, governança robusta e instrumentos técnicos adequados. Nesse sentido, o percurso investigativo empreendido permitiu consolidar evidências que sustentam a proposição de um *framework* estratégico alinhado às necessidades do SUS e aos compromissos globais de sustentabilidade.

Sendo assim, pode-se afirmar que o objetivo geral desta tese foi alcançado, uma vez que resultou na construção de uma estrutura fundamentada em evidências empíricas, análises normativas e contribuições teóricas. O *framework* estratégico desenvolvido configura-se como um instrumento inovador de gestão, capaz de dialogar com a complexidade do SUS e oferecer aplicabilidade prática às políticas e processos voltados à sustentabilidade e à digitalização da saúde pública.

O percurso investigativo desta tese permitiu compreender, de maneira abrangente, a gestão do ciclo de vida dos DMDs em hospitais públicos (objetivo específico a). A análise empírica revelou fragilidades persistentes nos processos de aquisição, uso, manutenção e descarte, marcados pela fragmentação, pela ausência de inventários sistematizados e pela limitada integração entre áreas técnicas. Esses achados não apenas confirmam lacunas já apontadas pela literatura, como também reforçam a necessidade de uma abordagem sistêmica capaz de interpretar a saúde como um sistema adaptativo, em consonância com a Teoria da Complexidade.

A investigação também possibilitou mapear os dispositivos médicos considerados prioritários para práticas de circularidade (objetivo específico b). Ventiladores pulmonares, equipamentos de suporte diagnóstico e de terapia emergiram como estratégicos, tanto pelo valor agregado quanto pelo potencial de reuso, revelando-se centrais para a formulação de políticas públicas que busquem racionalizar recursos e reduzir impactos ambientais. Ao mesmo tempo, tornou-se evidente que outros dispositivos, menos lembrados nas práticas cotidianas, ainda permanecem à margem das estratégias de sustentabilidade, apontando desafios para agendas futuras.

A análise também permitiu examinar os processos de aquisição, uso e descarte dos DMDs em hospitais públicos (objetivo específico c). O mapeamento realizado evidenciou fluxos distintos entre unidades municipais, caracterizadas pela ausência de autonomia financeira e pela dependência de secretarias de saúde, e hospitais regionais, que dispõem de maior margem de decisão. Foram descritas etapas que abrangem desde a solicitação, tombamento e entrada em operação até a manutenção durante e após o período de garantia, bem como os mecanismos de baixa patrimonial e destinação final, que incluem incineração, tratamento químico, armazenamento e leilão. Esses achados revelaram a fragmentação institucional, a escassez de inventários digitalizados e a falta de integração sistêmica, fatores que comprometem a eficiência e a sustentabilidade do ciclo de vida dos dispositivos. Ao mesmo tempo, reforçaram a pertinência de adotar práticas de gestão digital e circular, em consonância com a perspectiva sociotécnica de que a eficácia tecnológica só se concretiza quando articulada a mudanças organizacionais e institucionais.

No campo das barreiras e impulsionadores, o estudo sistematizou um conjunto de fatores que condicionam a adoção da EC em hospitais. Barreiras estruturais e regulatórias mostraram-se especialmente determinantes, enquanto políticas públicas, os ODS e a inovação tecnológica apareceram como motores fundamentais da transformação (objetivo específico d). Essa leitura causal fortalece o diálogo com a Teoria das Capacidades Dinâmicas, ao demonstrar que hospitais precisam desenvolver habilidades de adaptação, aprendizagem e reconfiguração para superar entraves e potencializar oportunidades.

A dimensão tecnológica também foi explorada em profundidade, destacando soluções digitais da Indústria 4.0 como a IoT, *blockchain*, *big data*, inteligência artificial e sensores inteligentes (objetivo específico e). Ainda que incipientes em sua aplicação hospitalar, essas tecnologias revelaram grande potencial para a rastreabilidade em tempo real, a interoperabilidade entre sistemas e a manutenção preditiva. O uso de métodos multicritério

evidenciou que a eficiência operacional constitui critério decisivo para sua priorização, legitimando o papel das tecnologias I4.0 como blocos estruturantes do *framework* estratégico aqui proposto.

Essas análises culminaram na proposição do Plano Diretor de Gestão de DMDs, concebido como roteiro estratégico para orientar gestores públicos em seis eixos centrais: governança, classificação e padronização, rastreabilidade digital, circularidade, capacitação e monitoramento (objetivo específico f). Esse produto traduz em diretrizes práticas as evidências teóricas e empíricas da tese, oferecendo uma ferramenta concreta para alinhar normas, políticas e tecnologias à realidade hospitalar brasileira.

Assim, o conjunto de evidências obtidas confirma o atendimento integral ao objetivo geral e aos objetivos específicos definidos no início da pesquisa. O *framework* final sintetiza esse percurso ao articular governança pública verticalizada, práticas de economia circular e tecnologias I4.0, consolidando-se como a principal contribuição da tese. Mais do que um resultado acadêmico, trata-se de um instrumento estratégico para orientar o Ministério da Saúde, as secretarias estaduais e municipais e os hospitais públicos na construção de uma gestão eficiente, sustentável e digital dos DMDs, com potencial de ampliar a legitimidade institucional, reduzir desperdícios e fortalecer a segurança do paciente.

8.4.2 Limitações e pesquisas futuras

Ainda que a pesquisa tenha atingido integralmente seus objetivos, algumas limitações devem ser reconhecidas. O recorte empírico concentrou-se em hospitais públicos de média e alta complexidade, o que restringe a generalização dos achados para outros tipos de instituições, como hospitais privados ou de assistência básica. Além disso, o *framework* proposto, embora fundamentado em evidências teóricas e empíricas, não foi testado em larga escala, configurando-se como uma proposta estratégica a ser validada em contextos diversos.

Como perspectiva de continuidade, futuras pesquisas poderão aprofundar a aplicação de métodos multicritério para priorização de tecnologias em contextos hospitalares específicos, avaliar economicamente os ganhos da circularidade no ciclo de vida dos dispositivos médicos e propor indicadores capazes de mensurar de forma mais precisa a maturidade da gestão circular em saúde. Outro campo promissor consiste em explorar a convergência entre os princípios da I4.0 e os modelos de gestão hospitalar humanizada, ampliando o foco para além da eficiência técnica e incorporando a centralidade do cuidado ao paciente como vetor da sustentabilidade.

Outros desdobramentos possíveis incluem a validação empírica do *framework* em diferentes realidades hospitalares, a análise comparada de experiências internacionais de gestão circular em saúde e o estudo dos arranjos institucionais necessários para alinhar os diferentes níveis de governança do SUS. A reflexão final que emerge é a de que a transição para a circularidade em hospitais não deve ser entendida como uma opção acessória, mas como uma exigência histórica diante dos limites ambientais e das demandas crescentes por equidade em saúde. A integração entre economia circular, tecnologias I4.0 e gestão hospitalar constitui não apenas uma resposta às pressões contemporâneas, mas uma oportunidade de redefinir o papel dos hospitais como instituições estratégicas na construção de sociedades mais justas, sustentáveis e saudáveis.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-BASSET, M.; MOHAMED, R.; CHANG, V. A Multi-Criteria Decision-Making Framework to Evaluate the Impact of Industry 5.0 Technologies: Case Study, Lessons Learned, Challenges and Future Directions. **Information Systems Frontiers**, v. 27, n. 2, p. 791–821, 9 abr. 2025.
- ABDUL-HAMID, A. Q. et al. Impeding challenges on industry 4.0 in circular economy: Palm oil industry in Malaysia. **Computers and Operations Research**, v. 123, p. 105052, 2020.
- ABDUL-HAMID, A. Q. et al. The drivers of industry 4.0 in a circular economy: The palm oil industry in Malaysia. **Journal of Cleaner Production**, v. 324, n. September, p. 129216, 2021.
- ABDUL-HAMID, A. Q. et al. Industry 4.0 quasi-effect between circular economy and sustainability: Palm oil industry. **International Journal of Production Economics**, v. 253, n. July, p. 108616, 2022.
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024**. São Paulo: Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2024.
- ADA, N. et al. Analyzing barriers of circular food supply chains and proposing industry 4.0 solutions. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 12, p. 1–29, 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 579, de 26 de dezembro de 2021. Dispõe sobre os requisitos sanitários para a realização de estudos clínicos com dispositivos médicos no Brasil**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 245, p. 201, 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução da Diretoria Colegiada – RDC nº 751, de 15 de setembro de 2022. Dispõe sobre a classificação de risco, regime de notificação e de registro de dispositivos médicos, e dá outras providências**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 177, p. 125, 2022.
- AGGARWAL, P.; MANASWI, K. Role of Circular Economy, Industry 4.0 and Supply Chain Management for Tribal Economy: A Systematic Review. **Journal of the Anthropological Survey of India**, v. 71, n. 2, p. 265–280, 2022.
- AGRAWAL, R. et al. Progress and trends in integrating Industry 4.0 within Circular Economy: A comprehensive literature review and future research propositions. **Business Strategy and the Environment**, v. 31, n. 1, p. 559–579, 2022.
- AICHOUNI, A. B. E.; SILVA, C.; FERREIRA, L. M. D. F. A Systematic Literature Review

of the Integration of Total Quality Management and Industry 4.0: Enhancing Sustainability Performance Through Dynamic Capabilities. **Sustainability**, v. 16, n. 20, p. 9108, 21 out. 2024.

AIDAR NETO, F. M. M. Gerenciamento de dispositivos e equipamentos médicos baseados e métodos de acreditação internacional JC, QMENTUM e normas ABNT IEC 60601. **RCMOS - Revista Científica Multidisciplinar O Saber**, v. 2, n. 2, p. 299–315, 2024.

AKKAD, M. Z.; ŠEBO, J.; BÁNYAI, T. Investigation of the Industry 4.0 Technologies Adoption Effect on Circular Economy. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 19, 2022.

AKSOM, H.; TYMCHENKO, I. How institutional theories explain and fail to explain organizations. **Journal of Organizational Change Management**, v. 33, n. 7, p. 1223–1252, 7 dez. 2020.

AL-SWIDI, A. K.; HAIR, J. F.; AL-HAKIMI, M. A. Sustainable development-oriented regulatory and competitive pressures to shift toward a circular economy: The role of environmental orientation and Industry 4.0 technologies. **Business Strategy and the Environment**, v. 32, n. 7, p. 4782–4797, 2023.

ALASA, D. K. Enhanced business intelligence through the convergence of big data analytics, AI, Machine Learning, IoT and Blockchain. **Open Access Research Journal of Science and Technology**, v. 2, n. 2, p. 023–030, 30 set. 2021.

ALFINA, K. N. et al. **Analyzing Barriers Towards Implementing Circular Economy in Healthcare Supply Chains**. 2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). **Anais...**Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 7 dez. 2022. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/9989999/>>

ALHAWARI, O. et al. Insights from Circular Economy Literature: A Review of Extant Definitions and Unravelling Paths to Future Research. **Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 859, 16 jan. 2021.

ALI, I.; KANNAN, D. Mapping research on healthcare operations and supply chain management: a topic modelling-based literature review. **Annals of Operations Research**, v. 315, n. 1, p. 29–55, 2022.

ALI, M.; GENG, Y. Accounting embodied economic potential of healthcare waste recycling—a case study from Pakistan. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 678, p. 1–6, 27 nov. 2018.

ALI, S. S. et al. A novel hybrid decision-making framework for measuring Industry 4.0-driven circular economy performance for textile industry. **Business Strategy and the**

Environment, v. 33, n. 8, p. 7825–7854, 2024.

ALIGHARDASHI, M. et al. Environmental assessment of hospital waste management practices: A study of hospitals in Kermanshah, Iran. **Results in Engineering**, v. 23, n. 102658, p. 1–8, set. 2024.

ALMEIDA, I. M. DE et al. Cadeia de suprimentos sustentável, economia circular, indústria 4.0 e gestão do conhecimento. **Exacta**, v. 22, n. 1, p. 144–173, 2022.

ALSAOUDI, T. et al. Enhancing Sustainable Performance Through Circular Economy and Industry 4.0: A Conceptual Framework for Leveraging Drivers and Mitigating Barriers. **IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**, p. 755–759, 2024.

ALSAOUDI, T.; ACQUAYE, A.; KHALFAN, M. Applying AHP to Identify and Prioritize Barriers Impacting Industry 4.0 Technologies on the Nexus of Circular Economy and Sustainable Performance. **2024 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions, ICTMOD 2024**, p. 1–6, 2024.

ALVES, L. et al. Towards circular economy in the textiles and clothing value chain through blockchain technology and IoT: A review. **Waste Management and Research**, v. 40, n. 1, p. 3–23, 2022.

APEXBRASIL. **Desempenho do setor de Dispositivos Médicos 2024**. Brasília: Agência Brasileira de Promoção de Exportações e Investimentos, 2024.

ARAÚJO, I. M. C. N. et al. **Análise da integração entre a indústria 4.0 e a economia circular por meio de uma systematic literature network analysis**. Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais...**Fortaleza, Ceará, Brasil: ENEGEP, 2023.

ARNS, V. D. **Framework para implantação de tecnologias da indústria 4.0 que promova a economia circular no setor de pós-colheita**. [s.l.] Universidade Nove de Julho, 2024.

ARONSON, J. K.; HENEGHAN, C.; FERNER, R. E. Medical Devices: Definition, Classification, and Regulatory Implications. **Drug Safety**, v. 43, n. 2, p. 83–93, 16 fev. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004-1:2024 – Resíduos sólidos – Classificação – Parte 1: Requisitos de classificação**. Rio de Janeiro: [s.n.].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004-2:2024 – Resíduos sólidos – Classificação – Parte 2: Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR)**. Rio de Janeiro: [s.n.].

ASTRI NUR KUNTARI, N.; ULFA, M.; JAMAL, A. Hospital Waste Management During

COVID-19. **International Journal of Science and Healthcare Research**, v. 8, n. 1, p. 27–44, 12 jan. 2023.

ATIF, S. et al. Towards a conceptual development of industry 4.0, servitisation, and circular economy: A systematic literature review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 11, 2021.

ATIF, S. Analysing the alignment between circular economy and industry 4.0 nexus with industry 5.0 era: An integrative systematic literature review. **Sustainable Development**, v. 31, n. 4, p. 2155–2175, 2023.

AWAN, U. et al. Industry 4.0 and circular economy in an era of global value chains: What have we learned and what is still to be explored? **Journal of Cleaner Production**, v. 371, n. June, 2022.

AWAN, U.; SROUFE, R.; BOZAN, K. Designing Value Chains for Industry 4.0 and a Circular Economy: A Review of the Literature. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 12, 2022.

AWAN, U.; SROUFE, R.; SHAHBAZ, M. Industry 4.0 and the circular economy: A literature review and recommendations for future research. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 4, p. 2038–2060, 2021.

AYAN, B.; GÜNER, E.; SON-TURAN, S. Blockchain Technology and Sustainability in Supply Chains and a Closer Look at Different Industries: A Mixed Method Approach. **Logistics-Basel**, v. 6, n. 85, p. 1–39, 2022.

BAG, S. et al. Key resources for industry 4.0 adoption and its effect on sustainable production and circular economy: An empirical study. **Journal of Cleaner Production**, v. 281, p. 125233, 2021.

BAG, S.; GUPTA, S.; KUMAR, S. Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development. **International Journal of Production Economics**, v. 231, n. June 2020, p. 107844, 2021.

BAG, S.; PRETORIUS, J. H. C. Relationships between industry 4.0, sustainable manufacturing and circular economy: proposal of a research framework. **International Journal of Organizational Analysis**, v. 30, n. 4, p. 864–898, 2022.

BAI, C.; ORZES, G.; SARKIS, J. Exploring the impact of Industry 4.0 technologies on social sustainability through a circular economy approach. **Industrial Marketing Management**, v. 101, n. 1, p. 176–190, fev. 2022.

BAI, C.; ZHOU, H.; SARKIS, J. Evaluating Industry 4.0 technology and sustainable development goals – a social perspective. **International Journal of Production Research**, v.

61, n. 23, p. 8094–8114, 2 dez. 2023.

BAKHUIS, J. et al. Frameworks for multi-system innovation analysis from a sociotechnical perspective: A systematic literature review. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 201, p. 123266, abr. 2024.

BAPORIKAR, N.; BARAGDE, D. ICT Sector Perspective for Circular Economy in the Digital Era. **International Journal of Innovation in the Digital Economy**, v. 12, n. 1, p. 54–71, 2021.

BARDERI, M. T. **As tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 como facilitadoras do processo de transição para a economia circular no setor automotivo**. [s.l.] Centro Universitário FEI, 2024.

BARQUETE, S. et al. Exploring the Dynamic of a Circular Ecosystem: A Case Study about Drivers and Barriers. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 1, p. 1–22, 28 jun. 2022.

BEHL, A. et al. Analysis of Industry 4.0 and circular economy enablers: A step towards resilient sustainable operations management. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 189, n. March 2022, p. 122363, 2023.

BELTRAMI, M. et al. Industry 4.0 and sustainability: Towards conceptualization and theory. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, p. 127733, ago. 2021.

BENNY, R.; C RAJIV, S. Application of Digital Technologies for Sustainable Product Management in a Circular Economy. **Interantional Journal of Scientific Research in Engineering and Management**, v. 09, n. 04, p. 1–9, 2025.

BENZIDIA, S.; MAKAOUI, N.; BENTAHAR, O. The impact of big data analytics and artificial intelligence on green supply chain process integration and hospital environmental performance. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 165, n. 120557, p. 1–13, abr. 2021.

BEVERE, D.; FACCILONGO, N. Shaping the Future of Healthcare: Integrating Ecology and Digital Innovation. **Sustainability**, v. 16, n. 9, p. 1–19, 2024.

BONGOMIN, O. et al. Industry 4.0 Disruption and Its Neologisms in Major Industrial Sectors: A State of the Art. **Journal of Engineering**, v. 2020, n. 1, p. 1–45, 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 3.727**, de 21 de maio de 2024, Altera a Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre o Índice Nacional de Maturidade em Saúde Digital (INMSD), no âmbito do Programa SUS Digital.

Disponível em:

<https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2024/prt3727_22_05_2024.html>.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 3.232**, de 1º de março de 2024, altera a Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para instituir o Programa SUS Digital. Disponível em:

<https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2024/prt3232_04_03_2024.html>.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 3.233**, de 1º de março de 2024.

Disponível em: <<https://www.cosemssp.org.br/wp-content/uploads/2024/05/PORTARIA-3.233-2024.pdf>>.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Plano Nacional de Saúde 2024-2027**. Brasília: Ministério da Saúde, 2024d.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Manual Instrutivo SUS Digital - Planos de Ação**. Brasília: Ministério da Saúde, 2024e.

BRASIL. **Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Brasil, 2010. Disponível em:

<https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares**. Bras, Brasil: MMA, 2022.

BRASIL. **Plano Plurianual 2024-2027**. Disponível em:

<<https://www.gov.br/planejamento/pt-br/assuntos/planejamento/plano-plurianual/paginas/paginas-ppa-2024-2027/lei-do-ppa>>.

BURNES, B. Complexity theories and organizational change. **International Journal of Management Reviews**, v. 7, n. 2, p. 73–90, 25 jun. 2005.

CAMPOS, L. M. DE S. et al. Circular economy and industry 4.0 into industrial engineering courses. **Revista Alcance**, v. 30, n. 2(Maio/Ago), p. 1–12, 19 dez. 2023.

CANTO, G. D. L. et al. **Revisões sistemáticas da literatura: guia prático**. [s.l.] Brazil Publishing, 2020.

CASTELLO BRANCO, R. C. **A influência das tecnologias da indústria 4.0 na implementação de parques industriais ecológicos**. [s.l.] Universidade de Fortaleza, 2023.

CEZARINO, L. O. et al. Diving into emerging economies bottleneck: Industry 4.0 and implications for circular economy. **Management Decision**, v. 59, n. 8, p. 1841–1862, 23 ago. 2021.

CHAERUL, M.; TANAKA, M.; SHEKDAR, A. V. A system dynamics approach for hospital waste management. **Waste Management**, v. 28, n. 2, p. 442–449, jan. 2008.

- CHARI, A. et al. Dynamic capabilities for circular manufacturing supply chains—Exploring the role of Industry 4.0 and resilience. **Business Strategy and the Environment**, v. 31, n. 5, p. 2500–2517, 2022.
- CHAUHAN, A.; JAKHAR, S. K.; CHAUHAN, C. The interplay of circular economy with industry 4.0 enabled smart city drivers of healthcare waste disposal. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, n. 1, p. 123854, jan. 2021.
- CHAUHAN, C.; SHARMA, A.; SINGH, A. A SAP-LAP linkages framework for integrating Industry 4.0 and circular economy. **Benchmarking**, v. 28, n. 5, p. 1638–1664, 2019.
- CHAUHAN, S. et al. Digitalization of Supply Chain Management with Industry 4.0 Enabling Technologies: A Sustainable Perspective. **Processes**, v. 11, n. 1, p. 96, 29 dez. 2022.
- CHEW, X. et al. Circular economy of medical waste: novel intelligent medical waste management framework based on extension linear Diophantine fuzzy FDOSM and neural network approach. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 21, p. 60473–60499, 10 abr. 2023.
- CHHABRA, D.; SINGH, R. K. Analyzing barriers to green logistics in context of Circular Economy and Industry 4.0 in the Indian manufacturing industry. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 27, n. 11, p. 1939–1952, 2024.
- CHRUSCIAK, C. B. et al. Human-centric process improvement through digital transformation : contributions and limitations. **Production**, v. 35, n. 1, p. 1–16, 2025.
- CILIBERTO, C. et al. Enabling the Circular Economy transition: a sustainable lean manufacturing recipe for Industry 4.0. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 7, p. 3255–3272, 2021.
- COCHRANE. **Cochrane Library. Cochrane Database of Systematic Reviews**. Disponível em: <<https://www.cochranelibrary.com/cdsr/about-cdsr>>.
- COSENZA, J. P.; ANDRADE, E. M. DE; ASSUNÇÃO, G. M. DE. Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9, n. 1, p. e16147, 2020.
- CWIKLICKI, M.; WOJNAROWSKA, M. Circular economy and industry 4.0: One-way or two-way relationships? **Engineering Economics**, v. 31, n. 4, p. 387–397, 2020.
- DACHRY, A. et al. **Sustainability in the Era of Industry 4.0 and Circular Economy: Thoretical Background and Bibliometric Analysis**. International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology (IRASET). **Anais...IEEE**, 16 maio 2024. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10549392/>>

- DALTO, J. L. **Agri Circular-PM: uma ferramenta orientada à transição para a economia circular no agronegócio por meio da gestão de projetos**. Tese (Doutorado Profissional em Administração) Universidade Nove de Julho, Programa de Pós-Graduação em Gestão de Projetos. São Paulo, 2024.
- DANTAS, T. E. T. et al. How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, n. 1, p. 213–227, abr. 2021a.
- DANTAS, T. E. T. et al. How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 213–227, abr. 2021b.
- DAS, S. K.; BRESSANELLI, G.; SACCANI, N. **Clustering the Research at the Intersection of Industry 4.0 Technologies, Environmental Sustainability and Circular Economy: Evidence from Literature and Future Research Directions**. [s.l.] Springer International Publishing, 2024. v. 4
- DAS, S.; KARMAKAR, S.; SAHA, H. N. Secure Digital Health Data Management in Internet of Things Using Blockchain and Machine Learning. In: **Digital Health Transformation with Blockchain and Artificial Intelligence**. Boca Raton: CRC Press, 2022. p. 23–45.
- DAÚ, G. et al. The Healthcare Sustainable Supply Chain 4.0: The Circular Economy Transition Conceptual Framework with the Corporate Social Responsibility Mirror. **Sustainability**, v. 11, n. 3259, p. 1–19, 13 jun. 2019.
- DAVID, R. J.; TOLBERT, P. S.; BOGHOSSIAN, J. Institutional Theory in Organization Studies. In: **Oxford Research Encyclopedia of Business and Management**. Oxford: Oxford University Press, 2019.
- DE MATTOS NASCIMENTO, D. L. et al. Interrelationships between circular economy and Industry 4.0: A research agenda for sustainable supply chains. **Business Strategy and the Environment**, v. 33, n. 2, p. 575–596, 2024.
- DE SOUZA, M. et al. A digitally enabled circular economy for mitigating food waste: Understanding innovative marketing strategies in the context of an emerging economy. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 173, n. September, p. 1–14, dez. 2021.
- DEEPA, S. et al. IoT-enabled smart healthcare data and health monitoring based machine learning algorithms. **Journal of Intelligent & Fuzzy Systems**, v. 44, n. 2, p. 2927–2941, 30 jan. 2023.

- DESPOUDI, S. et al. Industry 4.0 and circular economy for emerging markets: evidence from small and medium-sized enterprises (SMEs) in the Indian food sector. **Annals of Operations Research**, v. 350, n. 2, p. 453–491, 29 jul. 2025.
- DI MARIA, E.; DE MARCHI, V.; GALEAZZO, A. Industry 4.0 technologies and circular economy: The mediating role of supply chain integration. **Business Strategy and the Environment**, v. 31, n. 2, p. 619–632, 2022.
- DIHAN, M. R. et al. Healthcare waste in Bangladesh: Current status, the impact of Covid-19 and sustainable management with life cycle and circular economy framework. **Science of The Total Environment**, v. 871, n. 162083, p. 1–18, maio 2023.
- DIXIT, A.; DUTTA, P. Critical success factors for the adoption of circular economy in sustainable healthcare waste management. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 26, n. 7, p. 2181–2201, 10 jul. 2024.
- DOLCI, V. et al. Integrating Industry 4.0 and Circular Economy: A Conceptual Framework for Sustainable Manufacturing. **Procedia Computer Science**, v. 232, p. 1711–1720, 2024.
- DREI, S. M.; IGNÁCIO, P. S. DE A. Lean Healthcare systematically applied to improve mobility accessibility in the medical clinic of a medium-sized hospital. **Production**, v. 34, n. 1, p. 1–14, 2024.
- DUARTE, C. G. C. et al. Implementation of sustainability and circular economy aiming for performance in the context of Industry 4.0 projects. **Revista de Gestão e Projetos**, v. 15, n. 3, p. 507–541, 2024.
- DUONG THI BINH, A. et al. Forging Pathways to Circular Economy Excellence: Integrating Industry 4.0 with Quality Management. **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 7, p. 1–26, 2024.
- DWIVEDI, A. et al. Integrating the circular economy and industry 4.0 for sustainable development: Implications for responsible footwear production in a big data-driven world. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 175, n. July 2020, p. 1–19, fev. 2022.
- DWIVEDI, Y. K. et al. Evolution of artificial intelligence research in Technological Forecasting and Social Change: Research topics, trends, and future directions. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 192, n. 1, p. 122579, 2023.
- ELMASSAH, S. Industry 4.0 and Circular Economy: Opportunities of MENA Countries on the Path to the Sustainable Development. **International Journal of Economy, Energy and Environment**, v. 8, n. 4, p. 59–81, 2023.
- ELROI, H. et al. Enhancing waste resource efficiency: circular economy for sustainability and

- energy conversion. **Frontiers in Environmental Science**, v. 11, n. 1, p. 1–8, 6 nov. 2023.
- EMF. **Circular Economy Introduction**. Disponível em:
 <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>>.
- ERTZ, M. et al. How transitioning to Industry 4.0 promotes circular product lifetimes. **Industrial Marketing Management**, v. 101, n. September 2021, p. 125–140, 2022.
- ESPINOSA, A. V et al. Application of IoT in Healthcare: Keys to Implementation of the Sustainable Development Goals. **Sensors**, v. 21, n. 7, p. 1–37, 2021.
- EUROPEAN COMMISSION. A European Strategy for Plastics. **European Comission**, v. 1, n. July, p. 24, 2018.
- FARAMONDI, L. et al. IIoT in the Hospital Scenario: Hospital 4.0, Blockchain and Robust Data Management. In: **Security and Privacy Trends in the Industrial Internet of Things**. [s.l.] Springer, Cham, 2019. p. 271–285.
- FAROOQ, Q. et al. Basics of macro to microlevel corporate social responsibility and advancement in triple bottom line theory. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, v. 28, n. 3, p. 969–979, maio 2021.
- FARRUKH SHAHZAD, M.; LIU, H.; ZAHID, H. Industry 4.0 technologies and sustainable performance: do green supply chain collaboration, circular economy practices, technological readiness and environmental dynamism matter? **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 36, n. 1, p. 1–22, 2025.
- FERREIRA, N. C. M. Q. F.; FERREIRA, J. J. M. The field of resource-based view research: mapping past, present and future trends. **Management Decision**, v. 63, n. 4, p. 1124–1153, 27 mar. 2025.
- FINDIK, D.; TIRGIL, A.; ÖZBUĞDAY, F. C. Industry 4.0 as an enabler of circular economy practices: Evidence from European SMEs. **Journal of Cleaner Production**, v. 410, n. July 2022, 2023.
- GADELHA, C. A. G. Complexo Econômico-Industrial da Saúde: a base econômica e material do Sistema Único de Saúde. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 38, n. suppl 2, p. 1–17, 2022.
- GARRIDO, S.; MUNIZ, J.; RIBEIRO, V. B. Operations Management, Sustainability & Industry 5.0: A critical analysis and future agenda. **Cleaner Logistics and Supply Chain**, v. 10, p. 100141, mar. 2024.
- GEBHARDT, M. et al. Industry 4.0 technologies as enablers of collaboration in circular supply chains: a systematic literature review. **International Journal of Production Research**, v. 60, n. 23, p. 6967–6995, 2022.

GENARO, C. F. **Proposta de um framework conceitual teórico para a implementação de uma economia circular na indústria química por meio da indústria 4.0.** [s.l.]

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2022.

GHAITHAN, A. M. et al. Integrated Impact of Circular Economy, Industry 4.0, and Lean Manufacturing on Sustainability Performance of Manufacturing Firms. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 20, n. 6, 2023.

GHALI, H. et al. Health and Environmental Impact of Hospital Wastes: Systematic Review. **Dubai Medical Journal**, v. 6, n. 2, p. 67–80, 15 mar. 2023.

GHOBAKHLOO, M. et al. Industry 4.0, innovation, and sustainable development: A systematic review and a roadmap to sustainable innovation. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 8, p. 4237–4257, 3 dez. 2021.

GHOSH, J.; BANERJI, O. The socio-legal challenges of privacy issues in smart healthcare 4.0 ecosystem. **International Journal of Technology, Policy and Management**, v. 24, n. 2, p. 145–168, 2024.

GHOUSHCHI, S. J. et al. Barriers to circular economy implementation in designing of sustainable medical waste management systems using a new extended decision-making and FMEA models. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 53, p. 79735–79753, 7 nov. 2022.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 7th edição ed. São Paulo: Grupo Gen, 2022.

GLOBAL GREEN AND HEALTHY HOSPITALS. **Leading the global movement for sustainable health care**. Disponível em: <<https://greenhospitals.org/>>.

GOMES, F. B. M. et al. Vigilância em saúde ambiental e o desempenho das políticas de acesso à água potável: um estudo de caso no município de Sobral – Ceará. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 13, n. 1, p. 1–45, 23 fev. 2024.

GONZÁLEZ-ARIAS, J. et al. Steam gasification as a viable solution for converting single-use medical items into chemical building blocks with high yields for the plastic industry. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 201, n. 107342, p. 1–10, fev. 2024.

GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, G.; GONZALEZ-CAVA, J. M.; MÉNDEZ PÉREZ, J. A. An intelligent decision support system for production planning based on machine learning. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 31, n. 5, p. 1257–1273, 7 jun. 2020.

GOVINDAN, K. et al. Unravelling and mapping the theoretical foundations of sustainable supply chains: A literature review and research agenda. **Transportation Research Part E**:

Logistics and Transportation Review, v. 189, n. July 2023, p. 103685, 2024.

GOVINDAN, K.; HASANAGIC, M. A systematic review on drivers, barriers, and practices towards circular economy: a supply chain perspective. **International Journal of Production Research**, v. 56, n. 1–2, p. 278–311, 17 jan. 2018.

GRABOWSKA, S.; SANIUK, S.; GAJDZIK, B. Industry 5.0: improving humanization and sustainability of Industry 4.0. **Scientometrics**, v. 127, n. 6, p. 3117–3144, 27 jun. 2022.

GRAVES, D. Z.; BILBAO, A. V.; BAYNE, S. B. Machine Learning Based Foreign Object Detection in Wireless Power Transfer Systems. **e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy**, v. 7, n. 100384, p. 1–10, mar. 2024.

GRIGNAFFINI, L. et al. Improving the energy performance of healthcare buildings: a case study. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2648, n. 1, p. 012035, 1 dez. 2023.

GRUBA, M. C. et al. Circular Economy Initiatives: Strategic Implications, Resource Management, and Entrepreneurial Innovation in a Brazilian Craft Beer Ecosystem during the COVID Era. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 19, p. 1–20, 2022.

GUILHEM, A. P. S.; KLEIN, L. Effects of Big Data Capacity on Sustainable Manufacturing and Circular Economy in Brazilian Industries. **Review of Business Management**, v. 26, n. 1, p. 1–17, 2024.

GUZZO, D. et al. Circular business models in the medical device industry: paths towards sustainable healthcare. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 160, n. 104904, p. 1–15, set. 2020.

HAN, H. et al. Quantum communication based cyber security analysis using artificial intelligence with IoMT. **Optical and Quantum Electronics**, v. 56, n. 565, p. 1–18, 2024.

HARIKANNAN, N.; VINODH, S. State of art review on sustainable manufacturing and Industry 4.0. **Business Strategy and the Environment**, v. 34, n. 1, p. 872–913, 30 jan. 2025.

HARRIS, P.; MCCABE, B. K. Technical evaluation of steam sterilisation coupled with gasification to improve circularity of Australian hospital waste management: A case study. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 207, n. 107680, p. 1–11, ago. 2024.

HASSAN, R. et al. The role of digital technologies in the circular transition of the textile sector. **Journal of the Textile Institute**, v. 0, n. 0, p. 1–14, 2024.

HAZRA, A. et al. A Comprehensive Survey on Interoperability for IIoT: Taxonomy, Standards, and Future Directions. **ACM Computing Surveys**, v. 55, n. 1, p. 1–35, 31 jan. 2023.

HETTIARACHCHI, B. D.; SEURING, S.; BRANDENBURG, M. Industry 4.0-driven

- operations and supply chains for the circular economy: a bibliometric analysis. **Operations Management Research**, v. 15, n. 3–4, p. 858–878, 2022.
- HOLLENBECK, D.; ZULEVIC, D.; CHEN, Y. Advanced leak detection and quantification of methane emissions using sUAS. **Drones**, v. 5, n. 4, 2021.
- HOOSAIN, M. S.; PAUL, B. S.; RAMAKRISHNA, S. The Impact of 4IR Digital Technologies and Circular Thinking on the United Nations Sustainable Development Goals. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 23, p. 10143, 4 dez. 2020.
- HOSPODKOVÁ, P.; ROGALEWICZ, V.; KRÁLÍČKOVÁ, M. Gynecological Speculums in the Context of the Circular Economy. **Economies**, v. 11, n. 70, p. 1–11, 18 fev. 2023.
- HOVELING, T. et al. Circular economy for medical devices: Barriers, opportunities and best practices from a design perspective. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 208, n. 107719, p. 1–17, set. 2024.
- IADANZA, E. et al. Medical devices nomenclature systems: a scoping review. **Health and Technology**, v. 11, n. 4, p. 681–692, 28 jul. 2021.
- ISHAQ, S. et al. Transformative capabilities of MedTech organizations in driving circularity in the healthcare industry: Insights from multiple cases. **Journal of Cleaner Production**, v. 446, n. 141370, p. 1–12, mar. 2024.
- JABBOUR, A. B. L. DE S. et al. Industry 4.0 and the circular economy: a proposed research agenda and original roadmap for sustainable operations. **Annals of Operations Research**, v. 270, n. 1–2, p. 273–286, 1 nov. 2018.
- JABBOUR, A. B. L. DE S. et al. ‘Better together’: Evidence on the joint adoption of circular economy and industry 4.0 technologies. **International Journal of Production Economics**, v. 252, n. August 2020, p. 108581, out. 2022.
- JABBOUR, C. J. C. et al. First-mover firms in the transition towards the sharing economy in metallic natural resource-intensive industries: Implications for the circular economy and emerging industry 4.0 technologies. **Resources Policy**, v. 66, n. September 2019, p. 1–13, jun. 2020.
- JAVAID, M. et al. Industry 4.0 and circular economy for bolstering healthcare sector: A comprehensive view on challenges, implementation, and futuristic aspects. **Biomedical Analysis**, v. 1, n. 2, p. 174–198, 2024.
- JEMAL, K. M. et al. Facilitating Circular Economy Strategies Using Digital Construction Tools: Framework Development. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 1, 2023.
- JESUS, G. M. K. **Contribuições da inovação aberta para a economia circular: um estudo**

multimétodo. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Bauru-SP, 2024.

JESUS, G. M. K. et al. Open innovation to scale up the circular economy: Exploring the mediating role of Industry 4.0 technologies. **Creativity and Innovation Management**, v. 34, n. 1, p. 125–142, 2025.

JOHANNESSEN, S. O. **Complexity in Organizations**. London: Routledge, 2022.

JOSHI, U. The Future of AI, IoT, Big Data and Block Chain Technology in Healthcare Industry: In: **Transformation in Healthcare with Emerging Technologies**. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2022. p. 175–197.

JUGEND, D. et al. Industry 4.0 technologies for the adoption of the circular economy: An analysis of institutional pressures and the effects on firm performance. **Journal of Environmental Management**, v. 370, n. 1, p. 1–13, 2024.

JUNAID, M. et al. Creating a sustainable future through Industry 4.0 technologies: Untying the role of circular economy practices and supply chain visibility. **Business Strategy and the Environment**, v. 33, n. 6, p. 5753–5775, 25 set. 2024.

JUNG, Y.; VAKHARIA, N. Open Systems Theory for Arts and Cultural Organizations: Linking Structure and Performance. **The Journal of Arts Management, Law, and Society**, v. 49, n. 4, p. 257–273, 4 jul. 2019.

KALARIA, C.; SINGH, S.; PRAJAPATI, B. G. Intelligent healthcare supply chain. In: **Human Machine Interface: Making Healthcare Digital**. Dabur International Limited, Dubai, United Arab Emirates: wiley, 2023. p. 449–481.

KANDASAMY, J. et al. Circular economy adoption challenges in medical waste management for sustainable development: An empirical study. **Sustainable Development**, v. 30, n. 5, p. 958–975, 28 out. 2022.

KANE, G. M.; BAKKER, C. A.; BALKENENDE, A. R. Towards design strategies for circular medical products. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, n. June 2017, p. 38–47, ago. 2018.

KANNAN, D. et al. Unveiling barriers to the integration of blockchain-based circular economy and Industry 5.0 in manufacturing industries: A strategic prioritization approach. **Business Strategy and the Environment**, v. 33, n. 8, p. 7855–7886, 2024.

KAR, A. K.; CHOUDHARY, S. K.; SINGH, V. K. How can artificial intelligence impact sustainability: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 376, n. 1, p.

134120, 2022.

KARATAS, M. et al. Big Data for Healthcare Industry 4.0: Applications, challenges and future perspectives. **Expert Systems with Applications**, v. 200, p. 116912, ago. 2022.

KARLINER, J. et al. Health Care's Climate Footprint: How the health sector contributes to the global climate crisis and opportunities for action. Health Care Without Harm; Climate-smart health care series Green Paper Number One. **Health Care Without Harm**, n. September, p. 1–48, 2019.

KARLINER, J. et al. Health care's climate footprint: the health sector contribution and opportunities for action. **European Journal of Public Health**, v. 30, n. Supplement_5, p. 1–15, 1 set. 2020.

KARMAKER, C. L. et al. Impact of industry 4.0 technologies on sustainable supply chain performance: The mediating role of green supply chain management practices and circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 419, p. 138249, set. 2023.

KARTAVTSEV, R. L.; SLABKIY, G. O. Purpose and tasks of the national classifier of medical devices. **Ukraine. Nation's Health**, n. 4, p. 96–98, 2023.

KASSOTAKI, O. Review of Organizational Ambidexterity Research. **Sage Open**, v. 12, n. 1, p. 1–22, 10 jan. 2022.

KAZANÇOĞLU, Y. et al. Big Data-Enabled Solutions Framework to Overcoming the Barriers to Circular Economy Initiatives in Healthcare Sector. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 7513, p. 1–21, 14 jul. 2021.

KELES, C.; CRUZ RIOS, F.; HOQUE, S. Digital Technologies and Circular Economy in the Construction Sector: A Review of Lifecycle Applications, Integrations, Potential, and Limitations. **Buildings**, v. 15, n. 4, p. 1–27, 2025.

KHAN, I. S.; AHMAD, M. O.; MAJAVA, J. Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, Circular Economy and Sustainable Business Models perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 297, p. 126655, 2021.

KHAN, I. S.; AHMAD, M. O.; MAJAVA, J. Industry 4.0 innovations and their implications: An evaluation from sustainable development perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 405, n. 1, p. 137006, jun. 2023.

KHAN, S. A. R. et al. Digital technologies, circular economy practices and environmental policies in the era of covid-19. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 22, 2021a.

KHAN, S. A. R. et al. Industry 4.0 and circular economy practices: A new era business strategies for environmental sustainability. **Business Strategy and the Environment**, v. 30,

n. 8, p. 4001–4014, 2021b.

KHEIRABADI, S.; SHEIKHI, A. Recent advances and challenges in recycling and reusing biomedical materials. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 38, n. 100695, p. 1–8, dez. 2022.

KHURSHID, A. et al. Tackling sustainable development challenges: A fuzzy set examination of textile industry 4.0 and green supply chain barriers. **Sustainable Development**, v. 32, n. 6, p. 6819–6835, 2024.

KIM, V. N. P. et al. a Inter-Relação Entre Indústria 4.0 E Economia Circular: Revisão Sistemática Da Literatura the Interrelation Between Industry 4.0 and Circular Economy: Systematic Literature Review La Interrelación Entre La Industria 4.0 Y La Economía Circular: Revisión D. **Journal of Management & Technology**, v. 22, n. 4, p. 277–303, 2022.

KORHONEN, J.; HONKASALO, A.; SEPPÄLÄ, J. Circular Economy: The Concept and its Limitations. **Ecological Economics**, v. 143, n. 1, p. 37–46, jan. 2018.

KOŠTI, G. Healthcare 5.0 as an emerging research domain: A comprehensive bibliometric analysis and science mapping study. **International Journal of Healthcare Management**, p. 1–23, 20 jul. 2025.

KROTKIEWICZ, M.; SZYNKARUK, A.; STACHYRA, A. Digital Transformation in Healthcare Management: From Artificial Intelligence to Blockchain. **Wiadomości Lekarskie**, n. 3, p. 578–583, 29 mar. 2025.

KRSTIĆ, M. et al. Logistics 4.0 toward circular economy in the agri-food sector. **Sustainable Futures**, v. 4, n. September, 2022.

KULKARNI, M. The role of the control tower in increasing the productivity in container terminal operations. **Journal of Maritime Research**, v. 20, n. 1, p. 30–33, 2023.

KUMAR, A.; CHATTERJEE, K. Securing internet of medical devices using energy efficient blockchain for healthcare 4.0. **Cluster Computing**, v. 27, n. 6, p. 8333–8348, 10 set. 2024.

KUMAR, A.; GUPTA, D. N.; KUMAR, R. Integration Aspects of AI, IoT, Big Data, and Blockchain in Healthcare Industry. In: **Transformation in Healthcare with Emerging Technologies**. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2022. p. 81–104.

KUMAR, A.; MANGLA, S. K.; KUMAR, P. Barriers for adoption of Industry 4.0 in sustainable food supply chain: a circular economy perspective. **International Journal of Productivity and Performance Management**, v. 73, n. 2, p. 385–411, 2024.

KUMAR, A.; RAHMAN, S. RFID-enabled process reengineering of closed-loop supply chains in the healthcare industry of Singapore. **Journal of Cleaner Production**, v. 85, n. 1, p.

382–394, dez. 2014.

KUMAR, A.; SHANKAR, A. Building a sustainable future with enterprise metaverse in a data-driven era: A technology-organization-environment (TOE) perspective. **Journal of Retailing and Consumer Services**, v. 81, p. 103986, nov. 2024.

KUMAR, P.; SINGH, R. K.; KUMAR, V. Managing supply chains for sustainable operations in the era of industry 4.0 and circular economy: Analysis of barriers. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 164, n. October 2020, p. 105215, 2021.

KUTE, S. S.; TYAGI, A. K.; ASWATHY, S. U. Industry 4.0 Challenges in e-Healthcare Applications and Emerging Technologies. In: **Intelligent Interactive Multimedia Systems for e-Healthcare Applications**. Singapore: Springer Singapore, 2022. p. 265–290.

LANZILOTTI, C. O. **Avaliação de sistemas de produto e serviço apoiado por tecnologias habilitadoras de indústria 4.0: estudo de caso em processo de usinagem**. [s.l.]

Universidade Nove de Julho, 2022.

LARA, J. C. F.; EL FADEL, M.; KHALFAN, M. M. A. Integrating Industry 4.0 and circular economy in the UAE construction sector: a policy-aligned framework. **Built Environment Project and Asset Management**, v. 15, n. 3, p. 535–556, 2025.

LASKURAIN-ITURBE, I. et al. Exploring the influence of industry 4.0 technologies on the circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 321, n. September, 2021.

LEI, Z. et al. How do different Industry 4.0 technologies support certain Circular Economy practices? **Industrial Management and Data Systems**, v. 123, n. 4, p. 1220–1251, 2023.

LEISSNER, S.; RYAN-FOGARTY, Y. Challenges and opportunities for reduction of single use plastics in healthcare: A case study of single use infant formula bottles in two Irish maternity hospitals. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 151, n. 104462, p. 1–8, dez. 2019.

LEPPÄLÄ, K.; VORNANEN, L.; SAVINEN, O. Lifecycle extension of single-use medical device sensors: Case study of an engineering sustainability transition program. **Journal of Cleaner Production**, v. 423, n. 138518, p. 1–10, out. 2023.

LIANG, F.; BRUNELLI, M.; REZAEI, J. Consistency issues in the best worst method: Measurements and thresholds. **Omega**, v. 96, p. 102175, out. 2020.

LIOTINE, M. Shaping the Next Generation Pharmaceutical Supply Chain Control Tower with Autonomous Intelligence. **Journal of Autonomous Intelligence**, v. 2, n. 1, p. 56, 30 abr. 2019.

LIU, J. et al. Digital technologies and circular economy in supply chain management: in the

- era of COVID-19 pandemic. **Operations Management Research**, v. 15, n. 1–2, p. 326–341, 2022.
- LIU, L.; SONG, W.; LIU, Y. Leveraging digital capabilities toward a circular economy: Reinforcing sustainable supply chain management with Industry 4.0 technologies. **Computers & Industrial Engineering**, v. 178, n. 109113, p. 1–16, abr. 2023.
- LOPES, E. D. J.; COLOMBO, C. R.; DA SILVA, V. P. Measuring Commitment to Sustainability: Proposal of Performance Indicators for a Public University in Northeast Brazil. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 1–19, 30 nov. 2024.
- LOPES, E. DE J. et al. Application of methods-time measurement as a tool to improve productivity in a beauty salon. **ITEGAM- Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications (ITEGAM-JETIA)**, v. 8, n. 35, p. 20–26, 2022.
- LOPES, E. DE J. et al. Systematic Review of the Circular Economy Performance Assessment System Under International Management Paradigms. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 9, p. e05664, 26 abr. 2024.
- LU, H.; ZHAO, G.; LIU, S. Integrating circular economy and Industry 4.0 for sustainable supply chain management: a dynamic capability view. **Production Planning and Control**, v. 35, n. 2, p. 170–186, 2024.
- MACNEILL, A. J. et al. Transforming The Medical Device Industry: Road Map To A Circular Economy. **Health Affairs**, v. 39, n. 12, p. 2088–2097, 1 dez. 2020.
- MAHJOOB, A.; ALFADHLI, Y.; OMACHONU, V. Healthcare Waste and Sustainability: Implications for a Circular Economy. **Sustainability**, v. 15, n. 7788, p. 1–20, 10 maio 2023.
- MAMUDU, U. U. et al. Circular economy in the manufacturing sector: Digital transformation and sustainable practices. **International Journal of Science and Research Archive**, v. 12, n. 2, p. 129–141, 2024.
- MANEENGAM, A.; UDOMSAKDIGOOL, A. Solving the collaborative bidirectional multi-period vehicle routing problems under a profit-sharing agreement using a covering model. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, v. 11, n. 2, p. 185–200, 2020.
- MANGANDA, A. S.; SEHNEM, S.; LARA, A. C. Transition to the Circular Economy: Innovative and Disruptive Production Technologies Adopted by Agribusiness Startups. **Environmental Quality Management**, v. 34, n. 1, p. 1–18, 2024.
- MARCONI, M. DE A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa**. 9th edição ed. Rio de Janeiro: Atlas, 2021.

- MASSARO, M. et al. Industry 4.0 and circular economy: An exploratory analysis of academic and practitioners' perspectives. **Business Strategy and the Environment**, v. 30, n. 2, p. 1213–1231, 2021.
- MASTOS, T. D. et al. Introducing an application of an industry 4.0 solution for circular supply chain management. **Journal of Cleaner Production**, v. 300, 2021.
- MATARNEH, S. et al. Industry 4.0 technologies and circular economy synergies: Enhancing corporate sustainability through sustainable supply chain integration and flexibility. **Environmental Technology & Innovation**, v. 35, n. 1, p. 103723, ago. 2024.
- MENG, X.; DAS, S.; MENG, J. Integration of Digital Twin and Circular Economy in the Construction Industry. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 17, p. 1–14, 2023.
- MICHAŁOWSKA, J. et al. Assessment of Training Aircraft Crew Exposure to Electromagnetic Fields Caused by Radio Navigation Devices. **Energies**, v. 14, n. 1, p. 1–17, 5 jan. 2021.
- MISHRA, D.; SINGH, P.; AGARWAL, S. AI- and IoT-Based Architecture in Healthcare. In: **Transformation in Healthcare with Emerging Technologies**. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2022. p. 1–18.
- MOHER, D. et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **BMJ**, v. 339, n. jul21 1, p. b2535–b2535, 21 jul. 2009.
- MOREIRA, A. M. M.; GÜNTHER, W. M. R. Assessment of medical waste management at a primary health-care center in São Paulo, Brazil. **Waste Management**, v. 33, n. 1, p. 162–167, 2013.
- MORO VISCONTI, R.; MOREA, D. Big Data for the Sustainability of Healthcare Project Financing. **Sustainability**, v. 11, n. 13, p. 3748, 9 jul. 2019.
- MOYIMANE, M. B.; MATLALA, S. F.; KEKANA, M. P. Experiences of nurses on the critical shortage of medical equipment at a rural district hospital in South Africa: a qualitative study. **Pan African Medical Journal**, v. 28, 2017.
- NANDA, P.; GOPALASWAMY, A. K. Assessment of factors affecting agency cost in M&A context: a systematic literature review. **Journal of Management Control**, v. 35, n. 3, p. 405–435, 20 set. 2024.
- NARA, E. O. B. et al. Expected impact of industry 4.0 technologies on sustainable development: A study in the context of Brazil's plastic industry. **Sustainable Production and Consumption**, v. 25, n. 1, p. 102–122, jan. 2021.
- NARANG, S.; VIJ, D. The COVID-19 Pandemic: An analytical study on opportunities for

circular economy practices in India's healthcare sector. **Asia Pacific Journal of Health Management**, v. 16, n. 4, p. 236–242, 13 dez. 2021.

NASCIMENTO, D. L. DE M. **Building information modeling (BIM) and lean 4.0 to implement circular economy in the oil and gas sector**. [s.l.] Universidade Federal Fluminense, 2019.

NASCIMENTO, D. L. M. et al. Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 30, n. 3, p. 607–627, 15 abr. 2019.

NERI, A. et al. The role of digital technologies in supporting the implementation of circular economy practices by industrial small and medium enterprises. **Business Strategy and the Environment**, v. 32, n. 7, p. 4693–4718, 2023.

NOBRE, G. C.; TAVARES, E. Scientific literature analysis on big data and internet of things applications on circular economy: a bibliometric study. **Scientometrics**, v. 111, n. 1, p. 463–492, 7 abr. 2017.

OLÁH, J. et al. Impact of Industry 4.0 on Environmental Sustainability. **Sustainability**, v. 12, n. 11, p. 4674, 8 jun. 2020.

OLIVEIRA, B. R. DE. **Proposição de um modelo de rede de distribuição para compras on-line de um varejo omni-channel**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2023.

OLIVEIRA, K. B. DE; OLIVEIRA, O. J. DE. Making Hospitals Sustainable: Towards Greener, Fairer and More Prosperous Services. **Sustainability**, v. 14, n. 9730, p. 1–21, 8 ago. 2022.

OLIVEIRA NETO, G. C. DE et al. Industry 4.0 Technologies Promote Micro-Level Circular Economy but Neglect Strong Sustainability in Textile Industry. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 14, p. 1–23, 2023.

OLIVEIRA NETO, G. C. DE et al. Industry 4.0 technologies moderately spurred micro-level circular economy considering cleaner production, not promoting sustainable performance. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 22, n. 7, p. 5817–5840, 2 abr. 2025.

OLIVEIRA NETO, G. C. DE; CONCEIÇÃO SILVA, A. DA; FILHO, M. G. How can Industry 4.0 technologies and circular economy help companies and researchers collaborate and accelerate the transition to strong sustainability? A bibliometric review and a systematic literature review. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 20, n. 3, p. 3483–3520, 16 mar. 2023.

- OLUWADARE, A. et al. Assessing the Impact of Healthcare 4.0 Technologies on Healthcare Supply Chain Management: A Multi-Criteria Evaluation Framework. **Logistics**, v. 8, n. 2, p. 44, 15 abr. 2024.
- OMPRAKASH, K. et al. **Employing IoT in Biomedical Devices: Improving Remote Health Monitoring, Diagnosis, and Treatment with Sophisticated Sensor Networks and Data Connectivity**. 2024 International Conference on Emerging Technologies and Innovation for Sustainability (EmergIN). **Anais...IEEE**, 20 dez. 2024. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10960857/>>
- OSAMA, M. et al. Internet of Medical Things and Healthcare 4.0: Trends, Requirements, Challenges, and Research Directions. **Sensors**, v. 23, n. 17, p. 7435, 25 ago. 2023.
- PAIPA-SANABRIA, E. G.; MONTOYA, D. G.; HERNANDEZ, J. C. Understanding Eco-Innovation: A Critical Examination of Theories and Tools for Achieving Societal Sustainability. **Journal of Sustainability Research**, v. 7, n. 1, p. 1–45, 10 mar. 2025.
- PALSODKAR, M. A.; KOLTHARKAR, P. P. Nexus Effect of Industry 4.0 and Circular Economy Practices in Achieving Sustainable Development Goals. **Circular Economy and Sustainability**, v. 4, n. 4, p. 3215–3244, 2024.
- PANDEY, S. et al. Wastewater Treatment with Technical Intervention Inclination towards Smart Cities. **Sustainability**, v. 14, n. 18, p. 1–16, 2022.
- PATYAL, V. S. et al. Mapping the links between Industry 4.0, circular economy and sustainability: a systematic literature review. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 35, n. 1, p. 1–35, 18 fev. 2022.
- PAULA, E. V. DE. **Exploring the Intersection of Circular Economy and Industry 4.0 in Operations Management: a Systematic Literature Review**. Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais...Fortaleza, Brasil: ENEGEP**, 2023.
- PEARCE, D. W.; TURNER, R. K. **Economics of Natural Resources and the Environment**. Baltimore, MD: Johns Hopkins University Press, 1990.
- PERÇIN, S.; BAYRAKTAR, Y.; KUMAR, V. Evaluating the Adoption of Industry 4.0, Sustainability and Circular Economy Drivers to Achieve Sustainable Development Goals–Oriented Agri-Food Supply Chains. **Business Strategy and the Environment**, v. 34, n. 4, p. 4871–4895, 2025.
- PEREIRA, G. S.; MOTTA, M. G. D. **Indústria 4.0 e economia circular: uma transformação digital e sustentável na engenharia, com aplicação no setor de alimentos e bebidas**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2020.

- PHAM, T. T. et al. Industry 4.0 to accelerate the circular economy: A case study of electric scooter sharing. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 23, p. 1–16, 2019.
- PIEDRA-MUÑOZ, L. et al. Digital Technologies: Description, Classification, and Links to Circular Economy. **Business Strategy and the Environment**, p. 1–28, 2025.
- PIENING, E. P. Dynamic Capabilities in Public Organizations. **Public Management Review**, v. 15, n. 2, p. 209–245, fev. 2013.
- PINHEIRO, M. A. P. **Gestão de desenvolvimento de produtos para a economia circular: uma pesquisa multimétodo no cenário brasileiro**. [s.l.] Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, 2020.
- PINHEIRO, M. A. P. et al. Circular economy-based new products and company performance: The role of stakeholders and Industry 4.0 technologies. **Business Strategy and the Environment**, v. 31, n. 1, p. 483–499, 2022.
- PISCICELLI, L. The sustainability impact of a digital circular economy. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 61, p. 101251, 2023.
- PISCITELLI, G. et al. Circular economy models in the industry 4.0 era: A review of the last decade. **Procedia Manufacturing**, v. 42, n. 2019, p. 227–234, 2020.
- PIYATHANAVONG, V. et al. Implementing Industry 4.0 and circular economy through the developmental culture perspective—Driving a competitive advantage in the manufacturing industry. **Business Strategy and the Environment**, v. 33, n. 8, p. 9059–9074, 2024.
- POLOJÄRVI, D.; PALMER, E.; DUNFORD, C. A systematic literature review of sociotechnical systems in systems engineering. **Systems Engineering**, v. 26, n. 4, p. 482–504, jul. 2023.
- POMEROY, M. K. et al. **Application of Organizational Systems Theory to Identify Education and Training Needs for Industry 4.0**. 2023 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE). **Anais...IEEE**, 18 out. 2023. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10342905/>>
- QUINTERO, W. R.; MALDONADO, J. E. N. Competencies of the engineer in industry 4.0 context: a systematic literature review. **Production**, v. 34, n. 1, p. 1–17, 2024.
- QURESHI, K. M. et al. Investigating industry 4.0 technologies in logistics 4.0 usage towards sustainable manufacturing supply chain. **Heliyon**, v. 10, n. 10, p. e30661, maio 2024.
- RAJPUT, S.; SINGH, S. P. Industry 4.0 – challenges to implement circular economy. **Benchmarking**, v. 28, n. 5, p. 1717–1739, 2019a.
- RAJPUT, S.; SINGH, S. P. Connecting circular economy and industry 4.0. **International**

Journal of Information Management, v. 49, n. 1, p. 98–113, dez. 2019b.

RAMAKRISHNA, S. et al. Emerging Industrial Revolution: Symbiosis of Industry 4.0 and Circular Economy: The Role of Universities. **Science, Technology and Society**, v. 25, n. 3, p. 505–525, 2020.

RANJBARI, M. et al. Mapping healthcare waste management research: Past evolution, current challenges, and future perspectives towards a circular economy transition. **Journal of Hazardous Materials**, v. 422, n. 126724, p. 1–18, jan. 2022.

RAVICHANDRAN, R. et al. Medical device: a complete overview. **International Journal of Clinical Trials**, v. 7, n. 4, p. 285, 20 out. 2020.

REN, Y. et al. Discovering the systematic interlinkages among the circular economy, supply chain, industry 4.0, and technology transfer: A bibliometric analysis. **Cleaner and Responsible Consumption**, v. 9, n. April, p. 100123, 2023.

REZAEI, J. Best-worst multi-criteria decision-making method. **Omega**, v. 53, p. 49–57, jun. 2015.

REZAEI, J. Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. **Omega**, v. 64, p. 126–130, out. 2016.

RISSO, L. A.; GANGA, G. M. D.; GODINHO FILHO, M. **Aplicações de tecnologias da Indústria 4.0 na Economia Circular: uma revisão sistemática**. Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Anais...**Santos, São Paulo, Brasil: ENEGEP, 2019.

RIZVI, S. W. H.; AGRAWAL, S.; MURTAZA, Q. Automotive industry and industry 4.0- Circular economy nexus through the consumers' and manufacturers' perspectives: A case study. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 183, n. October 2022, 2023.

RODRIGUES, K. T. **Desenvolvimento de um framework para apoio à gestão da sustentabilidade corporativa portuária**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2023.

RODRÍGUEZ, G. R.; GONZALEZ-CAVA, J. OSÉ M.; PÉREZ, J. A. M. An intelligent decision support system for production planning based on machine learning. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 31, n. 5, p. 1257–1273, 2020.

ROMERO, C. A. T. et al. Synergy between circular economy and industry 4.0: A literature review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 13, n. 8, p. 1–18, 2021.

ROOPALAKSHMI, S. et al. Automated Medical Device Classification. **International Journal of Innovative Research in Information Security**, v. 11, n. 02, p. 106–109, 13 maio 2025.

ROSA, P. et al. Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: a systematic

- literature review. **International Journal of Production Research**, v. 58, n. 6, p. 1662–1687, 18 mar. 2020.
- ROSSETTI, A. P. L. et al. Identifying Industry 4.0 technologies enablers for knowledge management – a scoping review. **The TQM Journal**, v. 36, n. 1, p. 340–360, 2 jan. 2024.
- ROWAN, N. J. Digital technologies to unlock safe and sustainable opportunities for medical device and healthcare sectors with a focus on the combined use of digital twin and extended reality applications: A review. **Science of the Total Environment**, v. 926, n. 1, p. 1–17, 2024.
- SAHA, E.; RATHORE, P. The impact of healthcare 4.0 technologies on healthcare supply chain performance: Extending the organizational information processing theory. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 201, n. April 2023, p. 123256, 2024.
- SAHOO, S.; JAKHAR, S. K. Industry 4.0 deployment for circular economy performance—Understanding the role of green procurement and remanufacturing activities. **Business Strategy and the Environment**, v. 33, n. 2, p. 1144–1160, 2024.
- SAHU, A.; AGRAWAL, S.; KUMAR, G. Integrating Industry 4.0 and circular economy: a review. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 35, n. 3, p. 885–917, 2022.
- SAKHAROV, A. BRICS countries’ progress in achieving the climate and environmental goals of the Agenda 2030. **International Organisations Research Journal**, v. 19, n. 1, p. 106–128, 1 mar. 2024.
- SAMADHIYA, A. et al. Total productive maintenance and Industry 4.0 in a sustainability context: exploring the mediating effect of circular economy. **International Journal of Logistics Management**, v. 34, n. 3, p. 818–846, 2023.
- SAMUEL, K. K. M.; SELVARAJ, K.; LAKSHMANAN, S. Health Management Information Systems. **REST Journal on Banking, Accounting and Business**, v. 4, n. 1, p. 214–222, 22 abr. 2025.
- SANTOLIN, R. B.; NONEMACHER, T. B. Barreiras para implementação de Modelos de Negócio de Economia Circular na Indústria Manufatureira Brasileira. **Revista Gestão & Sustentabilidade**, v. 5, n. 1, p. 1–28, 2024.
- SANTOS, D. DE A. **Proposta de modelo de maturidade em sustentabilidade: o caso da cadeia produtiva no ambiente da indústria 4.0.** [s.l.] Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, 2021.
- SANTOS, D. B. DOS et al. Inovação tecnológica na sustentabilidade: uma revisão sistemática sobre o papel das tecnologias verdes na transição para economia circular. **Contribuciones a**

Las Ciencias Sociales, v. 18, n. 1, p. 1–17, 2025.

SATYRO, W. C. et al. Industry 4.0 implementation: The relevance of sustainability and the potential social impact in a developing country. **Journal of Cleaner Production**, v. 337, n. January, p. 1–9, fev. 2022.

SATYRO, W. C. et al. Technology-Organization-External-Sustainability (TOES) Framework for Technology Adoption: Critical Analysis of Models for Industry 4.0 Implementation Projects. **Sustainability**, v. 16, n. 24, p. 11064, 17 dez. 2024.

SAVAGET, P. et al. The theoretical foundations of sociotechnical systems change for sustainability: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 878–892, jan. 2019.

SAXENA, P. K.; SEETHARAMAN, A.; SHAWARIKAR, G. Factors That Influence Sustainable Innovation in Organizations: A Systematic Literature Review. **Sustainability**, v. 16, n. 12, p. 4978, 11 jun. 2024.

SCHIFFER, M.; DOERR, D. M. **Development of the Supply Chain Management 2040 - Opportunities and Challenges**. (N. P., H. D., H. M., Eds.) Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics. **Anais...** Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA, Stuttgart, Germany: Publish-Ing in cooperation with TIB - Leibniz Information Centre for Science and Technology University Library, 2020. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85163997339&doi=10.15488%2F9644&partnerID=40&md5=08bfe0f80984484ef334ee61aa34a1f5>>

SCHLEMITZ, A.; MEZHUYEV, V. Approaches for data collection and process standardization in smart manufacturing: Systematic literature review. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 38, p. 100578, mar. 2024.

SCHMIDT, J. et al. Mapping the regulatory landscape for artificial intelligence in health within the European Union. **npj Digital Medicine**, v. 7, n. 1, p. 229, 27 ago. 2024.

SCHROEDER, P.; ANGGRAENI, K.; WEBER, U. The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. **Journal of Industrial Ecology**, v. 23, n. 1, p. 77–95, 13 fev. 2019.

SEHNEM, S. et al. Improving startups through excellence initiatives: addressing circular economy and innovation. **Environment, Development and Sustainability**, v. 26, n. 6, p. 15237–15283, 21 abr. 2023.

SEHNEM, S. et al. Reconciling the efficiency of Industry 4.0 and circular economy with the

human empowerment of lean: unraveling the challenges and opportunities of integration.

Social Responsibility Journal, v. 21, n. 3, p. 429–450, 2025.

SELL, L. G. et al. Circular economy practices using the ReSOLVE framework: An assessment by sector and scale in the Brazilian planted tree industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 433, n. 1, p. 1–8, 2023.

SERGEANT, M. et al. Managing greenhouse gas emissions in the terminal year of life in an overwhelmed health system: a paradigm shift for people and our planet. **The Lancet Planetary Health**, v. 8, n. 5, p. e327–e333, 2024.

SERI, M. N. **A adoção de tecnologias da indústria 4.0 estimula ações da economia circular no nível micro: survey em indústrias têxteis de grande porte localizadas no Brasil**. [s.l.] Universidade Federal do ABC, 2023.

SEVERO, E. A. Inovação e Economia Circular Para a Performance Organizacional e o Desenvolvimento Sustentável. **Revista Gestão e Desenvolvimento**, v. 21, n. 2, p. 3–29, 2024.

SILVA, A. F. C. DA et al. Análise da integração da indústria 4.0 e economia circular para consolidação do conceito da remanufatura 4.0: um estudo bibliométrico. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 7, p. 1–14, 16 maio 2022.

SILVA, T. H. H. DA; SEHNEM, S. The circular economy and Industry 4.0: synergies and challenges. **Revista de Gestao**, v. 29, n. 3, p. 300–313, 2022a.

SILVA, T. H. H. DA; SEHNEM, S. Industry 4.0 and the Circular Economy: Integration Opportunities Generated by Startups. **Logistics**, v. 6, n. 1, p. 14, 7 fev. 2022b.

SILVA, T. H. H. DA; SEHNEM, S. Industry 4.0 technologies as a motivator for the circular economy in foodtechs: A stakeholder perspective. **Sustainable Development**, v. 32, n. 5, p. 4633–4648, 2024a.

SILVA, T. H. H. DA; SEHNEM, S. Circular Supply Chains and Industry 4.0: An Analysis of Interfaces in Brazilian Foodtechs. **Procedia Computer Science**, v. 232, n. 2023, p. 1357–1366, 2024b.

SILVA, T. H. H. DA; SEHNEM, S. Circular supply chains and Industry 4.0: an analysis of interfaces in Brazilian foodtechs. **RAUSP Management Journal**, v. 59, n. 2, p. 78–95, 8 jul. 2024c.

SILVA, T. H. H. DA; SEHNEM, S. The utilization of Industry 4.0 technologies to enhance the circular economy through the engagement of stakeholders in Brazilian food technology companies. **Business Strategy and the Environment**, v. 34, n. 1, p. 129–161, 2025.

SILVA, F. C. et al. Circular economy: analysis of the implementation of practices in the

- Brazilian network. **Revista de Gestao**, v. 26, n. 1, p. 39–60, 2019.
- SILVA, M. G. **O desenvolvimento da economia circular no contexto da indústria 4.0 e suas tecnologias: um estudo bibliométrico**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2022.
- SIMIONI, F. J. et al. Industrial Symbiosis and Circular Economy Practices Towards Sustainability in Forest-Based Clusters: Case Studies in Southern Brazil. **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 21, p. 1–17, 2024.
- SINGH, R. et al. Integrating Industry 4.0, Circular Economy, and Green HRM: A Framework for Sustainable Transformation. **Sustainability**, v. 17, n. 7, p. 3082, 31 mar. 2025.
- SINHA, S. Supply chain visibility: The real-time necessity. In: **Digital Supply Chain, Disruptive Environments, and the Impact on Retailers**. Diageo, India: IGI Global, 2023. p. 193–209.
- SOARES, C. M. F. et al. Economia Circular e Indústria 4.0: Áreas de aplicação conjunta. **Exacta**, v. 23, n. 2, p. 384–408, 11 mar. 2024.
- SOUZA, J. B. DE et al. Impactos da indústria 4.0 na sustentabilidade no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Revista de Gestão e Secretariado - GeSec**, v. 15, n. 6, p. 1–16, 2024.
- SOUZA, N. L. S. DE et al. A DEMATEL-based analysis of logistics determinants in online retail. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 1–19, 2025.
- SOUZA, G. L. V. **Avaliação da circularidade de fabricantes de celulose e papel que adotam tecnologias da indústria 4.0: estudo de casos múltiplos**. [s.l.] Universidade Nove de Julho, 2023.
- SRIRAMALAKSHMI, P.; VONDIVILLU, S. T.; GOVIND, A. S. K. Role of IoT, AI, and Big Data Analytics in Healthcare Industry. In: **Transformation in Healthcare with Emerging Technologies**. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC, 2022. p. 19–43.
- STOCCO, L. C. **Framework de economia circular 4.0 para o setor atacado distribuidor: Perspectivas a partir da regionalidade**. [s.l.] Faculdade de Gestão e Negócios, Universidade Federal de Uberlândia, 2020.
- STREIT, J. A. C.; GUARNIERI, P.; SOUZA, R. S. DE. Circular economy strategies and practices: A case study with multiple participants in the packaging sector in Brazil. **Contextus – Revista Contemporânea de Economia e Gestão**, v. 21, n. 1, p. 1–15, 2023.
- SUTHAGAR, K. S.; MISHRA, U. Sustainable green circular economic model with controllable waste and emission in healthcare system. **Environment development and Sustainability**, n. 1, p. 1–43, 2024a.

- SUTHAGAR, K. S.; MISHRA, U. Sustainable green circular economic model with controllable waste and emission in healthcare system. **Environment, Development and Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 1–43, 30 jan. 2024b.
- SWAYAMSIDDHA, S. et al. **Development of an IoT-Enabled Smart Healthcare Monitoring System for Real-Time Patient Health Surveillance**. 2025 3rd International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT). **Anais...IEEE**, 5 fev. 2025. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10914909/>>
- TADDEI, E. et al. Circular supply chains in the era of industry 4.0: A systematic literature review. **Computers and Industrial Engineering**, v. 170, p. 108268, 2022.
- TAKHAR, S. S.; LIYANAGE, K. The impact of Industry 4.0 on sustainability and the circular economy reporting requirements. **International Journal of Integrated Supply Management**, v. 13, n. 2–3, p. 107–139, 2020.
- TANG, Y. M. et al. Industry 4.0 technology and circular economy practices: business management strategies for environmental sustainability. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 33, p. 49752–49769, 2022.
- TAO, F. et al. Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. **Engineering**, v. 5, n. 4, p. 653–661, ago. 2019.
- TEIXEIRA, C. H. S. B.; TEIXEIRA, R. L. P. Convergences between circular economy and industry 4.0 practices. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 1–19, 23 ago. 2022.
- THEERAWORAWIT, M.; SURIYANKIETKAEW, S.; HALLINGER, P. Sustainable Supply Chain Management in a Circular Economy: A Bibliometric Review. **Sustainability**, v. 14, n. 15, p. 9304, 29 jul. 2022.
- THIRUMAL, S. et al. Barriers to Adopting Digital Technologies to Implement Circular Economy Practices in the Construction Industry: A Systematic Literature Review. **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 8, 2024.
- TIWARI, M. K. et al. Supply chain digitisation and management. **International Journal of Production Research**, v. 62, n. 8, p. 2918–2926, 17 abr. 2024.
- TORTORELLA, G. L. et al. Assessment and prioritisation of Healthcare 4.0 implementation in hospitals using Quality Function Deployment. **International Journal of Production Research**, v. 60, n. 10, p. 3147–3169, 2022.
- TOSCAS, F. S. et al. Management of medical equipment in the Brazilian public health system

(SUS), historical situation and the context of the pandemic COVID-19: a cut for lung ventilators. **Health and Technology**, v. 13, n. 3, p. 515–521, 2023.

TOTH-PETER, A. et al. Industry 4.0 as an enabler in transitioning to circular business models: A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 393, n. November 2022, p. 136284, 2023.

TREVISAN, A. H. et al. Barriers to employing digital technologies for a circular economy: A multi-level perspective. **Journal of Environmental Management**, v. 332, n. January, p. 1–13, abr. 2023.

TSENG, M.-L. et al. Healthcare industry circular supply chain collaboration in Vietnam: vision and learning influences on connection in a circular supply chain and circularity business model. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v. 25, n. 4–5, p. 743–768, 4 maio 2022.

UÇAR, E.; LE DAIN, M. A.; JOLY, I. Digital technologies in circular economy transition: Evidence from case studies. **Procedia CIRP**, v. 90, n. March, p. 133–136, 2020.

ULLAH, F.; OLATUNJI, O.; QAYYUM, S. A scoping review of green Internet of Things in construction and smart cities: current applications, adoption strategies and future directions. **Smart and sustainable built environment**, 2024.

UPADHYAY, A. et al. Implementing industry 4.0 in the manufacturing sector: Circular economy as a societal solution. **Computers and Industrial Engineering**, v. 177, n. February, p. 109072, 2023.

VARELLA, W. A. **Arquitetura de serviços integrada para promover a economia circular na agricultura**. [s.l.] Universidade Nove de Julho, 2022.

VARELLA, W. A. et al. Integrated Service Architecture to Promote the Circular Economy in Agriculture 4.0. **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 6, p. 1–25, 2024.

VIANI, C.; VACCARI, M.; TUDOR, T. Recovering value from used medical instruments: A case study of laryngoscopes in England and Italy. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 111, n. 1, p. 1–9, ago. 2016.

VIDO, M. et al. Avançando a manufatura sustentável em engenharia de produção: estudo de caso sobre Indústria 4.0 e economia circular no setor industrial. **Exacta**, p. 1–37, 10 out. 2024.

VILES, E. et al. Theorizing the Principles of Sustainable Production in the context of Circular Economy and Industry 4.0. **Sustainable Production and Consumption**, v. 33, p. 1043–1058, 2022.

- VIOLA, E.; GONÇALVES, V. K. Brazil ups and downs in global environmental governance in the 21st century. **Revista Brasileira de Política Internacional**, v. 62, n. 2, 2019.
- VISHWAKARMA, A. et al. Can circular healthcare economy be achieved through implementation of sustainable healthcare supply chain practices? Empirical evidence from Indian healthcare sector. **Journal of Global Operations and Strategic Sourcing**, v. 17, n. 2, p. 230–246, 16 abr. 2024.
- WANYAMA, J. et al. A systematic review of fourth industrial revolution technologies in smart irrigation: Constraints, opportunities, and future prospects for sub-Saharan Africa. **Smart Agricultural Technology**, v. 7, p. 100412, mar. 2024.
- WEIDNER, K.; NAKATA, C.; ZHU, Z. Sustainable innovation and the triple bottom-line: a market-based capabilities and stakeholder perspective. **Journal of Marketing Theory and Practice**, v. 29, n. 2, p. 141–161, 3 abr. 2021.
- WESTOVER, J. The Role of Complexity Theory as a Foundation for Taking a Systems Approach in Your Organization. **Human Capital Leadership Review**, v. 14, n. 2, nov. 2024.
- WHO. **Health-care waste**. Disponível em: <<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/health-care-waste>>. Acesso em: 30 jan. 2025.
- WILLIAMS, E. et al. 3D-printed activated charcoal inlet filters for oxygen concentrators: A circular economy approach. **Development Engineering**, v. 7, n. 100094, p. 1–10, 2022.
- WÓJCICKI, K. et al. Internet of Things in Industry: Research Profiling, Application, Challenges and Opportunities—A Review. **Energies**, v. 15, n. 5, p. 1806, 28 fev. 2022.
- WU, C.; LIU, J.; ZHANG, H. Data Ecology and Accurate Portrait: Optimization of Credit Risk System for SMEs in Supply Chain Finance Based on Big Data Technology. **Journal of Risk Analysis and Crisis Response**, v. 11, n. 4, p. 163–175, 2021.
- YADAV, G. et al. A framework to overcome sustainable supply chain challenges through solution measures of industry 4.0 and circular economy: An automotive case. **Journal of Cleaner Production**, v. 254, p. 120112, 2020a.
- YADAV, G. et al. A framework to achieve sustainability in manufacturing organisations of developing economies using industry 4.0 technologies’ enablers. **Computers in Industry**, v. 122, p. 103280, nov. 2020b.
- YALÇIN, H. A Thorough Examination of Agency Theory and Agency Costs in M&A. **International Journal of Management and Economics Invention**, v. 10, n. 07, 5 jul. 2024.
- YAMASHITA, W. S. **Explorando a conexão entre a economia circular e a indústria 4.0: uma revisão sistemática da literatura**. [s.l.] Universidade Estadual Paulista “Júlio de

Mesquita Filho”, Campus Araraquara, 2023.

YAZDI, M. et al. Improved DEMATEL methodology for effective safety management decision-making. **Safety Science**, v. 127, n. 1, p. 104705, jul. 2020.

YU, Z.; KHAN, S. A. R.; UMAR, M. Circular economy practices and industry 4.0 technologies: A strategic move of automobile industry. **Business Strategy and the Environment**, v. 31, n. 3, p. 796–809, 2022.

YUNITA, T. et al. Organizational ambidexterity: The role of technological capacity and dynamic capabilities in the face of environmental dynamism. **Heliyon**, v. 9, n. 4, p. e14817, abr. 2023.

ZARDO, D. J. et al. Circular supply chain and circular practices: An analysis from the perspective of sustainability and Industry 4.0. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, v. 32, n. 2, p. 1831–1846, 2025.

ZECHEL, M. et al. Circularity of Polymers Used in Hospitals: Current Status, Challenges, and Future Solutions. **Advanced Sustainable Systems**, v. 2400050, n. 1, p. 1–17, 8 maio 2024.

ZHANG, J. et al. A review of dynamic capabilities evolution—based on organisational routines, entrepreneurship and improvisational capabilities perspectives. **Journal of Business Research**, v. 168, p. 114214, nov. 2023a.

ZHANG, W. et al. Intelligent Construction of Hospital Management Organization Based on Communication Technology and Information Fusion. **Wireless Communications and Mobile Computing**, v. 2023, n. 1, p. 1–8, 5 maio 2023b.

ZHAO, G. et al. Deployment of Industry 4.0 technologies to achieve a circular economy in agri-food supply chains: A thorough analysis of enablers. **Journal of Environmental Management**, v. 373, n. December 2024, p. 123856, 2025.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Roteiro de Observação

Roteiro de Observação

Objetivo: Registrar de forma sistemática os processos de aquisição, uso e descarte de dispositivos médicos nos dois hospitais.

Etapas da Observação:

1. Aquisição

- Identificar como são realizados os processos de compra e quais critérios são utilizados.
- Verificar se há planejamento baseado na demanda (ex.: histórico de consumo).
- Observar se os dispositivos médicos adquiridos são descartáveis ou reutilizáveis.

2. Uso

- Acompanhar a rotina de uso de dispositivos médicos nas áreas de atendimento (ex.: emergência, internação, centro cirúrgico).
- Registrar se há treinamento dos profissionais sobre o uso eficiente dos dispositivos.
- Observar se há cuidados com dispositivos reutilizáveis, como higienização ou calibração.

3. Descarte

- Verificar onde e como os dispositivos médicos descartados são armazenados antes do descarte final.
- Registrar a separação de resíduos em categorias específicas (infectantes, recicláveis, comuns).
- Observar o uso de tecnologias para rastreamento ou gerenciamento de resíduos hospitalares.

4. Infraestrutura e Recursos

- Anotar a existência de locais adequados para armazenamento e descarte de dispositivos médicos.
- Verificar se os hospitais possuem equipamentos ou contratos com empresas para reprocessamento ou reciclagem de dispositivos.

5. Identificação de Práticas Sustentáveis

- Identificar práticas existentes que se alinhem aos princípios da Economia

Circular (ex.: remanufatura, reciclagem, logística reversa).

- Observar possíveis lacunas ou oportunidades de melhoria nos processos.

Instrumentos de Registro:

- Planilha de Registro: Organizar observações em uma tabela estruturada com colunas como: etapa, descrição do processo, recursos utilizados, desafios identificados e oportunidades.
- Notas de Campo: Registrar detalhes adicionais não capturados na planilha, como comportamentos, comentários informais e percepções gerais.
- Fotos (quando autorizado): Documentar visualmente espaços e práticas relevantes.

APÊNDICE B – Questionário Estruturado para o Estudo de Caso

Link para o questionário: <https://forms.gle/TFizcTtYiAXqbyWj9>

Objetivo: Captar informações sobre os dispositivos médicos e os processos de aquisição, uso e descarte nos dois hospitais, bem como identificar barreiras e oportunidades para a adoção da Economia Circular.

Seção 1: Caracterização do Respondente

1. Qual é sua função na instituição?

- ☐ Engenheiro Clínico
- ☐ Gestor(a) hospitalar (Compras)
- ☐ Gestor(a) hospitalar (Logística)
- ☐ Gestor(a) hospitalar (Manutenção)
- ☐ Gestor(a) hospitalar (Gestão de resíduos)
- ☐ Diretor(a) hospitalar
- ☐ Especialista em políticas públicas de saúde
- ☐ Consultor(a) em sustentabilidade hospitalar e economia circular
- ☐ Engenheiro(a) ambiental e sanitarista atuante na gestão de resíduo hospitalar
- ☐ Pesquisador(a) ou acadêmico(a) em economia circular e sustentabilidade hospitalar
- ☐ Profissional de logística hospitalar
- ☐ Diretor(a) de sustentabilidade ou compliance em hospitais
- ☐ Outra: _____

2. Há quanto tempo você atua nesta função?

- ☐ Menos de 1 ano
- ☐ 1 a 3 anos
- ☐ 3 a 5 anos
- ☐ 5 a 10 anos

☐ Mais de 10 anos

3. Qual é o seu nível de escolaridade?

☐ Ensino Fundamental

☐ Ensino Médio

☐ Ensino Técnico Profissionalizante

☐ Graduação

☐ Pós-graduação

4. Qual o curso? _____

Seção 2: Dispositivos Médicos Duráveis (DMDs) e Gestão Hospitalar

4. Quais são os principais Dispositivos Médicos Duráveis utilizados no hospital?

(Marque todas as opções aplicáveis)

☐ **Equipamentos de monitoramento** (ex.: oxímetros, monitores cardíacos, eletrocardiogramas, monitores multiparamétricos, capnógrafos)

☐ **Equipamentos de diagnóstico** (ex.: tomógrafos, ultrassons, aparelhos de ressonância magnética, endoscópios, analisadores laboratoriais automatizados)

☐ **Dispositivos implantáveis** (ex.: próteses ortopédicas, stents, marca-passos, válvulas cardíacas, implantes cocleares)

☐ **Instrumentos cirúrgicos reutilizáveis** (ex.: pinças cirúrgicas, bisturis metálicos, afastadores, tesouras cirúrgicas, porta-agulhas)

☐ **Equipamentos de suporte respiratório** (ex.: ventiladores pulmonares, CPAPs, BiPAPs, concentradores de oxigênio, nebulizadores hospitalares)

☐ **Equipamentos de terapia** (ex.: bombas de infusão, máquinas de hemodiálise, desfibriladores, aparelhos de fototerapia neonatal, estimuladores elétricos neuromusculares - TENS/FES)

☐ **Outros:** _____

5. Quais os 3 Dispositivos Médicos Duráveis utilizados no hospital que você considera que tem **MAIOR** relevância Econômica e Ambiental?

Dispositivo Médico Durável	0. Não selecionado	1. Pouco Relevante	2. Relevante	3. Muito Relevante
Equipamentos de monitoramento (ex.: oxímetros, monitores cardíacos, eletrocardiogramas, monitores multiparamétricos, capnógrafos)				
Equipamentos de diagnóstico (ex.: tomógrafos, ultrassons, aparelhos de ressonância magnética, endoscópios, analisadores laboratoriais)				

<i>automatizados)</i>				
Dispositivos implantáveis (ex.: próteses ortopédicas, stents, marca-passos, válvulas cardíacas, implantes cocleares)				
Instrumentos cirúrgicos reutilizáveis (ex.: pinças cirúrgicas, bisturis metálicos, afastadores, tesouras cirúrgicas, porta-agulhas)				
Equipamentos de suporte respiratório (ex.: ventiladores pulmonares, CPAPs, BiPAPs, concentradores de oxigênio, nebulizadores hospitalares)				
Equipamentos de terapia (ex.: bombas de infusão, máquinas de hemodiálise, desfibriladores, aparelhos de fototerapia neonatal, estimuladores elétricos neuromusculares - TENS/FES)				

6. Quais os 3 Dispositivos Médicos Duráveis utilizados no hospital que você considera que tem MENOR relevância Econômica e Ambiental?

Dispositivo Médico Durável	0. Não selecionado	1. Menor relevância	2. Relevância baixa	3. Relevância moderada entre os menos relevantes
Equipamentos de monitoramento (ex.: oxímetros, monitores cardíacos, eletrocardiógrafos, monitores multiparamétricos, capnógrafos)				
Equipamentos de diagnóstico (ex.: tomógrafos, ultrassons, aparelhos de ressonância magnética, endoscópios, analisadores laboratoriais automatizados)				
Dispositivos implantáveis (ex.: próteses ortopédicas, stents, marca-passos, válvulas cardíacas, implantes cocleares)				
Instrumentos cirúrgicos reutilizáveis (ex.: pinças cirúrgicas, bisturis metálicos, afastadores, tesouras cirúrgicas, porta-agulhas)				
Equipamentos de suporte respiratório (ex.: ventiladores pulmonares, CPAPs, BiPAPs, concentradores de oxigênio, nebulizadores hospitalares)				
Equipamentos de terapia (ex.: bombas de infusão, máquinas de hemodiálise, desfibriladores, aparelhos de fototerapia neonatal, estimuladores elétricos neuromusculares - TENS/FES)				

7. O hospital possui controle sobre o ciclo de vida dos Dispositivos Médicos Duráveis?

- ☐ Sim, há um sistema de rastreamento e gerenciamento desses dispositivos
- ☐ Sim, mas o controle é parcial e depende do setor
- ☐ Não há um controle formal
- ☐ Não sei informar

8. **O hospital adota práticas de reuso, remanufatura ou reprocessamento de DMDs?**
- ☐ Sim, há diretrizes específicas para reuso/remanufatura
 - ☐ Sim, mas de forma limitada e sem diretrizes formais
 - ☐ Não há práticas estabelecidas
 - ☐ Não sei informar
9. **Se sim, quais Dispositivos Médicos Duráveis são reprocessados ou remanufaturados?**
(marque todas as opções aplicáveis)
- ☐ Equipamentos de monitoramento
 - ☐ Equipamentos de diagnóstico
 - ☐ Dispositivos implantáveis
 - ☐ Instrumentos cirúrgicos reutilizáveis
 - ☐ Equipamentos de suporte respiratório
 - ☐ Equipamentos de terapia
 - ☐ Outros: _____
10. **O hospital possui diretrizes específicas para o descarte de DMDs?**
- ☐ Sim. Quais? _____
 - ☐ Não
 - ☐ Não sei informar
11. **Se respondeu sim, quais seriam?**

Se respondeu sim, quais? _____

Seção 3: Barreiras e Oportunidades para a Economia Circular

12. **Quais são as principais barreiras enfrentadas para implementar práticas circulares no hospital?** *(marque todas as opções aplicáveis)*

- ☐ Resistência cultural e organizacional (resistência de gestores e/ou profissionais à mudança de práticas estabelecidas)
- ☐ Falta de conhecimento sobre o tema (dificuldade em compreender os conceitos e benefícios da Economia Circular)
- ☐ Altos custos para implementação (investimentos iniciais elevados em tecnologias e infraestrutura)
- ☐ Falta de infraestrutura tecnológica adequada (deficiência de sistemas e tecnologias para suporte à Economia Circular)
- ☐ Complexidade regulatória (dificuldade em adaptar práticas circulares às normas e regulamentações existentes)
- ☐ Falta de capacitação e especialização (necessidade de treinamento para gestores e profissionais de saúde)

- ☐ Dificuldade na medição de impactos (falta de métricas claras e confiáveis para avaliar os benefícios da Economia Circular)
- ☐ Limitações na cadeia de suprimentos (dificuldades em acessar materiais sustentáveis ou fornecedores comprometidos com práticas circulares)
- ☐ Desafios na gestão de resíduos perigosos (dificuldade em gerenciar resíduos hospitalares que não podem ser reutilizados ou reciclados)
- ☐ Outros: _____

13. Quais Dispositivos Médicos Duráveis apresentam maior dificuldade para adoção de práticas circulares? (marque todas as opções aplicáveis)

- ☐ Equipamentos de monitoramento
- ☐ Equipamentos de diagnóstico
- ☐ Dispositivos implantáveis
- ☐ Instrumentos cirúrgicos reutilizáveis
- ☐ Equipamentos de suporte respiratório
- ☐ Equipamentos de terapia
- ☐ Outros: _____

14. Quais são as principais oportunidades para a adoção de práticas circulares no hospital? (marque todas as opções aplicáveis)

- ☐ Inovação tecnológica (uso de tecnologias avançadas da Indústria 4.0, como IoT, big data e inteligência artificial)
- ☐ Incentivos econômicos e financeiros (apoio governamental e financiamentos para a implementação de soluções sustentáveis)
- ☐ Pressão regulatória e responsabilidade social corporativa (demandas de conformidade com regulamentações ambientais e sociais)
- ☐ Alinhamento com políticas públicas e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (estratégias governamentais e metas internacionais que incentivam práticas circulares)
- ☐ Colaboração e parcerias estratégicas (colaboração com fornecedores, outras instituições de saúde e empresas de tecnologia para implementar a Economia Circular)
- ☐ Desenvolvimento de novas tecnologias (avançar na criação de soluções específicas para reaproveitamento e remanufatura de dispositivos médicos)
- ☐ Outros: _____

15. O hospital utiliza alguma tecnologia para apoiar a gestão de DMDs?

- ☐ Sim, há um sistema digital de rastreamento e gestão desses dispositivos
- ☐ Sim, mas de forma manual e descentralizada
- ☐ Não há tecnologia aplicada na gestão desses dispositivos
- ☐ Não sei informar

16. Se sim, para quais Dispositivos Médicos Duráveis essas tecnologias são aplicadas? (marque todas as opções aplicáveis)

- ☐ Equipamentos de monitoramento
- ☐ Equipamentos de diagnóstico
- ☐ Dispositivos implantáveis
- ☐ Instrumentos cirúrgicos reutilizáveis
- ☐ Equipamentos de suporte respiratório
- ☐ Equipamentos de terapia
- ☐ Outros: _____

Seção 4: Percepção sobre Práticas de Economia Circular

17. Quais Dispositivos Médicos Duráveis têm maior potencial para integração à Economia Circular no hospital? *(marque todas as opções aplicáveis)*

- ☐ Equipamentos de monitoramento
- ☐ Equipamentos de diagnóstico
- ☐ Dispositivos implantáveis
- ☐ Instrumentos cirúrgicos reutilizáveis
- ☐ Equipamentos de suporte respiratório
- ☐ Equipamentos de terapia
- ☐ Outros: _____

18. Quais ações poderiam facilitar a adoção de práticas de Economia Circular no hospital? *(marque todas as opções aplicáveis)*

- ☐ Capacitação de gestores e profissionais sobre Economia Circular
- ☐ Maior apoio financeiro/governamental para reuso/remanufatura
- ☐ Desenvolvimento de novas tecnologias para rastreabilidade de dispositivos
- ☐ Atualização das regulamentações sanitárias e ambientais
- ☐ Parcerias com empresas especializadas em remanufatura/reprocessamento
- ☐ Outros: _____

19. Você considera viável a implementação de práticas de Economia Circular no hospital?

- ☐ Sim
- ☐ Não
- ☐ Talvez

Justifique sua resposta: _____

Seção 5: Tecnologias da Indústria 4.0 na Gestão de Dispositivos Médicos e Economia Circular

20. O hospital atualmente utiliza alguma tecnologia da Indústria 4.0 para apoiar a gestão de Dispositivos Médicos Duráveis (DMDs)?

- ☐ Sim

- ☐ Não
- ☐ Não sei informar

21. Se SIM, quais tecnologias são utilizadas? (Marque todas as aplicáveis)

- ☐ Internet das Coisas (IoT)
- ☐ Big Data e Analytics
- ☐ Inteligência Artificial (IA)
- ☐ Machine Learning
- ☐ Blockchain
- ☐ Computação em Nuvem
- ☐ Robôs autônomos ou colaborativos (cobots)
- ☐ Sistemas Ciberfísicos (CPS)
- ☐ Sensores e RFID
- ☐ Gêmeos Digitais (Digital Twin)
- ☐ Impressão 3D
- ☐ Realidade Aumentada ou Realidade Virtual (RA/RV)
- ☐ Sistemas de apoio à decisão com dashboards em tempo real
- ☐ Não utiliza tecnologias da i4.0
- ☐ Outros: _____

22. Você conhece alguma tecnologia da Indústria 4.0 com potencial de aplicação na gestão de DMDs ou na promoção da Economia Circular em hospitais, mesmo que ainda não esteja sendo utilizada no seu local de trabalho?

- ☐ Sim
- ☐ Não

23. Se SIM, quais tecnologias você conhece e acredita que poderiam ser aplicadas? (marque todas que considerar relevantes)

- ☐ Internet das Coisas (IoT)
- ☐ Big Data e Analytics
- ☐ Inteligência Artificial (IA)
- ☐ Machine Learning
- ☐ Blockchain
- ☐ Computação em Nuvem
- ☐ Robôs autônomos ou colaborativos (cobots)
- ☐ Sistemas Ciberfísicos (CPS)
- ☐ Sensores e RFID
- ☐ Gêmeos Digitais (Digital Twin)

- ☐ Impressão 3D
- ☐ Realidade Aumentada ou Realidade Virtual (RA/RV)
- ☐ Sistemas de apoio à decisão com dashboards em tempo real
- ☐ Não utiliza tecnologias da i4.0
- ☐ Outros: _____

24. Das tecnologias citadas, quais você acredita que trariam maior benefício à gestão dos Dispositivos Médicos Duráveis no hospital? (Marque até 3 opções)

- ☐ Internet das Coisas (IoT)
- ☐ Big Data e Analytics
- ☐ Inteligência Artificial (IA)
- ☐ Machine Learning
- ☐ Blockchain
- ☐ Computação em Nuvem
- ☐ Robôs autônomos ou colaborativos (cobots)
- ☐ Sistemas Ciberfísicos (CPS)
- ☐ Sensores e RFID
- ☐ Gêmeos Digitais (Digital Twin)
- ☐ Impressão 3D
- ☐ Realidade Aumentada ou Realidade Virtual (RA/RV)
- ☐ Sistemas de apoio à decisão com dashboards em tempo real
- ☐ Não utiliza tecnologias da i4.0
- ☐ Outros: _____

25. Quais barreiras você enxerga para a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 no hospital? (marque todas as que considerar relevantes)

- ☐ Falta de infraestrutura tecnológica adequada
- ☐ Resistência à inovação por parte da equipe
- ☐ Falta de conhecimento técnico especializado
- ☐ Custos elevados de implementação
- ☐ Ausência de integração entre sistemas
- ☐ Limitações regulatórias
- ☐ Outro(s): _____

26. Você acredita que o uso de tecnologias da Indústria 4.0 pode contribuir para uma gestão mais eficiente, sustentável e segura dos Dispositivos Médicos Duráveis?

- ☐ Sim
- ☐ Não
- ☐ Talvez

Justifique sua resposta: _____

27. O hospital demonstra interesse em investir em tecnologias para melhorar o gerenciamento e a rastreabilidade de seus dispositivos médicos?

- ☐ Sim, já existem projetos em andamento
- ☐ Sim, há intenção, mas ainda sem ações concretas
- ☐ Não há interesse ou planejamento nesse sentido
- ☐ Não sei informar

APÊNDICE C – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido Questionário de Análise de Barreiras e Fatores Impulsionadores (Método DEMATEL)

Título da Pesquisa: Gestão Sustentável De Dispositivos Médicos: Framework Baseado Em Indústria 4.0 E Práticas Circulares

Termo de Consentimento

Prezado(a) participante,

Você está sendo convidado(a) a participar da pesquisa que tem como objetivo identificar e analisar as barreiras e fatores impulsionadores para a implementação da Economia Circular na gestão de dispositivos médicos duráveis em hospitais públicos brasileiros. A análise será realizada por meio do método DEMATEL, permitindo mapear as relações de influência entre esses fatores.

1. Participação na Pesquisa e Garantia de Liberdade para Recusa ou Desistência da Participação:

Sua participação consistirá no preenchimento de um questionário eletrônico, no qual será solicitado que você avalie o grau de influência entre diferentes barreiras e impulsionadores previamente identificados na literatura. O preenchimento é voluntário, podendo ser interrompido a qualquer momento, sem qualquer prejuízo ou necessidade de justificativa.

2. Riscos e Desconfortos:

A pesquisa envolve risco mínimo, restrito a eventual desconforto associado ao preenchimento do questionário. Para minimizar qualquer desconforto, você poderá desistir livremente a qualquer momento.

3. Benefícios:

Os resultados da pesquisa poderão contribuir para o desenvolvimento de estratégias de gestão mais sustentáveis na saúde pública, além de gerar conhecimento acadêmico relevante sobre práticas circulares aplicáveis ao setor hospitalar.

4. Providências para Reduzir Efeitos Adversos:

Em caso de desconforto, incômodo ou dúvidas durante a participação, você poderá encerrar sua participação livremente. Todas as respostas serão mantidas sob sigilo, e não há perguntas de cunho pessoal ou que envolvam julgamento individual. Os dados serão utilizados exclusivamente para análise acadêmica.

5. Formas de Acompanhamento e Assistência ao Participante:

Caso você necessite de esclarecimentos, apoio emocional ou encaminhamento institucional durante ou após sua participação na pesquisa, poderá contatar a pesquisadora responsável, que irá direcioná-lo(a) ao serviço de apoio psicossocial do hospital/instituição parceira, conforme a

necessidade. Você poderá contatar a pesquisadora responsável pelos meios:

Pesquisadora Responsável: Eliana de Jesus Lopes

Endereço: Rua ver. João Passos Dias, 244, Bairro Belchior, Sobral-CE. CEP: 62.053-780. Telefone: 84 99403-2523. Horário de atendimento: 08h às 22h.

6. Indenização e Reparação de Danos:

Esta pesquisa apresenta risco mínimo, porém, conforme estabelece a Resolução nº 466/2012 do Conselho Nacional de Saúde, caso ocorra algum dano decorrente da sua participação, é garantido ao(à) participante o direito à reparação e à devida indenização, conforme a legislação vigente.

7. Confidencialidade e Privacidade dos Dados:

Todas as informações fornecidas serão tratadas com sigilo absoluto e anonimizadas, respeitando a legislação vigente de proteção de dados pessoais. Os dados coletados serão utilizados apenas para fins acadêmicos e científicos, de forma agrupada, não sendo possível identificar os participantes

8. Esclarecimentos:

Você poderá salvar ou imprimir este Termo de Consentimento Livre e Esclarecido para seu próprio registro, caso deseje. Caso queira uma via assinada pela pesquisadora responsável, poderá solicitá-la a qualquer momento. Se desejar receber uma cópia das suas respostas no seu e-mail, poderá confirmar ao final do questionário.

Se restarem dúvidas, você poderá a qualquer momento entrar em contato com a pesquisadora responsável ou com o Comitê de Ética em Pesquisa do Centro Universitário Inta:

Localizado na Rua Coronel Antônio Rodrigues Magalhães, 359, Bairro Dom Expedito Lopes, Sobral – CE, CEP: 62050-100, Telefax: (88) 3614-3232, ou com o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSC, no Campus da UFSC, na Carvoeira, Florianópolis – SC, CEP: 88040-535, Telefone: (48) 3721-7003.

9. Ressarcimento de Despesas:

Não haverá qualquer compensação financeira pela participação. Entretanto, caso haja despesas comprovadas relacionadas diretamente à sua participação na pesquisa, estas poderão ser ressarcidas mediante apresentação de comprovantes e análise da coordenação do projeto.

10. Garantia de Indenização por Danos

Ainda que a pesquisa envolva risco mínimo, caso ocorra algum dano decorrente da participação, você terá direito à reparação e à devida indenização, conforme previsto na legislação brasileira e na Resolução CNS nº 466/2012.

11. Consentimento:

Ao clicar em "Sim" ao final deste formulário, você declara que:

- Leu e compreendeu as informações acima,
 - Teve oportunidade de esclarecer dúvidas,
 - Está ciente dos objetivos, riscos e benefícios da pesquisa,
 - Concorda voluntariamente em participar.
-

Você concorda em participar desta pesquisa nos termos descritos acima?

- ☐ Sim, estou ciente e aceito participar da pesquisa.

APÊNDICE D – Questionário de Análise de Barreiras e Fatores Impulsionadores (Método DEMATEL)

Link: <https://forms.gle/PauWnBVVpJEWoLWD9>

Dados de Perfil do Respondente

(Preenchimento opcional)

Cargo/Função: _____

Área de Atuação:

- ☐ Engenheiro Clínico
- ☐ Gestor(a) hospitalar (Compras)
- ☐ Gestor(a) hospitalar (Logística)
- ☐ Gestor(a) hospitalar (Manutenção)
- ☐ Gestor(a) hospitalar (Gestão de resíduos)
- ☐ Diretor(a) hospitalar
- ☐ Especialista em políticas públicas de saúde
- ☐ Consultor(a) em sustentabilidade hospitalar e economia circular
- ☐ Engenheiro(a) ambiental e sanitarista atuante na gestão de resíduo hospitalar
- ☐ Pesquisador(a) ou acadêmico(a) em economia circular e sustentabilidade hospitalar
- ☐ Profissional de logística hospitalar
- ☐ Diretor(a) de sustentabilidade ou compliance em hospitais
- ☐ Outra: _____

Tempo de Experiência na Área:

- ☐ Menos de 1 ano
- ☐ 1 ano a 3 anos
- ☐ 3 anos a 5 anos
- ☐ 5 a 10 anos
- ☐ Mais de 10 anos

Estado (UF): _____

Instruções ao Respondente

Prezado(a) participante,

Utilize a escala a seguir para avaliar o grau de influência entre cada par de fatores:

Valor Significado

- 0 Nenhuma influência
- 1 Influência baixa
- 2 Influência moderada
- 3 Influência alta
- 4 Influência muito alta

Por favor, responda com base em sua experiência e percepção prática.

Barreiras (B)

- B1 – Altos Custos Iniciais
- B2 – Complexidade Regulatória
- B3 – Desafios na Gestão de Resíduos Perigosos
- B4 – Dificuldade na Medição de Impactos
- B5 – Falta de Conhecimento e Capacitação
- B6 – Falta de Infraestrutura Tecnológica
- B7 – Limitações na Cadeia de Suprimentos
- B8 – Resistência Cultural e Organizacional

Impulsionadores (I)

- I1 – Alinhamento com ODS e Políticas Públicas
- I2 – Colaboração e Parcerias
- I3 – Demandas do Mercado e da Sociedade
- I4 – Eficiência de Recursos
- I5 – Incentivos Econômicos e Financeiros
- I6 – Inovação Tecnológica
- I7 – Pressão Regulatória Favorável
- I8 – Adoção de Práticas de Economia Circular no Setor Hospitalar

Parte 1 – Relação entre Barreiras

Avalie o quanto B1 – Altos Custos Iniciais influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
B2 – Complexidade Regulatória					
B3 – Desafios na Gestão de Resíduos Perigosos					
B4 – Dificuldade na Medição de Impactos					
B5 – Falta de Conhecimento e Capacitação					
B6 – Falta de Infraestrutura Tecnológica					
B7 – Limitações na Cadeia de Suprimentos					
B8 – Resistência Cultural e Organizacional					

Avalie o quanto B2 – Complexidade Regulatória influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
B1 – Altos Custos Iniciais					
B3 – Desafios na Gestão de Resíduos Perigosos					
B4 – Dificuldade na Medição de Impactos					
B5 – Falta de Conhecimento e Capacitação					
B6 – Falta de Infraestrutura Tecnológica					
B7 – Limitações na Cadeia de Suprimentos					
B8 – Resistência Cultural e Organizacional					

Avalie o quanto B3 – Desafios na Gestão de Resíduos Perigosos influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
B1 – Altos Custos Iniciais					
B2 – Complexidade Regulatória					
B4 – Dificuldade na Medição de Impactos					
B5 – Falta de Conhecimento e Capacitação					
B6 – Falta de Infraestrutura Tecnológica					
B7 – Limitações na Cadeia de Suprimentos					
B8 – Resistência Cultural e Organizacional					

Avalie o quanto B4 – Dificuldade na Medição de Impactos influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
B1 – Altos Custos Iniciais					
B2 – Complexidade Regulatória					
B3 – Desafios na Gestão de Resíduos Perigosos					
B5 – Falta de Conhecimento e Capacitação					
B6 – Falta de Infraestrutura Tecnológica					
B7 – Limitações na Cadeia de Suprimentos					
B8 – Resistência Cultural e Organizacional					

Avalie o quanto B5 – Falta de Conhecimento e Capacitação influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
B1 – Altos Custos Iniciais					
B2 – Complexidade Regulatória					
B3 – Desafios na Gestão de Resíduos Perigosos					
B4 – Dificuldade na Medição de Impactos					
B6 – Falta de Infraestrutura Tecnológica					
B7 – Limitações na Cadeia de Suprimentos					
B8 – Resistência Cultural e Organizacional					

Avalie o quanto B6 – Falta de Infraestrutura Tecnológica influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
B1 – Altos Custos Iniciais					
B2 – Complexidade Regulatória					
B3 – Desafios na Gestão de Resíduos Perigosos					
B4 – Dificuldade na Medição de Impactos					
B5 – Falta de Conhecimento e Capacitação					
B7 – Limitações na Cadeia de Suprimentos					
B8 – Resistência Cultural e Organizacional					

Avalie o quanto B7 – Limitações na Cadeia de Suprimentos influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
B1 – Altos Custos Iniciais					
B2 – Complexidade Regulatória					
B3 – Desafios na Gestão de Resíduos Perigosos					
B4 – Dificuldade na Medição de Impactos					
B5 – Falta de Conhecimento e Capacitação					
B6 – Falta de Infraestrutura Tecnológica					
B8 – Resistência Cultural e Organizacional					

Avalie o quanto B8 – Resistência Cultural e Organizacional influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
B1 – Altos Custos Iniciais					
B2 – Complexidade Regulatória					
B3 – Desafios na Gestão de Resíduos Perigosos					
B4 – Dificuldade na Medição de Impactos					
B5 – Falta de Conhecimento e Capacitação					
B6 – Falta de Infraestrutura Tecnológica					
B7 – Limitações na Cadeia de Suprimentos					

Parte 2 – Relação entre Impulsionadores e Impulsionadores

Avalie o quanto I1 – Alinhamento com ODS e Políticas Públicas influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
I2 – Colaboração e Parcerias					
I3 – Demandas do Mercado e da Sociedade					
I4 – Eficiência de Recursos					
I5 – Incentivos Econômicos e Financeiros					
I6 – Inovação Tecnológica					
I7 – Pressão Regulatória Favorável					
I8 – Adoção de Práticas de Economia Circular no Setor Hospitalar					

Avalie o quanto I2 – Colaboração e Parcerias influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
I1 – Alinhamento com ODS e Políticas Públicas					
I3 – Demandas do Mercado e da Sociedade					
I4 – Eficiência de Recursos					
I5 – Incentivos Econômicos e Financeiros					
I6 – Inovação Tecnológica					
I7 – Pressão Regulatória Favorável					
I8 – Adoção de Práticas de Economia Circular no Setor Hospitalar					

Avalie o quanto I3 – Demandas do Mercado e da Sociedade influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
I1 – Alinhamento com ODS e Políticas Públicas					
I2 – Colaboração e Parcerias					
I4 – Eficiência de Recursos					
I5 – Incentivos Econômicos e Financeiros					
I6 – Inovação Tecnológica					
I7 – Pressão Regulatória Favorável					
I8 – Adoção de Práticas de Economia Circular no Setor Hospitalar					

Avalie o quanto I4 – Eficiência de Recursos influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
I1 – Alinhamento com ODS e Políticas Públicas					
I2 – Colaboração e Parcerias					
I3 – Demandas do Mercado e da Sociedade					
I5 – Incentivos Econômicos e Financeiros					
I6 – Inovação Tecnológica					
I7 – Pressão Regulatória Favorável					
I8 – Adoção de Práticas de Economia Circular no Setor Hospitalar					

Avalie o quanto I5 – Incentivos Econômicos e Financeiros influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
I1 – Alinhamento com ODS e Políticas Públicas					
I2 – Colaboração e Parcerias					
I3 – Demandas do Mercado e da Sociedade					
I4 – Eficiência de Recursos					
I6 – Inovação Tecnológica					
I7 – Pressão Regulatória Favorável					
I8 – Adoção de Práticas de Economia Circular no Setor Hospitalar					

Avalie o quanto I6 – Inovação Tecnológica influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
I1 – Alinhamento com ODS e Políticas Públicas					
I2 – Colaboração e Parcerias					
I3 – Demandas do Mercado e da Sociedade					
I4 – Eficiência de Recursos					
I5 – Incentivos Econômicos e Financeiros					
I7 – Pressão Regulatória Favorável					
I8 – Adoção de Práticas de Economia Circular no Setor Hospitalar					

Avalie o quanto I7 – Pressão Regulatória Favorável influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
I1 – Alinhamento com ODS e Políticas Públicas					
I2 – Colaboração e Parcerias					
I3 – Demandas do Mercado e da Sociedade					
I4 – Eficiência de Recursos					
I5 – Incentivos Econômicos e Financeiros					
I6 – Inovação Tecnológica					
I8 – Adoção de Práticas de Economia Circular no Setor Hospitalar					

Avalie o quanto I8 – Adoção de Práticas de Economia Circular no Setor Hospitalar influencia em:

Barreira	0	1	2	3	4
I1 – Alinhamento com ODS e Políticas Públicas					
I2 – Colaboração e Parcerias					
I3 – Demandas do Mercado e da Sociedade					
I4 – Eficiência de Recursos					
I5 – Incentivos Econômicos e Financeiros					
I6 – Inovação Tecnológica					
I7 – Pressão Regulatória Favorável					

APÊNDICE E – Mensagem de Convite aos Participantes (Questionário – DEMATEL)

Assunto: Convite para participar de pesquisa sobre Economia Circular em hospitais públicos

Prezada(o) participante,

Você está sendo convidado(a) a participar da pesquisa intitulada: “Gestão Sustentável De Dispositivos Médicos: Framework Baseado Em Indústria 4.0 E Práticas Circulares”, realizada pelo Centro Universitário Inta em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

O objetivo desta etapa é identificar os principais fatores que impulsionam e dificultam a adoção de práticas de Economia Circular no ambiente hospitalar. Para isso, utilizaremos o método DEMATEL, por meio de um questionário eletrônico, a ser respondido por profissionais com experiência na área da saúde, sustentabilidade, gestão hospitalar ou políticas públicas.

 Tempo estimado de resposta: aproximadamente 20 minutos

Sua participação é voluntária e essencial para a construção de soluções estratégicas voltadas à sustentabilidade dos hospitais públicos, promovendo o uso mais eficiente de recursos e a redução de impactos ambientais.

Agradecemos imensamente sua colaboração e estamos à disposição para eventuais dúvidas.

Clique no link a seguir para ser direcionado ao questionário:

<https://forms.gle/PAuWnBVVpJEWoLWD9>

APÊNDICE F – Termo de Consentimento Livre e Esclarecido Questionário para identificação das Tecnologias da I4.0 mais relevante no contexto de Gestão Sustentável em Hospitais (BWM)

Título da Pesquisa: Gestão Sustentável De Dispositivos Médicos: Framework Baseado Em Indústria 4.0 E Práticas Circulares

Termo de Consentimento

Prezado(a) participante,

Você está sendo convidado(a) a participar da pesquisa que tem como objetivo identificar, entre tecnologias emergentes da Indústria 4.0, aquelas que apresentam maior relevância para apoiar práticas de Economia Circular na gestão de dispositivos médicos duráveis em hospitais públicos brasileiros, promovendo a sustentabilidade no setor hospitalar.

Participação na Pesquisa e Garantia de Liberdade para Recusa ou Desistência da Participação:

Sua participação consistirá no preenchimento de um questionário eletrônico, no qual será solicitado que você avalie tecnologias digitais segundo critérios de relevância previamente definidos, utilizando o método Best-Worst Method (BWM). O preenchimento é voluntário, podendo ser interrompido a qualquer momento, sem qualquer prejuízo ou necessidade de justificativa.

2. Riscos e Desconfortos:

A pesquisa envolve risco mínimo, restrito a eventual desconforto associado ao preenchimento do questionário. Para minimizar qualquer desconforto, você poderá desistir livremente a qualquer momento.

3. Benefícios:

Os resultados desta pesquisa poderão contribuir para o desenvolvimento de estratégias de gestão mais sustentáveis em hospitais públicos, bem como para a geração de conhecimento acadêmico relevante na área de sustentabilidade e inovação tecnológica em saúde.

4. Providências para Reduzir Efeitos Adversos:

Em caso de desconforto, incômodo ou dúvidas durante a participação, você poderá encerrar sua participação livremente. Todas as respostas serão mantidas sob sigilo, e não há perguntas de cunho pessoal ou que envolvam julgamento individual. Os dados serão utilizados exclusivamente para análise acadêmica.

5. Formas de Acompanhamento e Assistência ao Participante:

Caso você necessite de esclarecimentos, apoio emocional ou encaminhamento institucional durante ou após sua participação na pesquisa, poderá contatar a pesquisadora responsável, que

irá direcioná-lo(a) ao serviço de apoio psicossocial do hospital/instituição parceira, conforme a necessidade. Você poderá contatar a pesquisadora responsável pelos meios:

Pesquisadora Responsável: Eliana de Jesus Lopes

Endereço: Rua ver. João Passos Dias, 244, Bairro Belchior, Sobral-CE. CEP: 62.053-780. Telefone: 84 99403-2523. Horário de atendimento: 08h às 22h.

6. Indenização e Reparação de Danos:

Esta pesquisa apresenta risco mínimo, porém, conforme estabelece a Resolução nº 466/2012 do Conselho Nacional de Saúde, caso ocorra algum dano decorrente da sua participação, é garantido ao(à) participante o direito à reparação e à devida indenização, conforme a legislação vigente.

7. Confidencialidade e Privacidade dos Dados:

Todas as informações fornecidas serão tratadas com sigilo absoluto e anonimizadas, respeitando a legislação vigente de proteção de dados pessoais. Os dados coletados serão utilizados apenas para fins acadêmicos e científicos, de forma agrupada, não sendo possível identificar os participantes

8. Esclarecimentos:

Você poderá salvar ou imprimir este Termo de Consentimento Livre e Esclarecido para seu próprio registro, caso deseje. Caso queira uma via assinada pela pesquisadora responsável, poderá solicitá-la a qualquer momento. Se desejar receber uma cópia das suas respostas no seu e-mail, poderá confirmar ao final do questionário.

Se restarem dúvidas, você poderá a qualquer momento entrar em contato com a pesquisadora responsável ou com o Comitê de Ética em Pesquisa do Centro Universitário Inta:

Localizado na Rua Coronel Antônio Rodrigues Magalhães, 359, Bairro Dom Expedito Lopes, Sobral – CE, CEP: 62050-100, Telefax: (88) 3614-3232, ou com o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSC, no Campus da UFSC, na Carvoeira, Florianópolis – SC, CEP: 88040-535, Telefone: (48) 3721-7003.

9. Ressarcimento de Despesas:

Não haverá qualquer compensação financeira pela participação. Entretanto, caso haja despesas comprovadas relacionadas diretamente à sua participação na pesquisa, estas poderão ser ressarcidas mediante apresentação de comprovantes e análise da coordenação do projeto.

10. Garantia de Indenização por Danos

Ainda que a pesquisa envolva risco mínimo, caso ocorra algum dano decorrente da participação, você terá direito à reparação e à devida indenização, conforme previsto na legislação brasileira e na Resolução CNS nº 466/2012.

11. Consentimento:

Ao clicar em "Sim" ao final deste formulário, você declara que:

- Leu e compreendeu as informações acima,
- Teve oportunidade de esclarecer dúvidas,
- Está ciente dos objetivos, riscos e benefícios da pesquisa,
- Concorda voluntariamente em participar.

Você concorda em participar desta pesquisa nos termos descritos acima?

- ☐ Sim, estou ciente e aceito participar da pesquisa.

APÊNDICE G – Questionário para identificação das Tecnologias da I4.0 mais relevante no contexto de Gestão Sustentável em Hospitais (BWM)

Link: <https://forms.gle/CjvBlwiut43MR5kGA>

Dados de Perfil do Respondente

(Preenchimento opcional)

Cargo/Função: _____

Área de Atuação:

- ☐ Engenheiro Clínico
- ☐ Gestor(a) hospitalar (Compras)
- ☐ Gestor(a) hospitalar (Logística)
- ☐ Gestor(a) hospitalar (Manutenção)
- ☐ Gestor(a) hospitalar (Gestão de resíduos)
- ☐ Diretor(a) hospitalar
- ☐ Especialista em políticas públicas de saúde
- ☐ Consultor(a) em sustentabilidade hospitalar e economia circular
- ☐ Engenheiro(a) ambiental e sanitarista atuante na gestão de resíduo hospitalar
- ☐ Pesquisador(a) ou acadêmico(a) em economia circular e sustentabilidade hospitalar
- ☐ Profissional de logística hospitalar
- ☐ Diretor(a) de sustentabilidade ou compliance em hospitais
- ☐ Outra: _____

Tempo de Experiência na Área:

- ☐ Menos de 1 ano
- ☐ 1 ano a 3 anos
- ☐ 3 anos a 5 anos
- ☐ 5 a 10 anos
- ☐ Mais de 10 anos

Estado (UF): _____

O questionário está estruturado em duas partes:

♦ **PARTE 1: Priorização dos critérios de avaliação (Best-Worst Method – BWM)**

Você indicará o critério mais importante (Best) e o menos importante (Worst) para a escolha de tecnologias, e comparará os demais em relação a esses dois.

♦ **PARTE 2: Priorização das tecnologias da Indústria 4.0 para cada critério**

Você repetirá o processo de seleção do melhor e pior para cada critério, comparando as tecnologias dentro de cada contexto.

Valor Significado

1 Igual importância

9 Extremamente mais importante

PARTE 1 – PRIORIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS (BWM)

Qual dos critérios você considera o MAIS importante (Melhor)?

(Resposta única)

()	Interoperabilidade e Integração
()	Segurança e Privacidade de Dados
()	Eficiência de Recursos e Redução de Custos
()	Eficiência Operacional
()	Cuidado Centrado no Paciente
()	Transformação Organizacional e Capacitação
()	Sustentabilidade Ambiental
()	Viabilidade de Implementação
()	Adaptabilidade e Escalabilidade em Hospitais

Qual dos critérios você considera o MENOS importante (Worst)?

(Resposta única)

()	Interoperabilidade e Integração

Avalie o quanto cada um dos demais critérios é mais importante do que o “menos importante” escolhido:

Comparação: O quanto o Critério a seguir é mais importante que o “menos importante” escolhido:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Interoperabilidade e Integração	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Segurança e Privacidade de Dados	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Eficiência de Recursos e Redução de Custos	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Eficiência Operacional	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Cuidado Centrado no Paciente	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Transformação Organizacional e Capacitação	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Sustentabilidade Ambiental	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Viabilidade de Implementação	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Adaptabilidade e Escalabilidade em Hospitais	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

PARTE 2 – PRIORIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS PARA CADA CRITÉRIO

Critério C1: Interoperabilidade e Integração

Qual das tecnologias você considera a MAIS relevante para promover interoperabilidade e integração?

(Escolha única)

- () Internet das Coisas (IoT)
- () Big Data & Analytics
- () Inteligência Artificial (IA)
- () Computação em Nuvem (Cloud Computing)
- () Impressão 3D (Manufatura Aditiva)
- () Sistemas Ciber-Físicos (CPS)
- () Blockchain
- () Robótica Colaborativa
- () Drones

Comparação: O quanto o Critério é mais importante que o seu Worst:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Aprendizado de Máquina (Machine Learning)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Digital Twins	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Smart Sensors	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

C2 – Segurança e Privacidade de Dados

Qual das tecnologias você considera a MAIS relevante para promover Segurança e Privacidade de Dados?

(Escolha única)

- ☐ Internet das Coisas (IoT)
- ☐ Big Data & Analytics
- ☐ Inteligência Artificial (IA)
- ☐ Computação em Nuvem (Cloud Computing)
- ☐ Impressão 3D (Manufatura Aditiva)
- ☐ Sistemas Ciber-Físicos (CPS)
- ☐ Blockchain
- ☐ Robótica Colaborativa
- ☐ Drones
- ☐ Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)
- ☐ Aprendizado de Máquina (Machine Learning)
- ☐ Digital Twins
- ☐ Smart Sensors

Qual das tecnologias você considera a MENOS relevante para esse critério?

(Escolha única)

- ☐ Internet das Coisas (IoT)
- ☐ Big Data & Analytics

Comparação: O quanto o Critério Melhor é mais importante que:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Smart Sensors	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Avalie o quanto cada uma das demais tecnologias é mais relevante que a tecnologia “Worst”:

Comparação: O quanto o Critério é mais importante que o seu Worst:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Internet das Coisas (IoT)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Big Data & Analytics	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Inteligência Artificial (IA)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Computação em Nuvem (Cloud Computing)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Impressão 3D (Manufatura Aditiva)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Sistemas Ciber-Físicos (CPS)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Blockchain	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Robótica Colaborativa	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Drones	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Aprendizado de Máquina (Machine Learning)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Digital Twins	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Smart Sensors	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

C3 – Eficiência de Recursos e Redução de Custos

Qual das tecnologias você considera a MAIS relevante para promover Eficiência de Recursos e Redução de Custos?

(Escolha única)

() Internet das Coisas (IoT)

() Big Data & Analytics

- ☐ Inteligência Artificial (IA)
- ☐ Computação em Nuvem (Cloud Computing)
- ☐ Impressão 3D (Manufatura Aditiva)
- ☐ Sistemas Ciber-Físicos (CPS)
- ☐ Blockchain
- ☐ Robótica Colaborativa
- ☐ Drones
- ☐ Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)
- ☐ Aprendizado de Máquina (Machine Learning)
- ☐ Digital Twins
- ☐ Smart Sensors

Qual das tecnologias você considera a MENOS relevante para esse critério?

(Escolha única)

- ☐ Internet das Coisas (IoT)
- ☐ Big Data & Analytics
- ☐ Inteligência Artificial (IA)
- ☐ Computação em Nuvem (Cloud Computing)
- ☐ Impressão 3D (Manufatura Aditiva)
- ☐ Sistemas Ciber-Físicos (CPS)
- ☐ Blockchain
- ☐ Robótica Colaborativa
- ☐ Drones
- ☐ Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)
- ☐ Aprendizado de Máquina (Machine Learning)
- ☐ Digital Twins
- ☐ Smart Sensors

Comparação: O quanto o Critério é mais importante que o seu Worst:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Sistemas Ciber-Físicos (CPS)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Blockchain	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Robótica Colaborativa	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Drones	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Aprendizado de Máquina (Machine Learning)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Digital Twins	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Smart Sensors	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

C4 – Eficiência Operacional

Qual das tecnologias você considera a MAIS relevante para promover Eficiência Operacional?

(Escolha única)

- () Internet das Coisas (IoT)
- () Big Data & Analytics
- () Inteligência Artificial (IA)
- () Computação em Nuvem (Cloud Computing)
- () Impressão 3D (Manufatura Aditiva)
- () Sistemas Ciber-Físicos (CPS)
- () Blockchain
- () Robótica Colaborativa
- () Drones
- () Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)
- () Aprendizado de Máquina (Machine Learning)
- () Digital Twins

C5 – Cuidado Centrado no Paciente

Qual das tecnologias você considera a MAIS relevante para promover Cuidado Centrado no Paciente?

(Escolha única)

- ☐ Internet das Coisas (IoT)
- ☐ Big Data & Analytics
- ☐ Inteligência Artificial (IA)
- ☐ Computação em Nuvem (Cloud Computing)
- ☐ Impressão 3D (Manufatura Aditiva)
- ☐ Sistemas Ciber-Físicos (CPS)
- ☐ Blockchain
- ☐ Robótica Colaborativa
- ☐ Drones
- ☐ Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)
- ☐ Aprendizado de Máquina (Machine Learning)
- ☐ Digital Twins
- ☐ Smart Sensors

Qual das tecnologias você considera a MENOS relevante para esse critério?

(Escolha única)

- ☐ Internet das Coisas (IoT)
- ☐ Big Data & Analytics
- ☐ Inteligência Artificial (IA)
- ☐ Computação em Nuvem (Cloud Computing)
- ☐ Impressão 3D (Manufatura Aditiva)
- ☐ Sistemas Ciber-Físicos (CPS)

- () Blockchain
- () Robótica Colaborativa
- () Drones
- () Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)
- () Aprendizado de Máquina (Machine Learning)
- () Digital Twins
- () Smart Sensors

Avalie o quanto a tecnologia “Melhor” é mais relevante que as demais (escala 1 a 9):

Comparação: O quanto o Critério Melhor é mais importante que:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Internet das Coisas (IoT)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Big Data & Analytics	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Inteligência Artificial (IA)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Computação em Nuvem (Cloud Computing)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Impressão 3D (Manufatura Aditiva)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Sistemas Ciber-Físicos (CPS)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Blockchain	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Robótica Colaborativa	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Drones	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Aprendizado de Máquina (Machine Learning)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Digital Twins	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Smart Sensors	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Avalie o quanto cada uma das demais tecnologias é mais relevante que a tecnologia “Worst”:

Comparação: O quanto o Critério é mais importante que o seu Worst:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Internet das Coisas (IoT)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Big Data & Analytics	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Inteligência Artificial (IA)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Computação em Nuvem (Cloud Computing)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Impressão 3D (Manufatura Aditiva)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Sistemas Ciber-Físicos (CPS)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Blockchain	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Robótica Colaborativa	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Drones	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Aprendizado de Máquina (Machine Learning)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Digital Twins	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Smart Sensors	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

C6 – Transformação Organizacional e Capacitação

Qual das tecnologias você considera a MAIS relevante para promover Transformação Organizacional e Capacitação?

(Escolha única)

- () Internet das Coisas (IoT)
- () Big Data & Analytics
- () Inteligência Artificial (IA)
- () Computação em Nuvem (Cloud Computing)
- () Impressão 3D (Manufatura Aditiva)
- () Sistemas Ciber-Físicos (CPS)
- () Blockchain

Comparação: O quanto o Critério é mais importante que o seu Worst:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Drones	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Aprendizado de Máquina (Machine Learning)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Digital Twins	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Smart Sensors	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

C7 – Sustentabilidade Ambiental

Qual das tecnologias você considera a MAIS relevante para promover Sustentabilidade Ambiental?

(Escolha única)

- ☐ Internet das Coisas (IoT)
- ☐ Big Data & Analytics
- ☐ Inteligência Artificial (IA)
- ☐ Computação em Nuvem (Cloud Computing)
- ☐ Impressão 3D (Manufatura Aditiva)
- ☐ Sistemas Ciber-Físicos (CPS)
- ☐ Blockchain
- ☐ Robótica Colaborativa
- ☐ Drones
- ☐ Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)
- ☐ Aprendizado de Máquina (Machine Learning)
- ☐ Digital Twins
- ☐ Smart Sensors

Qual das tecnologias você considera a MENOS relevante para esse critério?

(Escolha única)

Comparação: O quanto o Critério Melhor é mais importante que:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Aprendizado de Máquina (Machine Learning)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Digital Twins	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Smart Sensors	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Avalie o quanto cada uma das demais tecnologias é mais relevante que a tecnologia “Worst”:

Comparação: O quanto o Critério é mais importante que o seu Worst:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Internet das Coisas (IoT)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Big Data & Analytics	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Inteligência Artificial (IA)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Computação em Nuvem (Cloud Computing)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Impressão 3D (Manufatura Aditiva)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Sistemas Ciber-Físicos (CPS)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Blockchain	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Robótica Colaborativa	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Drones	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Aprendizado de Máquina (Machine Learning)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Digital Twins	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Smart Sensors	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

C8 – Viabilidade de Implementação

Qual das tecnologias você considera a MAIS relevante para promover Viabilidade de Implementação?

(Escolha única)

- () Internet das Coisas (IoT)
- () Big Data & Analytics
- () Inteligência Artificial (IA)
- () Computação em Nuvem (Cloud Computing)
- () Impressão 3D (Manufatura Aditiva)
- () Sistemas Ciber-Físicos (CPS)
- () Blockchain
- () Robótica Colaborativa
- () Drones
- () Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)
- () Aprendizado de Máquina (Machine Learning)
- () Digital Twins
- () Smart Sensors

Qual das tecnologias você considera a MENOS relevante para esse critério?

(Escolha única)

- () Internet das Coisas (IoT)
- () Big Data & Analytics
- () Inteligência Artificial (IA)
- () Computação em Nuvem (Cloud Computing)
- () Impressão 3D (Manufatura Aditiva)
- () Sistemas Ciber-Físicos (CPS)
- () Blockchain
- () Robótica Colaborativa
- () Drones
- () Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)
- () Aprendizado de Máquina (Machine Learning)

Comparação: O quanto o Critério é mais importante que o seu Worst:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Computação em Nuvem (Cloud Computing)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Impressão 3D (Manufatura Aditiva)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Sistemas Ciber-Físicos (CPS)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Blockchain	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Robótica Colaborativa	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Drones	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Aprendizado de Máquina (Machine Learning)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Digital Twins	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Smart Sensors	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

C9 – Adaptabilidade e Escalabilidade em Hospitais

Qual das tecnologias você considera a MAIS relevante para promover Adaptabilidade e Escalabilidade em Hospitais?

(Escolha única)

- () Internet das Coisas (IoT)
- () Big Data & Analytics
- () Inteligência Artificial (IA)
- () Computação em Nuvem (Cloud Computing)
- () Impressão 3D (Manufatura Aditiva)
- () Sistemas Ciber-Físicos (CPS)
- () Blockchain
- () Robótica Colaborativa
- () Drones
- () Realidade Aumentada/Virtual (RA/RV)

Comparação: O quanto o Critério é mais importante que o seu Worst:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Digital Twins	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Smart Sensors	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

APÊNDICE H – Mensagem de Convite aos Participantes (Questionário – BWM das Tecnologias da Indústria 4.0)

Assunto: Convite para avaliar tecnologias da Indústria 4.0 em hospitais públicos

Prezada(o) participante,

Você está sendo convidado(a) a contribuir com a pesquisa intitulada: “Gestão Sustentável De Dispositivos Médicos: Framework Baseado Em Indústria 4.0 E Práticas Circulares”, realizada pelo Centro Universitário Inta em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Nesta etapa, buscamos avaliar as tecnologias da Indústria 4.0 mais relevantes para apoiar a sustentabilidade na gestão hospitalar, por meio do método multicritério *Best-Worst Method* (BWM). Sua participação auxiliará na priorização de soluções digitais com maior potencial de aplicação no contexto da saúde pública brasileira.

 Tempo estimado de resposta: entre 25 e 30 minutos

Sua experiência é fundamental para fortalecer a pesquisa científica e contribuir para um sistema de saúde mais eficiente, resiliente e ambientalmente responsável.

Agradecemos desde já pela valiosa contribuição!

Clique no link a seguir para ser direcionado ao questionário:

<https://forms.gle/CjvB1wiut43MR5kGA>

APÊNDICE I – Termo de Consentimento e Livre Esclarecido – Estudo de Caso

TÍTULO DA PESQUISA:

Gestão Sustentável de Dispositivos Médicos: Framework Baseado em Indústria 4.0 e Práticas Circulares

Pesquisadoras Responsáveis:

Ma. Eliana de Jesus Lopes e Dra. Marina Bouzon

1. Participação Na Pesquisa:

O(A) Sr.(a) está sendo convidado(a) a participar, de forma voluntária, desta pesquisa, que tem como objetivo investigar a aplicabilidade da Economia Circular (EC) em dispositivos médicos duráveis nos hospitais públicos brasileiros. A participação consistirá no preenchimento de um questionário e na possível observação de rotinas, sem interferência no ambiente hospitalar.

2. Objetivo Da Pesquisa:

Mapear os processos de aquisição, uso e descarte de dispositivos médicos duráveis, identificando oportunidades para uma gestão hospitalar mais sustentável.

3. Procedimentos a Serem Adotados:

- Preenchimento de um questionário com duração estimada de 15 a 20 minutos.
- Realização de observações estruturadas, sem modificação na rotina de trabalho.
- Nenhuma informação pessoal, clínica ou sensível será solicitada.

4. Providências para Reduzir Efeitos Adversos:

Em caso de desconforto, incômodo ou dúvidas durante a participação, você poderá encerrar sua participação livremente. Todas as respostas serão mantidas sob sigilo, e não há perguntas de cunho pessoal ou que envolvam julgamento individual. Os dados serão utilizados exclusivamente para análise acadêmica.

5. Riscos e Desconfortos Previstos:

A pesquisa não oferece riscos significativos. Porém, o(a) participante pode sentir desconforto ao responder questões sobre práticas internas do hospital. Para minimizar isso, garantimos anonimato e confidencialidade.

6. Benefícios Esperados:

- Diagnóstico detalhado dos processos de gestão de dispositivos médicos.
- Apoio à tomada de decisão para otimização de recursos, redução de impactos ambientais e adoção de práticas sustentáveis.
- Capacitação indireta dos profissionais, estímulo à inovação e melhorias no sistema de saúde.

7. Formas de Acompanhamento e Assistência ao Participante:

Caso você necessite de esclarecimentos, apoio emocional ou encaminhamento institucional durante ou após sua participação na pesquisa, poderá contatar a pesquisadora responsável, que irá direcioná-lo(a) ao serviço de apoio psicossocial do hospital/instituição parceira, conforme a necessidade. Você poderá contatar a pesquisadora responsável pelos meios:

Pesquisadora Responsável: Eliana de Jesus Lopes

Endereço: Rua ver. João Passos Dias, 244, Bairro Belchior, Sobral-CE. CEP: 62.053-780. Telefone: 84 99403-2523. Horário de atendimento: 08h às 22h.

8. Garantias de Privacidade, Sigilo e Confidencialidade:

Todos os dados serão tratados de forma estritamente confidencial e anonimizada, sendo utilizados apenas para fins acadêmicos. Nenhum dado que identifique o(a) participante ou a instituição será divulgado.

9. Direito à Reparação e Indenização por Danos:

Esta pesquisa apresenta risco mínimo, porém, conforme estabelece a Resolução nº 466/2012 do Conselho Nacional de Saúde, caso ocorra algum dano decorrente da sua participação, é garantido ao(à) participante o direito à reparação e à devida indenização, conforme a legislação vigente.

10. Liberdade para Recusa ou Retirada sem Prejuízo:

O(a) participante poderá interromper sua participação a qualquer momento, sem necessidade de justificativa e sem qualquer prejuízo às suas atividades profissionais.

11. Esclarecimentos e Contatos:

Você receberá uma via deste Termo de Consentimento Livre e Esclarecido com a assinatura da Pesquisadora Responsável pela pesquisa.

Se restarem dúvidas, você poderá a qualquer momento entrar em contato com a pesquisadora responsável:

- Ma. Eliana de Jesus Lopes | E-mail: prof.eng.eliana@gmail.com | Tel: (84) 99403-2523
- Dra. Marina Bouzon | E-mail: marina.bouzon@ufsc.br

Com o Comitê de Ética em Pesquisa do Centro Universitário Inta, localizado na Rua Coronel Antônio Rodrigues Magalhães, 359, Bairro Dom Expedito Lopes, Sobral – CE, CEP: 62050-100, Telefax: (88) 3614-3232, ou com o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSC, no Campus da UFSC, na Carvoeira, Florianópolis – SC, CEP: 88040-535, Telefone: (48) 3721-7003.

Em caso de necessidade, o(a) participante será encaminhado(a) para Apoio Psicossocial do Hospital por meio da pesquisadora responsável.

12. Compensação Financeira e Previsão de Ressarcimento de Despesas:

Não haverá qualquer compensação financeira pela participação nesta pesquisa. Entretanto, caso haja despesas comprovadas relacionadas diretamente à sua participação, estas poderão ser ressarcidas mediante apresentação de comprovantes e análise da coordenação do projeto. O objetivo é garantir que sua participação não gere custos adicionais.

CONSENTIMENTO PÓS-ESCLARECIDO

Pelo presente instrumento, eu, _____, portador(a) do documento de identidade nº _____, declaro que li e compreendi todas as informações contidas neste TCLE, tive minhas dúvidas esclarecidas pelas pesquisadoras e concordo voluntariamente em participar da pesquisa referida, com plena ciência de meus direitos e deveres enquanto participante. Receberei uma cópia assinada deste Termo.

Sobral, _____ de _____ de _____.

Assinatura do(a) Participante: _____

Assinatura da Pesquisadora Responsável: _____

Obs.: Todas as páginas devem ser rubricadas pelo(a) participante e pela pesquisadora responsável.

PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

Título da Pesquisa: GESTÃO SUSTENTÁVEL DE DISPOSITIVOS MÉDICOS: FRAMEWORK BASEADO EM INDÚSTRIA 4.0 E PRÁTICAS CIRCULARES

Pesquisador: ELIANA DE JESUS LOPES

Área Temática:

Versão: 3

CAAE: 86351325.8.0000.0121

Instituição Proponente: Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção

Patrocinador Principal: Financiamento Próprio

DADOS DO PARECER

Número do Parecer: 7.659.567

Apresentação do Projeto:

Pesquisa em nível de doutorado de Eliana de Jesus Lopes, discente do Programa de Pós Graduação de Engenharia de Produção da UFSC (orientadora: profa. Dra. Marina Bouzon). O projeto propõe um Technology Roadmap (TRM) para a implementação da Economia Circular (EC) na gestão de dispositivos médicos duráveis em hospitais públicos brasileiros, utilizando tecnologias da Indústria 4.0. A pesquisa abrange o mapeamento de dispositivos com potencial de integração à EC, a análise de processos de aquisição, uso e descarte e a identificação de barreiras e oportunidades para a adoção de práticas circulares. O estudo será realizado em dois hospitais públicos de Sobral (CE), onde em uma primeira etapa serão mapeados, a partir de documentos e processos, a aquisição e descarte de equipamentos em hospitais públicos e será aplicado um questionário com profissionais das áreas de compras, logística, manutenção e gestão de resíduos destas unidades. Métodos como DEMATEL e BWM serão aplicados para análise das inter-relações entre barreiras e impulsionadores, bem como a priorização de tecnologias adequadas ao contexto hospitalar (neste caso, profissionais de outras unidades). O framework resultante fornecerá diretrizes para otimizar a gestão hospitalar e fomentar práticas mais sustentáveis no setor de saúde.

Objetivo da Pesquisa:

O objetivo geral desta tese é propor um Technology Roadmap (TRM) para a implementação da Economia Circular em dispositivos médicos duráveis em hospitais públicos brasileiros,

Endereço: Universidade Federal de Santa Catarina, Prédio Reitoria II, R: Desembargador Vitor Lima, nº 222, sala 701

Bairro: Trindade

CEP: 88.040-400

UF: SC

Município: FLORIANOPOLIS

Telefone: (48)3721-6094

E-mail: cep.propesq@contato.ufsc.br

Continuação do Parecer: 7.659.567

considerando o mapeamento desses dispositivos, a análise de seus processos de aquisição, uso e descarte, e a aplicação de tecnologias da Indústria 4.0 para promover os 3R's da sustentabilidade e a melhoria da eficiência da gestão hospitalar.

Avaliação dos Riscos e Benefícios:

Riscos:

A pesquisa envolve risco mínimo, restrito a eventual desconforto associado ao preenchimento do questionário. Para minimizar qualquer desconforto, você poderá desistir livremente a qualquer momento.

Benefícios:

Os resultados da pesquisa poderão contribuir para o desenvolvimento de estratégias de gestão mais sustentáveis na saúde pública, além de gerar conhecimento acadêmico relevante sobre práticas circulares aplicáveis ao setor hospitalar.

Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:

O projeto pode trazer dados importantes para melhorar a sustentabilidade e eficiência hospitalar, fornecendo um framework inovador que impulsiona a Economia Circular por meio das tecnologias da Indústria 4.0.

Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:

Pedimos atenção dos pesquisadores ao item 2 Conclusões ou pendências e listas de inadequações.

Recomendações:

-

Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:

O projeto foi adequado conforme solicitado.

Considerações Finais a critério do CEP:

Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_2340049.pdf	11/06/2025 20:24:27		Aceito

Endereço: Universidade Federal de Santa Catarina, Prédio Reitoria II, R: Desembargador Vitor Lima, nº 222, sala 701

Bairro: Trindade

CEP: 88.040-400

UF: SC

Município: FLORIANOPOLIS

Telefone: (48)3721-6094

E-mail: cep.propesq@contato.ufsc.br

UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA - UFSC



Continuação do Parecer: 7.659.567

Outros	Carta_Resposta_ao_Comite_de_Etica_e m_Pesquisa_1106_assinado.pdf	11/06/2025 20:13:35	ELIANA DE JESUS LOPES	Aceito
Cronograma	Cronograma.pdf	11/06/2025 20:12:18	ELIANA DE JESUS LOPES	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	TCLE2.pdf	11/06/2025 20:12:06	ELIANA DE JESUS LOPES	Aceito
Projeto Detalhado / Brochura Investigador	Projeto_Tese_CEP_11062025.pdf	11/06/2025 20:09:28	ELIANA DE JESUS LOPES	Aceito
Outros	Carta_Resposta_ao_CEP.pdf	20/05/2025 10:41:42	ELIANA DE JESUS LOPES	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	Carta_Anuencia_DR_Estevam_Assinad a.pdf	11/05/2025 20:47:03	ELIANA DE JESUS LOPES	Aceito
TCLE / Termos de Assentimento / Justificativa de Ausência	Carta_de_Anuencia_2025_SCMS_assin ado.pdf	11/05/2025 20:46:40	ELIANA DE JESUS LOPES	Aceito
Orçamento	Orcamento.pdf	07/02/2025 17:13:33	ELIANA DE JESUS LOPES	Aceito
Folha de Rosto	folhaDeRosto_2025_assinado_2.pdf	07/02/2025 15:47:42	ELIANA DE JESUS LOPES	Aceito

Situação do Parecer:

Aprovado

Necessita apreciação da CONEP:

Não

FLORIANOPOLIS, 23 de Junho de 2025

Assinado por:
Sharbel Weidner Maluf
(Coordenador(a))

Endereço: Universidade Federal de Santa Catarina, Prédio Reitoria II, R: Desembargador Vitor Lima, nº 222, sala 701
Bairro: Trindade **CEP:** 88.040-400
UF: SC **Município:** FLORIANOPOLIS
Telefone: (48)3721-6094 **E-mail:** cep.propesq@contato.ufsc.br