

**Análise de viabilidade técnica para a
implementação de tecnologias da
Indústria 4.0 em uma usina de geração de
energia limpa**

Marcelo Daniel Berejuck

Relatório Técnico INE 001/2024

RESUMO

O uso de tecnologias da Indústria 4.0 é de suma importância em diversos setores da economia moderna, incluindo manufatura, energia, saúde, transporte e muitos outros. Essas tecnologias representam uma evolução significativa na forma como as empresas operam, produzem bens e prestam serviços, proporcionando uma série de benefícios e oportunidades. Apesar de ter sua implementação mais efetivamente vista em grandes empresas e instituições, é possível realizar a implantação de várias dessas tecnologias em instituições e empresas de menor porte. Nesse sentido, este documento apresenta um estudo no qual é feito o posicionamento de uma pequena usina geradora de energia limpa, baseada no reaproveitamento de rejeitos orgânicos gerados na região do Vale o Itajaí, em Santa Catarina, em relação ao uso de tecnologias da Indústria 4.0.

Palavras-Chave – Indústria 4.0, Geração de energia, IIoT, M2M.

SUMÁRIO

Lista de abreviaturas	4
1 Introdução	5
2 Conceitos básicos da Indústria 4.0	7
2.1 Visão Geral	7
2.2 A transição de Indústria 3.0 para 4.0	8
2.3 Aplicações da Indústria 4.0	11
3 Revisão da Literatura	13
3.1 Tecnologias de Automação na Indústria 4.0	13
3.1.1 Redes de Comunicação Industrial	13
3.1.2 Internet das Coisas Industrial	15
3.1.3 Sistemas Ciber-físicos	16
3.1.4 <i>Cloud, Fog</i> e Computação de Borda	17
3.1.5 Comunicação Máquina para Máquina - M2M	18
3.1.5.1 Arquitetura de uma Rede M2M	18
3.1.5.2 Modelo de referência para arquitetura oneM2M	19
3.1.6 A evolução do IPV4 para o IPV6	20
3.2 Metodologias de análise para Indústria 4.0 - I4.0	22
3.2.1 Princípios para Concepção de design	22
3.2.1.1 Interoperabilidade	22
3.2.1.2 Virtualização	23
3.2.1.3 Descentralização	23
3.2.1.4 Análise de dados em tempo real	23

3.2.1.5	Orientação a Serviços	23
3.2.1.6	Modularização	23
3.2.2	<i>Toolbox Industrie 4.0</i>	24
3.2.2.1	Processamento de dados na Produção	26
3.2.2.2	Comunicação entre máquinas	26
3.2.2.3	Produção Interligada Através de Rede com toda a Empresa	28
3.2.2.4	Infra-estrutura de Tecnologia da Informação e Comunicação dentro da linha de produção	28
3.2.2.5	Interface Homem-Máquina	29
3.2.2.6	Eficiência para pequenos lotes	30
3.3	Biomassa e Energia com Indústria 4.0	31
3.3.1	Coleta de dados na literatura científica	31
4	Avaliação das possibilidades tecnológicas no contexto da Usina	33
4.1	Contextualização da Usina da WA	33
4.1.1	Imagens da infraestrutura de construção civil	34
4.2	Análise da Usina em relação ao <i>Toolbox</i>	36
4.2.1	Processamento de dados na Produção	38
4.2.2	Comunicação entre máquinas	38
4.2.3	Conectividade da produção com o restante da Empresa	38
4.2.4	Infraestrutura de TI na Produção	39
4.2.5	Interface Homem-Máquina	39
4.2.6	Eficiência para pequenos lotes	40
4.2.7	Posicionamento da Planta no Toolbox	40
5	Considerações Finais	42
	Referências	44

LISTA DE ABREVIATURAS

CELESC Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.

WA Willrich Ambiental Ltda

I4.0 Indústria 4.0

IoT *Internet of Things*

IIoT *Industrial Internet of Things*

M2M *Machine-to-Machine*

TIC Tecnologia da Informação e Comunicação

IA Inteligência Artificial

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a busca por fontes de energia limpa e sustentável tem se intensificado devido às crescentes preocupações com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis. Uma abordagem promissora para atender a essa demanda é a geração de energia a partir de materiais orgânicos, como resíduos agrícolas, de alimentos e resto-ingesta, através de processos como a digestão anaeróbica e a produção de biogás.

Neste contexto, surge a oportunidade de explorar o potencial das tecnologias da Indústria 4.0 para otimizar e aprimorar a eficiência desses processos de geração de energia limpa. Este projeto visou investigar a viabilidade e os benefícios da aplicação de tecnologias como a *Internet of Things* (IoT), a Inteligência Artificial (IA) e a análise avançada de dados na operação de uma usina de geração de energia de pequeno porte, operada a partir de materiais orgânicos. Ao integrar essas tecnologias de ponta, busca-se não apenas melhorar a eficiência e a confiabilidade da usina, mas também maximizar o aproveitamento dos recursos disponíveis, reduzir os custos operacionais e minimizar os impactos ambientais associados à geração de energia.

Neste projeto, foram realizados estudos para avaliar os requisitos específicos da usina, identificar os pontos de intervenção para a implementação das tecnologias da Indústria 4.0 e analisar os potenciais benefícios em termos de aumento da produção de energia, redução de desperdícios e melhoria da sustentabilidade ambiental. O objetivo final foi fornecer percepções que possam orientar a tomada de decisão e subsidiar investimentos na modernização e atualização da planta da usina.

A empresa partícipe está investindo na construção de uma moderna Usina de Compostagem para geração de energia elétrica. Além da geração de energia, a empresa pretende produzir gás metano e fertilizantes, a partir do material remanescente dos processos da usina. O projeto da usina fará coleta e uso de resíduos de lixo de pescados, restaurantes e dejetos oriundos da atividade pecuária, na região do Vale do Itajaí. O objetivo da empresa é implementar uma usina de energia limpa plenamente automatizada, para po-

der comercializar a energia gerada com a concessionária do estado, Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A. (CELESC). Para poder conectar equipamentos na malha de geração nacional de energia, é necessário um controle rígido no processo de geração e na troca de informações com a concessionária, além de mecanismos para auxiliar na gestão de diferentes processos existentes neste tipo de unidade geradora de energia.

O objetivo deste projeto foi fazer um mapeamento da planta da usina para geração de energia elétrica por compostagem proposta pela empresa partícipe, já em andamento, para avaliar seu posicionamento em relação às tecnologias da Indústria 4.0. A intenção da empresa é anteciper os desenvolvimentos futuros que seriam necessários para tornar a usina em um modelo de inovação e eficácia. Este posicionamento da planta da usina foi realizado utilizando uma das ferramentas de análise para Indústria 4.0 sugeridas na literatura.

Para atingir este objetivo, foi realizado um estudo completo sobre o tema e é apresentado neste documento, dividido em três partes. Primeiro, são apresentadas as definições das principais tecnologias que possivelmente serão necessárias na implantação de um projeto 4.0, caso a empresa dê continuidade ao projeto de implementação das tecnologias elencadas. Numa segunda etapa, foram verificadas as publicações sobre o uso de biomassa na geração de energia com controle pelo conceito de Indústria 4.0, a fim de identificar a originalidade da proposta. Por fim, foi feita uma revisão básica sobre técnicas para implementação do conceito de Indústria 4.0 para pequenas e médias empresas, culminando com o posicionamento da planta atual da usina proposta pela empresa partícipe, utilizando uma ferramenta de análise para avaliação das condições de uma unidade fabril em relação às tecnologias da Indústria 4.0.

2 CONCEITOS BÁSICOS DA INDÚSTRIA 4.0

2.1 Visão Geral

O setor 4.0 refere-se à quarta revolução industrial, que se caracteriza pela integração de tecnologias digitais avançadas, como inteligência artificial, robótica, Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem e *big data*, nos setores industrial e de manufatura. O termo “Indústria 4.0” foi criado na Alemanha, especificamente na Feira de Hannover, em 2011. A expressão se tornou publicamente conhecida nesse mesmo ano pela iniciativa “*Industrie 4.0*”, que reuniu empresários, políticos e membros de universidades da Alemanha com o intuito de analisar e propor medidas para fortalecer a competitividade da manufatura alemã por meio de uma transformação digital. [1].

Muitos autores veem a Indústria 4.0 é a quarta revolução industrial, sucedendo a primeira revolução (mecanização e uso de energia a vapor), a segunda revolução (eletrificação e produção em massa) e a terceira revolução (automatização e tecnologia da informação). Esta nova fase é caracterizada pela integração completa de sistemas ciber-físicos com processos de produção físicos. Os objetos, máquinas e sistemas de produção se tornam inteligentes, autônomos e capazes de tomar decisões baseando-se em informações de tempo-real [2].

O setor 4.0 tem como objetivo criar “fábricas inteligente” que possam otimizar e automatizar os processos de produção usando dados em tempo real e análises avançadas. Isso pode levar ao aumento da eficiência, da produtividade e da flexibilidade, bem como à melhoria da qualidade e da personalização dos produtos. Também envolve o uso de sistemas ciber-físicos, em que dispositivos físicos são conectados a sistemas digitais e podem se comunicar entre si em tempo real, permitindo processos de fabricação mais eficientes e flexíveis. Espera-se que o setor 4.0 tenha um impacto significativo na economia global e no futuro do trabalho, bem como no meio ambiente, com o potencial de reduzir o desperdício, o consumo de energia e as emissões de carbono [3].

2.2 A transição de Indústria 3.0 para 4.0

Embora o termo Indústria 4.0 tenha sido usado originalmente para a indústria de manufatura, em contraste com outras iniciativas de menor escala de aplicação, como internet industrial e Consórcio de Internet Industrial (IIC), as indústrias atuais estão evoluindo cada vez mais em nível tecnológico, alcançando um patamar de automatização quase completo e inteligente, capaz de adaptar-se às adversidades que podem ocorrer. No início da indústria 4.0 não era esperada uma grande aceitação e avaliar o seu crescimento e adoção, pois era vista inicialmente como aplicação na indústria de manufatura. Atualmente, a Indústria 4.0 refere-se também a diversos outros segmentos tais como transportes e logística, edifícios inteligentes, petróleo o gás, serviços de saúde e até cidades inteligentes. Todos esses segmentos buscam obter um melhor desempenho e eficiência em suas operações [2].

A maioria das indústria Brasileiras ainda trabalham no modelo 3.0, no qual nem todos os elementos nos processos industriais envolvidos estão conectados ou integrados a fim de que a informação e as tomadas de decisão possam ser feitas de forma determinista e digital. É possível perceber que não há uma comunicação digital direta com troca de informações, ou seja, essas indústrias são caracterizadas por meios tradicionais de comunicação ou registros manuais em documentos padronizados pelas empresas. A Figura 1 ilustra uma indústria de manufatura genérica contendo seus principais elementos. Em empresas bem estruturadas, é possível perceber a existência de documentos definindo processos para cada atividade industrial, muitas vezes orientadas pela adoção de programas de Qualidade como a ISO 9001, por exemplo.

Na indústria 3.0 é possível verificar diversos níveis de informação, com a comunicação vertical sendo eficiente, sendo que ao nível de comunicação horizontal isso não ocorre de forma transparente. Um exemplo é a situação na qual um nível gerencial deseja verificar informações ao nível de chão de fábrica. Na verdade, muitas informações são monitoradas e controladas exclusivamente pelo chão de fábrica, enquanto outras instâncias internas da indústria não tem acesso a informações importantes [2].

De forma geral, muitas informações a respeito da manutenção não são compartilhadas com os gestores, os quais se limitam a receber relatórios e repassar informações específicas da gerência local. Um outro exemplo disso refere-se ao que acontece com o *setup* e a calibração de máquinas e equipamentos, que são informações exclusivamente do chão de fábrica, com os processos documentados e registrados apenas em uma base de dados para que se possa repassar o conhecimento para futuros colaboradores no chão de fábrica.

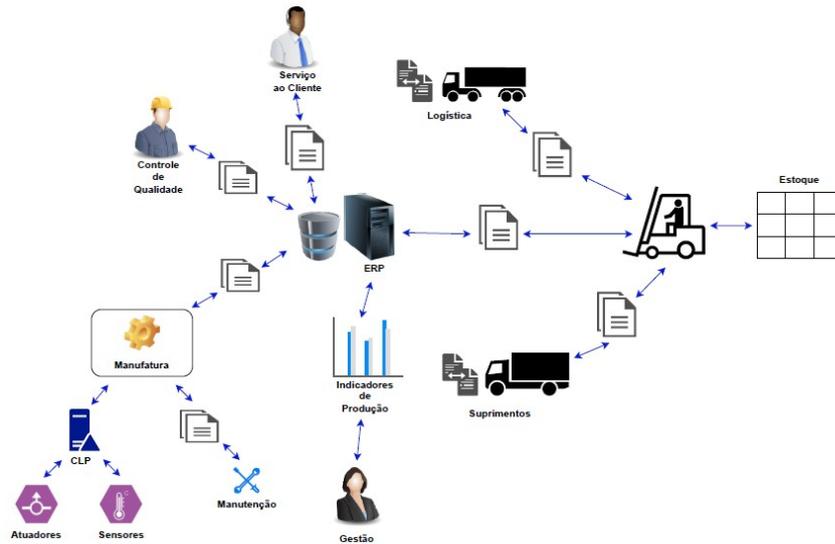


Figura 1: Exemplo de uma planta fabril baseada no conceito 3.0. Adaptado de: [3].

Ainda assim, é possível perceber que diversas informações ficam de fora dos sistemas de gestão, como o ERP (*Enterprise Resource Planning*), e são disponibilizados apenas em relatórios ou compartilhadas em reuniões gerenciais. Assim, as tomadas de decisão na Indústria 3.0 tendem a ser apenas corretivas e baseadas em informações que não mostram o estado de saúde das áreas da empresa. Outro ponto recorrente na indústria 3.0 é a necessidade de registrar ou documentar em planilhas manuais e desenhos, uma vez que nem todos os processos estão digitalizados e acessíveis aos níveis de gestão da indústria. Assim, percebe-se na Figura 1 que o “gestor” limita-se apenas a receber “indicadores de produção” para sua futura tomada de decisões [3].

Porém, as tecnologias de informação e comunicação existente atualmente podem ser aplicadas às indústrias com modelo Indústria 3.0, levando a um patamar de automação e inteligência consideravelmente mais autônomas e flexíveis. Ou seja, evoluindo para o modelo de Indústria 4.0. Desta forma, a Indústria 4.0 tem uma forte integração e coesão entre todos os setores que contam com aplicação ampla de tecnologias de informação e comunicação. Os recursos para informações atendem a um nível amplo de normalização, permitindo que todas as informações possam ser distribuídas e acessíveis a todas as instâncias da indústria.

A Figura 2 mostra o mesmo ambiente de manufatura, apresentado no modelo de Indústria 3.0 na Figura 1, porém considerando aspectos de comunicação horizontal que permitem o amplo conhecimento da planta por todos os atores que atuam na mesma. A conectividade entre pessoas e sistemas proporciona um nível de integração mais expressivo e funcional. Assim, a Indústria 4.0 facilita a visão e a possibilidade de existência de

uma fábrica inteligente, com elevado nível de modularidade, flexibilidade e tomadas de decisões descentralizadas. A integração e a comunicação entre dispositivos promovem melhor operação, virtualização, descentralização, orientação de serviços, modularidade, monitoramento em tempo real, flexibilização e otimização do sistema de manufatura. Assim, as vantagens do modelo de Indústria 4.0 podem ser resumidos em seis itens:

- Virtualização do sistema;
- Operação em tempo real;
- Descentralização;
- Orientação a serviços;
- Modularidade na manufatura; e
- integração das operações.

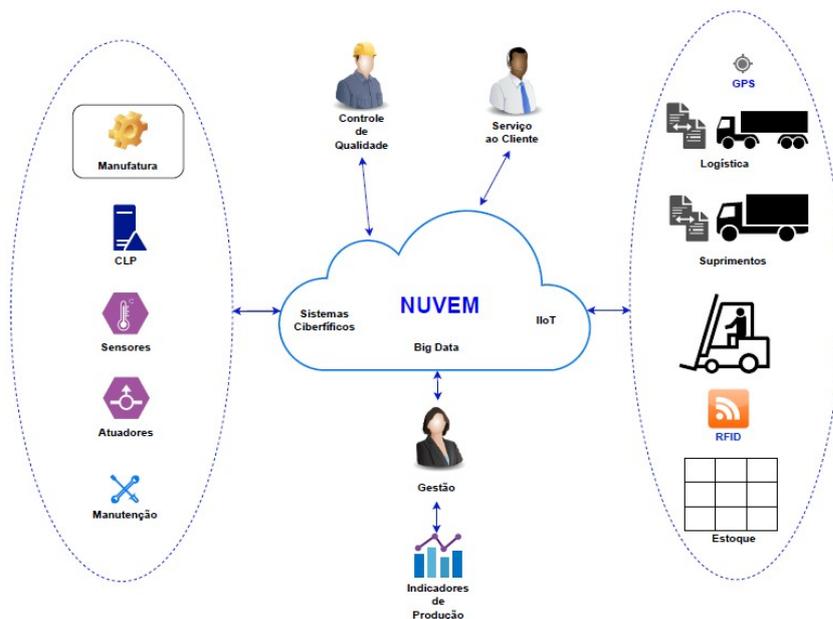


Figura 2: Exemplo de uma planta fabril baseada no conceito 4.0. Adaptado de: [3].

Os métodos e processos de sistemas de computação embarcados tradicionais não são capazes de promover essas novas funcionalidades. O conceito de sistemas embarcados está migrando para um conceito de sistemas cibernéticos (ou ciber-físicos), em função da forte integração e da relação entre a planta física e o sistema computacional totalmente adaptável para ter um melhor desempenho operacional. Os equipamentos devem

ser caracterizados como elementos cibernéticos inteligentes e integrados, para que se comuniquem operacionalmente, em manutenção e logística. Outra observação interessante pode ser feita na Figura 2 onde percebe-se que os atores (Controle de Qualidade, Serviço ao Cliente e Gestão) passam a ter acesso e, conseqüentemente, uma visão mais ampla da indústria, podendo gerar discussões e aprimoramentos à planta. Por exemplo, na Indústria 3.0 a Gestão recebia indicadores de produção para poder realizar seu planejamento e gestão. Na Indústria 4.0 a Gestão tem amplo acesso aos processos da indústria, e passa a ser a geradora de relatórios mais conclusivos para os acionistas [2].

2.3 Aplicações da Indústria 4.0

Em linhas gerais, pode-se dizer que a Indústria 4.0 visa ter um sistema de produção com máquinas e equipamentos inteligentes e integrados para gerar maior eficiência e desempenho. Atualmente, diversas atividades e decisões de uma indústria ainda são realizadas por pessoas ou equipes, com ajuda de sistemas inteligentes que orientam e justificam as decisões estratégicas. O conceito de Indústria 4.0 pode ser aplicado em partes distintas de uma empresa, porém estas “partes” precisam estar integradas. Por exemplo, as tecnologias e requisitos necessários para a implantação do conceito de Indústria 4.0 para a Logística de uma empresa pode diferir das necessidades da Gestão de Energia da mesma empresa. Dessa forma, parece evidente que o ideal é as empresas façam a adequação para cada um dos seus setores, porém sem esquecer da integração global das informações. É importante lembrar a necessidade de todos os componentes industriais estarem cobertos por um sistema computacional adequado, já que as máquinas e equipamentos que conseguem tomar decisões devem ter um nível de inteligência adequado e estarem virtualizados neste contexto.

Para obter um sistema totalmente digital que atenda à proposta da Indústria 4.0, utilizando todas as tecnologias existentes, é necessário ter um roteiro do fluxo de trabalho. Alguns autores como [3] sugerem um roteiro do fluxo de trabalho de acordo com cinco passos:

- Compreender o conceito de Indústria 4.0 e seus impactos;
- Analisar e avaliar o nível de automação existente na indústria;
- Aplicar métodos de otimização ao processo existente;
- Realizar convergência de dados da cadeia produtiva; e

- Implantar ferramentas e tecnologia da Indústria 4.0.

É possível dizer que a Indústria 4.0 possui especificações globais, contudo, deve-se considerar que cada mercado tem características própria e estas devem ser observadas. No entanto, é de comum entendimento que as áreas internas estejam interligadas e baseadas nas premissas da Indústria 4.0. Sabendo-se que um indústria possui diversos setores, é necessário que cada um deles seja denominado de acordo com requisitos da metodologia. Assim, quando estes setores ou instâncias atendem aos princípios globais da Indústria 4.0, acaba-se por incluir o sufixo 4.0 dentro de cada setor, por exemplo:

- Manufatura 4.0: refere-se aos componentes do processo de fabricação, como máquinas, produtos e pessoas;
- Manutenção 4.0: refere-se ao setor que provê suporte ao sistema de manufatura, interligando a cadeia de suprimentos e logística, quando esta trata de insumos para substituição de peças ou máquinas no processo de manutenção;
- Suprimentos 4.0: refere-se à toda a cadeia de suprimentos, tanto de matéria-prima para fabricação de produtos, quanto para a substituição e reparo de máquinas pelo setor de manutenção;
- Logística 4.0: refere-se a todo sistema responsável pela gestão de toda a cadeia de transportes e rastreamento de produtos, focando no armazenamento e distribuição;
- Energia 4.0: refere-se a todo o sistema de gestão de energia que é consumida na operação da indústria;
- Projetos 4.0: refere-se ao setor responsável pelos projetos da indústria, desde produtos até o desenvolvimento de equipamentos e métodos para melhorias no processo de manufatura;
- Serviços 4.0: refere-se a cadeia de pós-venda, para a qual todos os elementos ou produtos são identificados e rastreados durante o ciclo de vida. Interagem diretamente com os setores de projeto, logística e gestão; e
- Gestão 4.0: refere-se ao sistema global de gestão, que tem acesso a todos os níveis industriais, além de interagir com todas as instâncias identificadas.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos da revisão bibliográfica, envolvendo três pontos distintos: (*i*) uma revisão da literatura sobre tecnologias para Indústria 4.0; (*ii*) sobre o uso de biomassa na geração de energia com controle pelo conceito de Indústria 4.0; e (*iii*) sobre técnicas para implementação do conceito de Indústria 4.0 para pequenas e médias empresas. Além do levantamento sobre as tecnologias que podem ser aplicadas na Indústria 4.0, que seria o foco principal deste relatório, foram elencados dois outros objetivos para serem alcançados com esta revisão bibliográfica. Um deles era verificar se havia alguma publicação científica relacionando usinas de geração de energia por biomassa que foram implementadas segundo o conceito de Indústria 4.0. O outro, foi verificar quais as boas práticas de Indústria 4.0 aplicadas a pequenas e médias empresas, uma vez que este projeto está relacionado a uma pequena unidade de geração de energia por biomassa, no projeto financiado pela Willrich Ambiental Ltda (WA).

Assim, o capítulo está dividido em três seções. A primeira seção apresenta as principais tecnologias que envolvem o conceito Indústria 4.0, A segunda foca nos modelos de arquitetura que orientam boas práticas para análise e implantação de conceitos da Indústria 4.0 para pequenas e médias empresas. Por fim, a terceira seção apresenta o resultado das buscas relacionadas a usinas de energia por biomassa com algum nível de implantação do conceito 4.0.

3.1 Tecnologias de Automação na Indústria 4.0

3.1.1 Redes de Comunicação Industrial

Para entender um pouco melhor como a Quarta Revolução (Indústria 4.0) deve afetar o ambiente industrial, é importante conhecer o cenário existente na indústria atualmente e até em que ponto as tecnologias disponíveis contribuíram para o desenvolvimento industrial. Muitas tecnologias industriais foram implementadas desde a Terceira Revolução Industrial, em especial com o desenvolvimento da eletrônica. Muitas destas tecnologias

continuam a ser utilizadas nas empresas e, do ponto de vista produtivo, ainda podem ser consideradas atuais. Protocolos industriais de comunicação associados a meios específicos ainda executam bem a produção e têm o desempenho requerido em um ambiente industrial. No início desejava-se de uma rede industrial a confiabilidade dos dados e o determinismo, ou seja, a informação do processo em tempo real, porém sempre voltada para o processo interno da empresa, nunca ou quase nunca com a informação sendo exportada ao ambiente externo da produção. As facilidades computacionais nas décadas de 80 e 90 era, restritas e não havia tecnologia para a comunicação adequada e confiável para fora da empresa [2].

Historicamente as redes industriais e as redes de computadores sempre tiveram tráfegos de dados muito diferentes, seja pelo tamanho dos pacotes trafegados ou pelo ambiente do tráfego. Isso fez com que muitos protocolos industriais nunca entrassem em uso em redes de computadores e vice-versa. Porém, a partir da década de 90 o padrão Ethernet (IEEE 802.3), que por muito tempo foi utilizado apenas em redes de computadores, começou a ter aplicações industriais, o mesmo ocorrendo com redes sem fio (IEEE 802.11), que depois de terem sua aplicação bem estabelecida para comunicação entre computadores em rede, começaram a ser utilizadas na indústria [3]. Com o passar do tempo, outras tecnologias de comunicação sem fio passaram a ser implementadas em chão de fábrica, como o Zigbee[®] e IEEE 802.15.1, também conhecido como Bluetooth[®] que operam na faixa de 2,4 GHz e consomem menos energia que o padrão IEEE 802.11.

Em 1996 a empresa alemã Siemens, desenvolvedora de diversas soluções de automação industrial, propôs o conceito *Totally Integrated Automation* (TIA), que previa uma rede integrando os diversos níveis da automação industrial na época. Depois do surgimento dos CLPs (acrônimo de Controladores Lógicos Programáveis) na indústria, fruto do desenvolvimento da eletrônica, baseados em hardware apenas, a TIA trazia um conceito de soluções baseadas não somente em equipamentos, mas na possibilidade de programação flexível, de maneira iterativa e intuitiva por meio de software, e ainda com a possibilidade de comunicação entre produção e áreas de gerência.

Para realizar a integração total do ambiente de automação, a TIA trouxe três conceitos principais que sustentam todos os princípios de comunicação atuais da Indústria 4.0: (i) configuração e programação comum de sistemas parcialmente individualizados; (ii) tratamento de dados comum a todos os elementos, ou seja, uma padronização nos dados; e (iii) comunicação comum entre todos os componentes participantes dentro do ambiente industrial, em especial, no processo de automatização. Esta proposta de integração da automação tinha inicialmente quatro níveis de atuação:

1. Nível de gerência;
2. Nível de operação;
3. Nível de controle; e
4. Nível de chão de fábrica.

A proposta era simplificar as estruturas envolvidas na automação industrial, de modo que, por meio de computadores, os níveis envolvidos pudessem realizar todas as configurações necessárias para cada um dos processos automatizados, juntamente com a supervisão e controle para que cada uma das etapas pudesse ficar disponível de maneira mais simples. Protocolos de redes industriais como AS-i, PROFIBUS DP, PROFIBUS PA e PROFINET foram integrados, permitindo a comunicação entre os níveis da automação industrial. A proposta da TIA era tirar do isolamento as estações ou máquinas envolvidas dentro dos processos industriais, criando uma grande rede de comunicação, pois já havia o entendimento de que esses equipamentos integrados e se comunicando entre si proporcionariam ganhos de produtividade e redução de custos nas organizações. Neste sentido, o conceito de TIA é importante no contexto da Indústria 4.0, pois é esperado pelas organizações que seus equipamentos legados possam ser integrados com outras tecnologias que irão compor o conceito 4.0, minimizando custos de implementação.

3.1.2 Internet das Coisas Industrial

A “Internet das Coisas” (em inglês, *Internet of Things* -IoT) corresponde a uma revolução tecnológica que tem como objetivo conectar itens usados no dia a dia, como eletrodomésticos, meios de transporte, roupas e até utensílios, à rede mundial de computadores. A expressão foi cunhada pelo tecnólogo Kevin Ashton em 1999, quando a usou para descrever como os dados capturados pelos humanos levariam a uma revolução, uma vez que os computadores começassem a gerar e coletar dados sem qualquer intervenção humana. Desde então, a visão da Internet das Coisas evoluiu devido a uma convergência de múltiplas tecnologias, desde a comunicação sem fio à internet e de sistema embarcados a sistemas micro eletromecânicos [4].

Segundo Soares, Coutinho e Reis Neto [5], a Internet Industrial das Coisas (IIoT) atua com a mesma ideia da Internet das Coisas (IoT), utilizada para conectar aparelhos domésticos. A diferença é que a IIoT permite a conectar máquinas industriais e outros dispositivos relacionados a fabricação. Por meio de sensores, aplicativos e outros vários

dispositivos é possível coletar, monitorar e controlar o maquinário industrial, além da massa de dados coletados, durante o processo, ajudar na tomada de decisões por parte gerencial.

As diferenças entre as tecnologias IoT e IIoT estão menos na forma como funcionam e mais na forma como são utilizadas. A maior parte das soluções de IoT do mundo tendem a ter indivíduos como seus usuários finais e são mais comumente incorporadas a coisas como relógios inteligentes, assistentes digitais controlados por voz ou aparelhos inteligentes e TVs. A IIoT é um subconjunto da IoT e, embora seja impulsionada pelas mesmas tecnologias básicas, seu foco é muito mais na automação e eficiência em todo um ecossistema organizacional conectado – em vez de um usuário isolado. Em redes IIoT, coletar e analisar dados é apenas o primeiro passo em um processo mais complexo. Para oferecer o máximo benefício a uma empresa, a inteligência artificial e o conceito de aprendizado de máquina (em inglês *machine learning*) devem ser aplicados a esses dados para fornecer *insights* precisos e otimizar fluxos de trabalho e tarefas automatizadas. Os usuários humanos também devem ser capazes de interagir com esses dispositivos da forma mais perfeita possível para criar redes ciber-físicas nas quais o melhor das habilidades humanas e tecnológicas pode aumentar uns aos outros.

3.1.3 Sistemas Ciber-físicos

O amplo conhecimento do modelo do Sistema Ciber-físico (*Cyber-Physical System - CPS*) alvo é fundamental para o sucesso na implementação da Indústria 4.0. Um CPS é um sistema que combina e coordena elementos computacionais e físicos, de modo a integrar a capacidade de atuação do mundo físico e a inteligência do mundo cibernético para adicionar novos recursos aos sistemas físicos do mundo real [6]. Ou seja, sistemas ciber-físicos são definidos como sistemas físicos e de engenharia cujas operações são monitoradas, coordenadas, controladas e integradas por um núcleo de computação e comunicação. Esse controle pode ser realizado através da discretização de sinais em tempo real. A partir deste monitoramento, é possível construir um conjunto de matrizes, chamadas de **matriz de controle** e de **matriz de espaço de estados**, para poder atuar sobre o sistema a ser controlado. Sistemas ciber-físicos complexos demandam a manipulação de grandes quantidades de dados e, conseqüentemente, sistemas computacionais com maior grau de complexidade para suportá-los.

3.1.4 *Cloud, Fog e Computação de Borda*

O conceito de Nuvem (em inglês *Cloud*) é um termo utilizado para descrever uma rede global de servidores, cada um com uma função específica. A nuvem não é uma entidade física, mas sim uma vasta rede de servidores remotos ao redor do globo que são conectados e operam como um único ecossistema. Uma nuvem é capaz de processar grandes quantidades de dados, produzindo estatísticas para a gestão e informações como as que possibilitam a chamada manutenção preditiva dos equipamentos. Por ter os seus servidores espalhados geograficamente, raramente interagem em tempo real [5]. As novas tecnologias de comunicação associadas a taxas de transmissão cada vez mais elevadas permitiram que o armazenamento de dados, bem como todo o processamento, pudessem ser tratados como um serviço disponibilizado por grandes empresas especializadas.

Do ponto de vista do usuário, o serviço em nuvem é virtualizado. Por sua vez, o provedor de serviços provavelmente usará tecnologias de virtualização, como computação virtualizada ou armazenamento virtualizado, por exemplo. Existem três categorias de serviços para computação em nuvem (em inglês *Cloud Computing*): **IaaS** (*Infrastructure as a Service*), **PaaS** (*Platform as a Service*) e **SaaS** (*Software as a Service*). Cada categoria define um conjunto de serviços disponíveis para o cliente, e essa é a chave para a nuvem: “tudo é oferecido como um serviço”. Isto é baseado no conceito de SOA (acrônimo do inglês para *Service Oriented Architecture*), em que os serviços da web são usados para acessar as funções da aplicação.

O conceito de *Fog* (em português “nevoeiro”) é mais recente, e muitas vezes representado como uma “nuvem local”, por estar diretamente conectado às instalações fabris. Trata-se de “Computação de fronteira” ou de borda (em inglês *Edge Computing*), ou seja, estão no limiar do espaço físico onde ocorre o processo automatizado. Deste modo, permitem o tratamento da informação localmente, diminuindo os acessos à Nuvem e minimizando a carga computacional da dela. De um modo geral, os servidores da Computação de borda são mais preparados para o processamento em tempo real [5]. O IEEE (Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos) adotou em 2017 o *Open Fog Consortium’s Open Fog Reference Architecture* para a computação de borda como um padrão oficial, designado de IEEE 1934. Este padrão pretende definir os requisitos da IoT, das comunicações 5G e das aplicações industriais de inteligência artificial, todas tecnologias utilizadoras intensivas de dados.

3.1.5 Comunicação Máquina para Máquina - M2M

Com a evolução das redes de sensores sem fio, da comunicação a longa distância e das tecnologias de computadores em sistemas embarcados, tornou-se possível ampliar o nível de comunicação entre os dispositivos e, conseqüentemente, seus serviços. Neste contexto, adotou-se o termo máquina para máquina (*Machine-To-Machine* – M2M), que é bastante similar ao conceito de telemetria convencional, porém expande o conceito de comunicação para os dispositivos entre si via rede [7].

O conceito básico de uma aplicação M2M combina dois componentes principais: Data End Point (DEP) e Data Integration Point (DIP). O primeiro é o dispositivo M2M com capacidade de coleta de dados através de sensores, processamento e envio de dados. DIP é a entidade cliente no final do processo que agrega e utiliza os dados coletados da aplicação, podendo ser formado por outro dispositivo embarcado ou uma aplicação em software [8]. A Figura 14 apresenta um exemplo com uma visão geral deste conceito M2M.



Figura 3: Visão básica de uma comunicação M2M. Adaptado de: [8].

3.1.5.1 Arquitetura de uma Rede M2M

Essencialmente, uma rede M2M é dividida em duas sub-redes principais: uma rede local e uma rede celular. A rede local é composta por dispositivos embarcados no ambiente e/ou objetos, ou seja, pelas fontes dos dados coletados. Normalmente são altamente escaláveis e utilizam protocolos que garantem o cumprimento dos requisitos mais comuns destes dispositivos, tal como requisitos de eficiência energética. A rede celular é a rede que difunde, processa e apresenta esses dados através de acesso de banda larga. A rede celular é altamente vantajosa pois possibilita elevada mobilidade, ubiquidade e boa cobertura. Assim, é possível reutilizar infraestruturas de redes de comunicação já desenvolvidas e implementadas.

Existem vários trabalhos promovidos por organizações internacionais que norteiam os objetivos, as características e os requisitos das comunicações M2M. Um deles, com ampla representatividade na comunidade científica e industrial, é desenvolvido pela organização *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) [9]. A arquitetura proposta

pelo ETSI tem dois domínios principais: o *Device Domain* (DevD) e o *Network Domain* (NetD). Entre os dois encontra-se o *Gateway Domain* (GatD). De forma análoga, poderá ser classificado o *Application Domain* (AppD), como o domínio onde os dados dos dispositivos M2M são armazenados em massa, ou são diretamente acessados pelos usuários que demandam informações a partir dos dados coletados. Ambos os domínios estão fortemente ligados com o objectivo de disponibilizar aplicações M2M a clientes desses mesmos serviços.

O DevD contém as redes, preferencialmente de potência e consumo reduzido, onde os dados são gerados por milhares de dispositivos embutidos nos ambientes. Portanto, engloba-se na rede local. O ETSI exemplifica dois tipos de acesso ao DevD:

- Ligação direta entre o NetD e o DevD através da rede de acesso – Procedimentos como registo, autenticação, autorização e gestão são realizados no DevD, além de disponibilizar outros serviços a outros dispositivos “escondidos” da NetD; e
- Ligação indireta do DevD com o NetD através de um gateway – Configurado como uma proxy de rede. Neste caso, todos os procedimentos exigidos são desencadeados pelo GatD. O gateway é diversificado na medida em que centraliza e trata informação e dados de vários tipos de sensores.

As capacidades de acesso à rede são definidas no NetD e permitem que o DevD e o GatD (se existir) comuniquem com a rede de suporte central (*core network*). Aqui estão englobas as redes de um sistema celular. A rede de acesso é vista como uma camada superior à rede capilar constituída pelos *domain devices*. É nesta camada que os dados são geridos, do ponto de vista das entidades controladoras, e partilhados com os utilizadores finais. As redes de acesso sugeridas originalmente pelo ETSI são normalmente as redes móveis 3G e 4G. A rede central participa ativamente com ligações IP, interligação com redes heterogêneas, técnicas de *roaming* e outros serviços habituais das redes móveis. A Figura 4 apresenta esquematicamente esta arquitetura sugerida pelo ETSI.

3.1.5.2 Modelo de referência para arquitetura oneM2M

O **oneM2M** é a iniciativa global que abrange arquitetura, requisitos, especificações API, soluções de privacidade e segurança, bem como uma estrutura de interoperabilidade para as tecnologias M2M/IoT [10]. Ao contrário da arquitetura ETSI M2M, o principal objetivo da oneM2M é fornecer uma estrutura de camada de serviço genérica para comunicações M2M. A arquitetura oneM2M é baseada na arquitetura ETSI M2M junto com

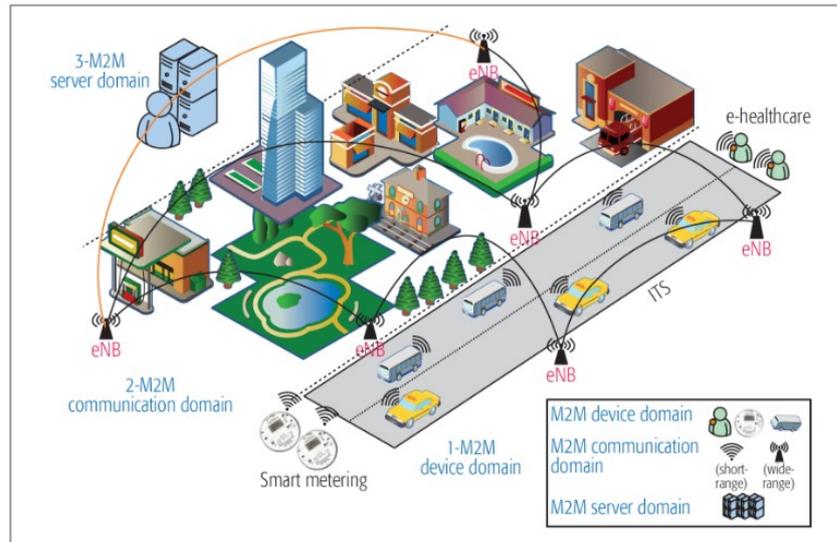


Figura 4: Arquitetura de comunicação M2M proposta pelo ETSI. Adaptado de: [8].

a camada de serviço adicional para aplicações que compartilham infraestrutura, ambientes e elementos de rede comuns, a fim de garantir a interoperabilidade entre dispositivos M2M/IoT. Além disso, o oneM2M visa fornecer interfaces abertas que garantam uma ampla aplicabilidade de todo o ecossistema M2M/IoT. Como resultado, o projeto pretendido da estrutura será aplicado a várias redes baseadas em hardware e software no mundo inteiro, de acordo com seus autores. A Figura 5 ilustra a proposta arquitetura funcional oneM2M, que consiste de três componentes-chave: a entidade de aplicação (*Application Entity – AE*), a entidade de serviço comum (*Common Service Entity – CSE*), e a entidade de serviços de rede (*Network Service Entity – NSE*).

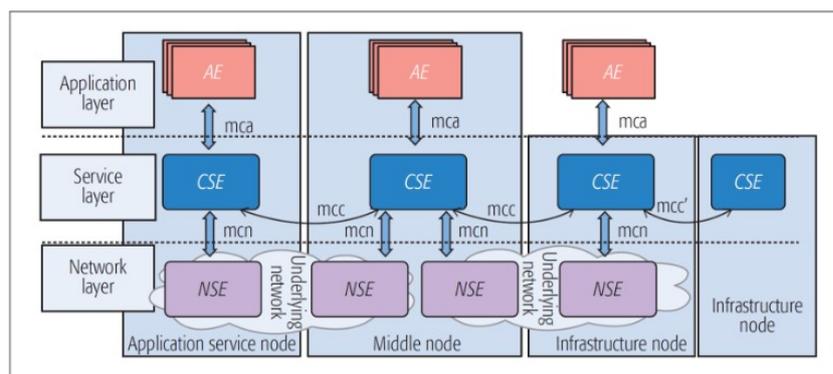


Figura 5: Arquitetura funcional oneM2M. Adaptado de: [10].

3.1.6 A evolução do IPV4 para o IPV6

O protocolo de internet, ou simplesmente IP (acrônimo do inglês *Internet Protocol*) surgiu na década de 1970 com o objetivo de endereçar dois dois ou mais computadores

interligados em rede e assim facilitar a comunicação entre eles. A partir da década de 1980 o protocolo IP passou a ser adotado como protocolo padrão da comunicação de computadores em rede, tendo sua última versão estável (e ainda em uso) denominada de “IP versão 4”, ou IPV4.

O IPV4 utiliza 32 bit para endereçamento, representados em quatro segmentos de números decimais variando de 0 a 255, como por exemplo, o número **201.198.116.120**. Parte deste número indica a rede onde está ligado o equipamento e outra parte identifica o equipamento em si. Para uma melhor gerência da rede global de computadores, o endereço IP é dividido em classes, denominadas de Classes A, B e C.

O uso de 32 bits para representar redes e máquinas acabou por limitar a quantidade de dispositivos endereçáveis na rede global de computadores. É importante salientar que além de computadores, outros dispositivos, como smartphones por exemplo, também recebem um número IP específico, o que acaba por diminuir muito a quantidade de dispositivos representáveis num mundo em constante crescimento. Assim, em 1996 foi proposto o protocolo IPV6 de 128 bits, como sendo o protocolo responsável pela “próxima geração do IP”, tendo suas especificações publicadas na RFC 1.752. A sua implantação vem sendo gradativa desde então e deve funcionar lado a lado com o IPV4 por algum tempo. O IPV4 tem a possibilidade de endereçar 4 bilhões de endereços, enquanto o IPV6 há cerca de 79 octilhões de vezes a quantidade de endereços IPV4.

Com relação à transição desses formatos, algumas técnicas podem ser classificadas segundo suas funcionalidades:

- **Pilha dupla:** consiste na convivência do IPV4 e do IPV6 nos mesmos equipamentos, de modo simultâneo. Essa técnica é o padrão escolhido para a transição para IPV6 na Internet e é aconselhável que se use sempre que possível.
- **Túneis:** permitem que diferentes redes IPV4 comuniquem-se por meio de um rede IPV6 e vice versa.
- **Tradução:** permite que equipamentos usando IPV6 comuniquem-se com outros que usam IPV4, por meio de uma conversão de pacotes de dados.

A popularização do protocolo IP também refletiu-se nas aplicações industriais, dando início a aplicações em que os equipamentos também passam a receber endereços IP para comunicação, associando a isso o uso do padrão Ethernet, dando início ao que se chama hoje de “Ethernet Industrial”. O uso desses novos padrões na indústria facilita a integração com ambientes já familiarizados com padrões Ethernet e IP, perincipalmente nas

áreas de gestão. O desafio é integrar áreas em que o IP ainda não está presente no chão de fábrica, ou sequer foi previsto.

3.2 Metodologias de análise para Indústria 4.0 - I4.0

Como qualquer processo de mudança, a implementação do programa I4.0 demanda alto grau de estudo e tempo para ser atingida completamente. Não existe um roteiro de implementação que as empresas possam seguir; porém, alguns autores sugerem estratégias que podem levar ao alcance desejado [11]. Nesta seção destacamos as duas mais utilizadas: (i) Princípios para Concepção de design; e (ii) *Toolbox Industrie 4.0*.

3.2.1 Princípios para Concepção de design

Os autores Hermann, Pentek e Otto [12] trazem seis princípios de concepção de design, derivados de componentes da Industrie 4.0, que dão suporte às empresas na identificação de possíveis projetos pilotos, que depois podem ser implementados de acordo com o perfil de cada uma delas. Estes seis princípios, apresentados por aqueles autores e mostrados como um exemplo na Figura 6, são descritos nas subseções a seguir.

	Sistemas Físico-Cibernéticos	Internet das Coisas	Internet de Serviços	Fábrica Inteligente
Interoperabilidade	X	X	X	X
Virtualização	X	-	-	X
Descentralização	X	-	-	X
Análise de Dados em Tempo Real	-	-	-	X
Orientação a Serviços	-	-	X	-
Modularização	-	-	X	-

Figura 6: Princípios de design de cada componente na *Industrie 4.0*. Fonte: adaptado de [12].

3.2.1.1 Interoperabilidade

É um elemento muito importante da Industrie 4.0. Nela, empresas, sistemas ciber-físicos e seres humanos estão conectados através da Internet das Coisas e da Internet de Serviços. A interoperabilidade significa que todos os ciber-físicos dentro da fábrica são capazes de se comunicar uns com os outros.

3.2.1.2 Virtualização

significa que os sistemas ciber-físicos são capazes de monitorar processos físicos. Uma cópia real do mundo físico é realizada através de dados de sensores ligados a modelos de plantas virtuais e modelos de simulação. Assim, em caso de falha os operadores do sistema podem ser notificados.

3.2.1.3 Descentralização

A crescente demanda por produtos individuais torna a centralização cada vez mais difícil. Computadores embarcados permitem que sistemas ciber-físicos tomem decisões por conta própria. Apenas em casos de falha as tarefas são delegadas a um nível superior. Dessa forma, a descentralização é a capacidade dos sistemas ciber-físicos tomarem decisões por conta própria dentro das fábricas inteligentes.

3.2.1.4 Análise de dados em tempo real

Para a organização dos afazeres é necessário que os dados sejam coletados e analisados em tempo real. Assim, a planta pode reagir à falha de uma máquina e reencaminhar os produtos para outra máquina [13]. A análise de dados em tempo real é aqui entendida como a capacidade de coletar e analisar dados e fornecer *insights* imediatamente.

3.2.1.5 Orientação a Serviços

Em linhas gerais, pode-se dizer que a Orientação a Serviços é a oferta de serviços de empresas, sistemas ciber-físicos e seres humanos através da Internet de Serviços. Um exemplo clássico é a customização de um produto de acordo com a demanda de um determinado cliente.

3.2.1.6 Modularização

Sistemas modulares são capazes de adaptar-se com flexibilidade às mudanças nos requisitos de substituição ou expansão de módulos individuais. Portanto, os sistemas modulares podem ser facilmente ajustados em caso de flutuações sazonais ou se as características do produto forem alteradas. Então, modularização é a adaptação flexível das fábricas inteligentes para mudanças de requisitos, substituindo ou expandindo módulos individuais.

3.2.2 *Toolbox Industrie 4.0*

Os professores Reiner Anderl e Jürgen Fleischer [14] sugerem a utilização de um guia de orientação, que recomenda a abordagem da prática *Toolbox Industrie 4.0*. Esta metodologia foi desenvolvida pela *Association of German Federation Engineering* (Associação da Federação Alemã de Engenharia), com a coordenação daqueles autores. Essa abordagem tem por principal objetivo analisar competências específicas da empresa, para derivar casos de uso de implementação e ideias para novos modelos de negócios. Segundo os autores, a *Toolbox* (ou “Caixa de Ferramentas”, em português) incentiva a adaptação individual do processo e deve-se ser pensado da seguinte maneira: “o usuário sempre tem que ver o próximo desenvolvimento em direção à visão 4.0 no contexto do seu caso, de acordo com sua realidade.

A Indústria 4.0 pode ser subdividida em duas frentes. Existe o produto e a linha de produção da I4.0, por isso Reiner e Fleischer desenvolveram o *Toolbox* de Produto e o *Toolbox* de Industria. Nesta subseção são apresentados os conceitos relativos à implementação na indústria, uma vez que o produto gerado pela usina da WA é a **energia**, que é um “produto” bem estabelecido e regulado pela ANEEL, tanto em termos de níveis de tensão, quanto a frequência e controle geral da geração, transmissão e distribuição no Brasil.

Para implementar um modelo de produção baseado na Industria 4.0 é necessário investimentos de custo alto, porém, segundo os especialistas Blanchet e Rinn [15], da **Roland Berger**, empresa de Consultoria Industrial sediada na Alemanha, após o tempo retorno de investimento do projeto, a redução de custos na linha de produção pode ficar em torno de 50%. Para o caso em particular da usina proposta pela WA, no momento não é possível saber com exatidão de quanto seria esta redução de custos, uma vez que o projeto está parado aguardando liberação de licenças ambientais e a documentação completa da planta ainda não foi fornecida para análise.

O *Toolbox* de Produção tem como modelo de trabalho a caixa de ferramentas mostrada na Figura 7. Através dessa ferramenta faz-se uma análise utilizando um passo a passo do que deve ser implementado para que a linha de produção seja considerada de acordo com a Industria 4.0. Ela é estruturada em seis camadas de aplicação e cinco classes de desempenho. As camadas de aplicação indicam possíveis áreas de implementação para a Industrie 4.0, já as classes de desempenho identificam possibilidades de implementação em potencial. Quanto maior for a classe de desempenho, mais próximo da visão Industrie 4.0 se está.

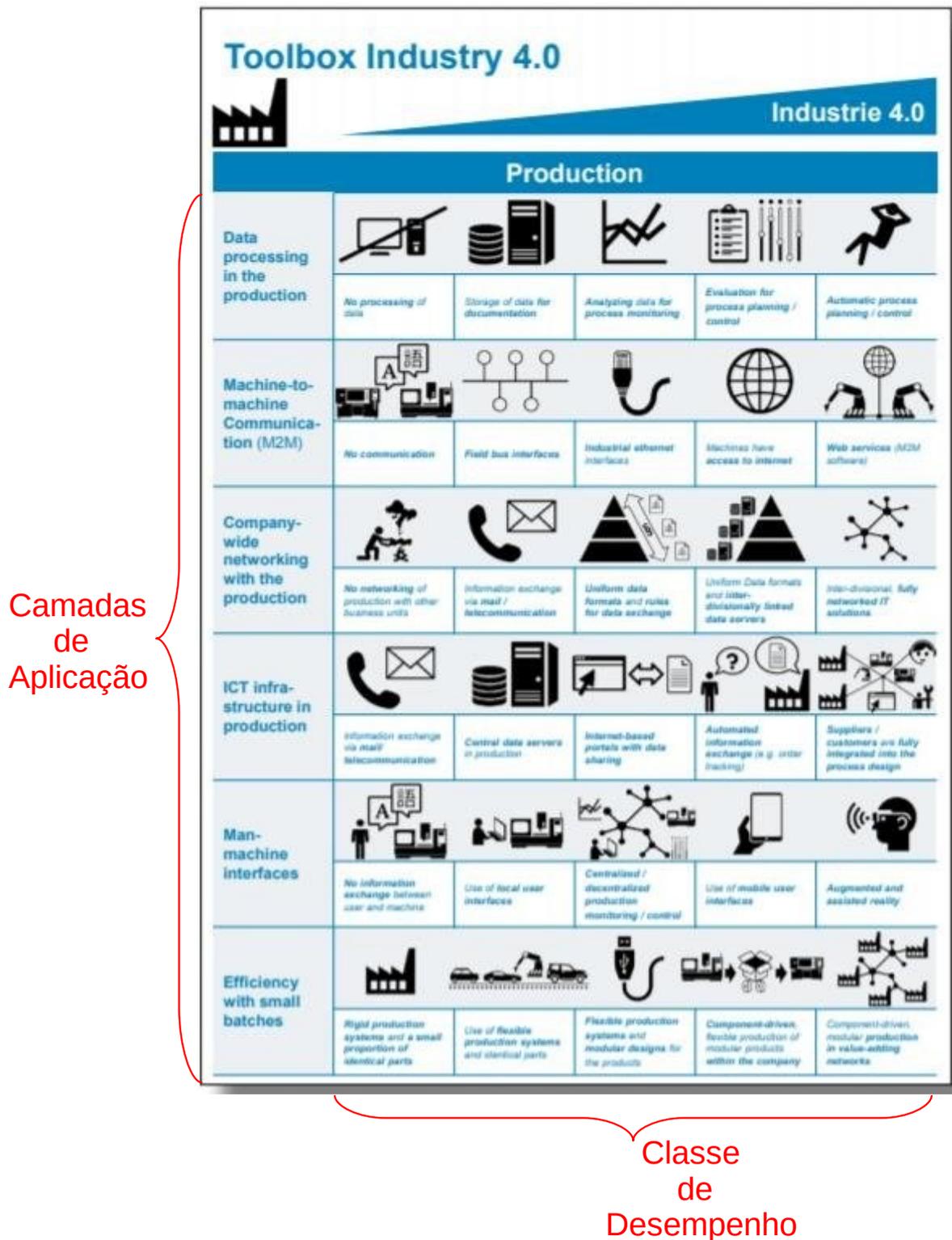


Figura 7: Visão da *Toolbox Industrie 4.0*. Fonte: adaptado de [14].

O objetivo dessa estratégia é, através da análise de competências, identificar as competências existentes da Indústria 4.0 na empresa analisada. Primeiro é realizada uma análise sobre informações fornecidas pela empresa e levantamento sobre as competências

da mesma. Nessa etapa é possível identificar o estágio tecnológico da empresa, ou seja, em qual classe de desempenho cada uma das camadas de aplicação se encontra na empresa. Por fim, é preciso definir objetivos estratégicos com base na Toolbox Industrie 4.0. Nessa etapa pode ser realizado um *brainstorming* para identificar objetivos e traçar estratégias para atingi-los. Feito isto, a empresa estará mais próxima da visão da Industrie 4.0, podendo implementá-la com maior precisão.

A primeira coluna aborda tema principal a ser implementado, a segunda coluna mostra como é uma Indústria que não está de acordo com a indústria 4.0, da terceira em direção a última coluna será apresentado um passo a passo de como atingir o tema principal que deve ser implementado para que a fábrica possa ser considerada uma Industria 4.0. Essas seis camadas de aplicação são apresentadas na subseções que seguem.

3.2.2.1 Processamento de dados na Produção

A Figura 8 apresenta uma imagem da primeira camada de aplicação. A primeira coluna trata do quesito Processamento de Dado na Produção, que consiste em monitorar, documentar planejar e controlar o processo de produção enquanto ocorre o processo produtivo de fabricação de produtos. Sendo assim, na segunda coluna observa-se que uma indústria que não possui ferramentas da Industria 4.0 possui uma linha de produção sem nenhum processamento de dados.

A partir da terceira coluna a ferramenta indica que deve ser implementado algum modo digital de armazenar os dados para criar uma documentação. Em uma Industria 4.0 as máquinas da linha devem possuir essa capacidade de armazenamento de dados. Através dos dados que começaram a ser armazenados é possível realizar uma análise para monitoramento dos processos, a partir disso implementa-se controles para conseguir avaliar o planejamento de produção, por fim teremos um planejamento de produção automático.

3.2.2.2 Comunicação entre máquinas

Na Figura 9, a primeira coluna trata do quesito Comunicação entre Máquinas. Isto consiste em implementar comunicação entre as máquinas do setor através de barramentos e Interfaces de Ethernet industrial, sejam com ou sem fio, e a WEB. Com essas interfaces implementadas é possível aplicar diversos modos de controles, bem como permitir que as máquinas trabalhem de forma similar. Por exemplo, uma máquina pode evitar que aconteça o erro que ocorreu em outra durante seu processo produtivo, por ter recebido



Figura 8: Processamento de dados na produção. Fonte: adaptado de [14].

informação de falha da outra máquina. Sendo assim, na segunda coluna observa-se que uma fábrica que não possui comunicação entre máquinas, não está interligada com a metodologia da I4.0.

A partir da terceira coluna observa-se que o processo de comunicação entre máquinas pode iniciar através de linhas de comunicação simples e que posteriormente são aplicadas linhas de comunicação através de Ethernet (conexão por cabeamento estruturado), na quinta coluna é possível observar que as máquinas devem possuir comunicação sem fio, para finalmente serem aplicados Serviços de Web (M2M Softwares), que segundo Reiner Anderl e Jürgen Fleischer consiste em, através da comunicação, as máquinas conseguirem realizar melhorias nos processos, bem como nos produtos. Todos os produtos e equipamentos são providos de sensores capazes de se comunicar entre si, trazendo todas as especificações inerentes ao produto e equipamento. Dessa forma, a produção é toda automatizada e autônoma, com as máquinas se comunicando entre si e informações sendo transmitidas em tempo real.

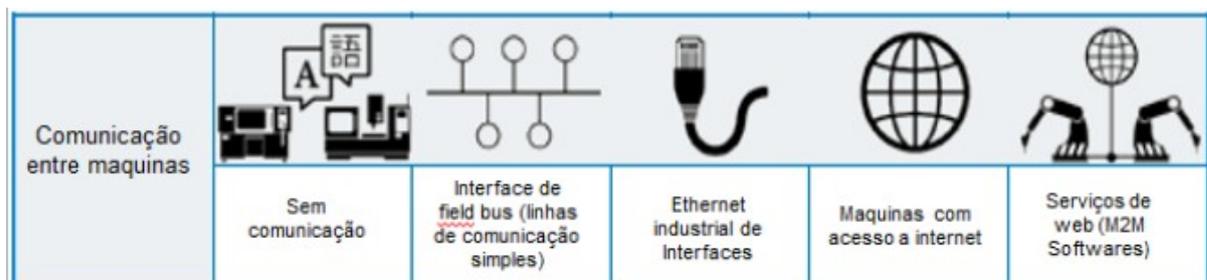


Figura 9: Comunicação entre máquinas. Fonte: adaptado de [14].

3.2.2.3 Produção Interligada Através de Rede com toda a Empresa

Na Figura 10, a primeira coluna avalia o quesito de que a Produção deve ser interligada por rede com toda a empresa. Segundo Reiner Anderl e Jürgen Fleischer, isso faz com que crie sinergia e evita duplicação de trabalho, facilitando a criação de soluções unificadas de TI e fluxos de trabalho padronizados. A segunda coluna mostra que uma empresa que não possui nenhuma solução de rede interligada com as unidades de negócio, está distante da implementação de ferramentas da Indústria 4.0.

Na terceira coluna observa-se que a interligação da produção através da rede pode começar com uma simples troca de informações por e-mail e, posteriormente, cria-se regras de padronização para a troca de informações. Após definir como os dados serão padronizados interliga-se a troca de dados com o servidor de rede da empresa, geralmente através de Sistemas Gerenciadores de Bases de Dados tradicionais. Por fim, para tomar as decisões estratégica da empresa deve-se ser instalado um Sistemas Gerenciadores de Bases de Dados de Big Data.

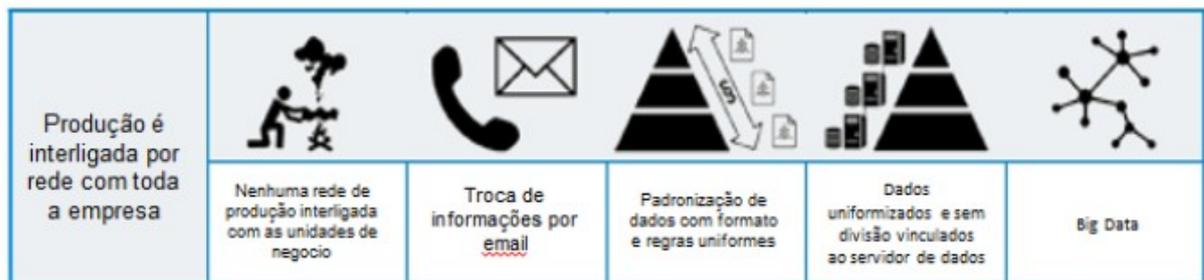


Figura 10: Produção Interligada Através de Rede com toda a Empresa. Fonte: adaptado de [14].

3.2.2.4 Infra-estrutura de Tecnologia da Informação e Comunicação dentro da linha de produção

Na Figura 11, a primeira coluna informa que deve existir uma infra-estrutura de Tecnologia de Informação e Comunicação dentro da linha de produção. Segundo Reiner Anderl e Jürgen Fleischer, isto se faz necessário para que ocorra a implementação de aplicações inovadoras e potenciais melhorias para processos organizacionais, sendo que deve ocorrer através de servidores de dados na produção, portais para compartilhamento de dados, automatização da informação dentro da produção, interligar os clientes e fornecedores com o processo.

A segunda coluna mostra que quando as informações são trocadas somente por e-mail,

esta produção não está de acordo com o que se espera de uma Indústria durante a I4.0 para esta camada. A partir da terceira coluna podemos ver a evolução de como devem ser implementado a infra-estrutura de TIC dentro da linha de produção. Primeiro deve-se instalar servidores de dados na produção, posteriormente interliga-se as informações dos servidores com portais para compartilhamento de dados. O penúltimo passo é um pouco mais complexo, pois é onde ocorre a automatização de toda a informação. Por último, essa informação é liberada para clientes e fornecedores, sendo assim, segundo Max Blanchet e Thomas Rinn (2016) ocorreria o seguinte processo, os fornecedores conseguiriam visualizar o consumo de matéria-prima, ocorrendo um fluxo automático para reposição. Os clientes conseguiriam visualizar a produção do produto, bem como seriam notificados assim que o item ficasse pronto.

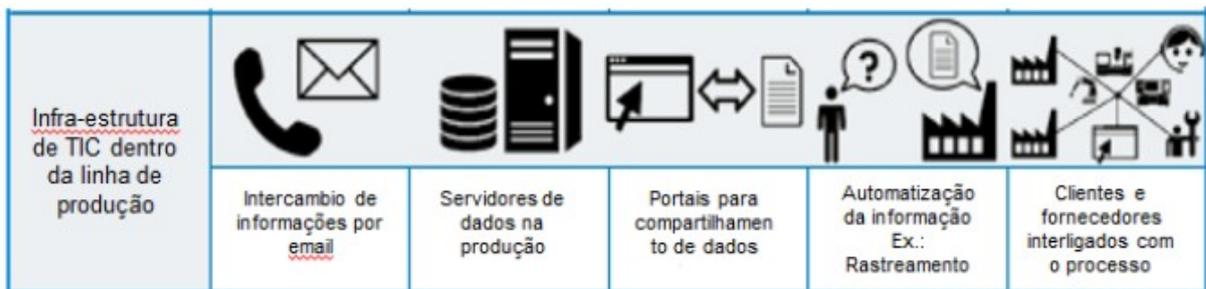


Figura 11: Infra-estrutura de Tecnologia da Informação e Comunicação dentro da linha de produção. Fonte: adaptado de [14].

3.2.2.5 Interface Homem-Máquina

Na Figura 12, a primeira coluna trata do quesito Interface entre Homem e Máquina, o qual é um dos pontos principais de uma Indústria 4.0. Segundo Reiner Anderl e Jürgen Fleischer, a Interface Homem/Máquina deve existir para simplificar a vida dos trabalhadores e permitir uma maior eficiência na produção. Ela deve ocorrer com a implementação de novos conceitos operacionais como monitoramento e controle centralizado e descentralizado, interfaces de uso móvel e realidade assistida.

Na segunda coluna observamos que uma Indústria que não está integrada com a I4.0 não possui nenhuma ligação de troca de informação entre o homem e a máquina, ou seja, o homem simplesmente opera o equipamento, como começou a ocorrer principalmente na 2ª Revolução Industrial. A partir da terceira coluna, começa-se a observar que iniciam as trocas de informações entre a máquina e homem com a criação de perfis de usuários, ocorrendo uma ligação entre a máquina e o Homem. Após, começa a ocorrer um monitoramento e controle centralizado e descentralizado, sendo possível visualizar a produção

fora da linha industrial, mas utilizando computadores.

O próximo passo é permitir que o Homem acesse as informações da máquina através de interfaces de uso móvel, como celulares e notepads, monitorar a produção, bem como tomar decisões de forma rápida, implementando ações corretivas ou alguma outra de acordo com a necessidade da máquina no momento. Por fim, ocorre a realidade assistida aumentada, como por exemplo, através de óculos 3D visualizar, interagir com a linha de produção e as máquinas, possibilitando tomar decisões, em qualquer lugar e a qualquer momento.

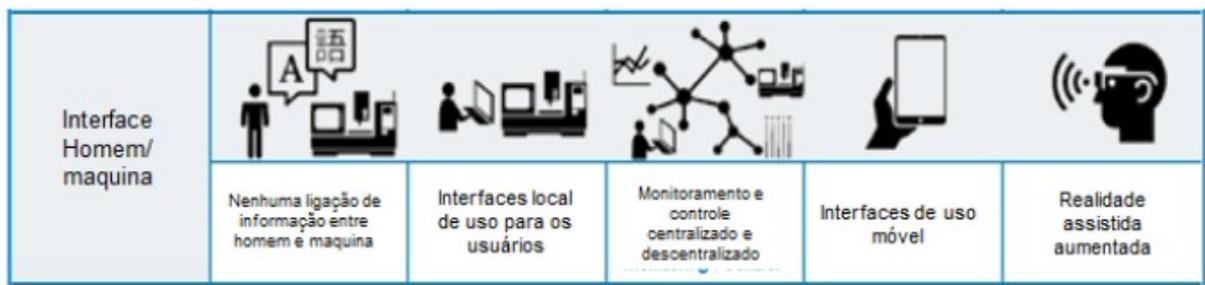


Figura 12: Interface Homem/Máquina. Fonte: adaptado de [14].

3.2.2.6 Eficiência para pequenos lotes

Na Figura 13, a primeira coluna aborda sobre a Eficiência para pequenos lotes e este é um dos tópicos essenciais para uma produção baseada na Indústria 4.0. Segundo, Reiner Anderl e Jürgen Fleischer, a eficiência em pequenos lotes nos permite alcançar maior eficiência, otimizando sempre a produção e possibilitando novos potenciais de crescimento. Isto ocorre através de sistema flexíveis de produção, partes idênticas nos produtos, além de produtos modulares.

Na segunda coluna é possível identificar uma indústria que não possui ferramentas da I4.0 implementadas, como uma indústria que possui um sistema rígido de produção e poucas (ou nenhuma) parte idênticas entre os produtos. A partir da terceira coluna começa-se a observar como deve funcionar uma fábrica a qual pretende implementar a Indústria 4.0. Primeiro deve ser implementado sistemas flexíveis de produção para partes idênticas, isto é aproveitar o máximo a mesma matéria-prima para a montagem dos produtos, mas com sistemas de produção flexíveis, que consiste em aproveitar o mesmo sistema para montar produtos diferentes. Por exemplo, utilizar um mesmo modelo de parafuso em produtos diversos, ou utilizar a mesma linha de montagem para montar diferentes produtos.

Posteriormente, na coluna quatro, podemos observar que além de aproveitar a matéria-prima devemos criar produtos que aproveitem o mesmo módulo, criando produtos modulares através de projetos modulares. Por exemplo: usar um mesmo padrão de embalagem de carregamento em diferentes produtos. Na quinta coluna observa-se que deve ser implementado um *component-driven* [16], o que consiste em um metodologia de desenvolvimento de componentes. Sendo assim, existe flexibilidade na montagem dos módulos, sem prejudicar os diferentes produtos que serão montados com eles. Por fim, observa-se o *component-driven* para produção modular, com valor agregado em redes. Essa integração em rede entre unidades fabris garante que não ocorrerá problemas na montagem do produto, mesmo se o módulo estiver alterado em uma determinada unidade fabril, pois a máquina similar instalada em outra unidade fabril é inteligente e capaz de alterar o módulo local de forma que não ocorra problemas na montagem do produto final.



Figura 13: Eficiência para pequenos lotes. Fonte: adaptado de [14].

3.3 Biomassa e Energia com Indústria 4.0

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com uma busca sistemática na literatura, no intuito de verificar o grau de originalidade da proposta de implementação de tecnologias da Indústria 4.0 em um usina de geração de energia limpa por biomassa.

3.3.1 Coleta de dados na literatura científica

Para esta etapa foi feita a busca na literatura científica de estudos sobre a temática de interesse, priorizando a publicação de artigos científicos. Como critérios para entrarem na revisão, foi estabelecido que:

- Os livros pesquisados deveriam prioritariamente ter menos de 10 anos de publicação, uma vez que o conceito de *4.0 Industrie* foi criado na Alemanha em 2011;

- Os artigos deveriam prioritariamente ter menos de dez anos de publicação;
- Os artigos com mais de cinco anos de publicação seriam considerados apenas se fossem relevantes ou pioneiros no tema de pesquisa envolvendo fissuras e processamento de imagens; e
- Utilizar apenas bases bibliográficas científicas consideradas confiáveis no meio acadêmico.

Foi priorizada a busca em bases bibliográficas eletrônicas. Para a pesquisa, foram elaboradas chaves de busca para limitar os artigos de interesse. As chaves utilizadas estão apresentadas no Figura 14, assim como as bases eletrônicas consultadas. Optou-se por se fazer uma busca que associou Biomassa com energia e obrigatoriamente incluindo o conceito de indústria 4.0, verificando dessa forma a originalidade da proposta.

BASE DE PESQUISA	CHAVES DE BUSCA
ScieneDirect	<ul style="list-style-type: none"> • ("Biomass" OR "energy") AND "industry 4.0" • ("Biomass" AND "energy") AND "industry 4.0" • ("Methane" OR "energy") AND "industry 4.0" • ("Methane" AND "energy") AND "industry 4.0"
IEEEExplore	<ul style="list-style-type: none"> • ("Biomass" OR "energy") AND "industry 4.0" • ("Biomass" AND "energy") AND "industry 4.0" • ("Methane" OR "energy") AND "industry 4.0" • ("Methane" AND "energy") AND "industry 4.0"
Scielo	<ul style="list-style-type: none"> • ("Biomass" OR "energy") AND "industry 4.0" • ("Biomass" AND "energy") AND "industry 4.0" • ("Methane" OR "energy") AND "industry 4.0" • ("Methane" AND "energy") AND "industry 4.0"

Figura 14: Bases bibliográficas eletrônicas e estratégias de busca e referências. Do próprio autor.

Após as buscas, foram encontrados 954 artigos. Todos foram organizados e neles buscou-se por implementações de tecnologia 4.0 em usinas de geração de energia por biomassa. Após esta avaliação, percebeu-se que não havia nenhuma publicação específica, nem equivalente, ao que está sendo proposto para a usina em construção pela empresa partícipe. O que no nosso entendimento, a proposta do projeto definida como “Análise de viabilidade técnica para a implementação de tecnologias da Indústria 4.0 em uma usina de geração de energia limpa” pode ser considerada uma inovação, tanto para o segmento de geração de energia por biomassa quanto como contribuição técnico-científica no setor.

4 AVALIAÇÃO DAS POSSIBILIDADES TECNOLÓGICAS NO CONTEXTO DA USINA

A migração para o modelo Indústria 4.0 não precisa ser abrupta. Isso ficou evidenciado na literatura que preconiza uma avaliação inicial para determinar os “graus de maturidade” de uma organização. Mesmo tendo um projeto pré-aprovado e em andamento, foi possível identificar algumas possibilidades de implementação para a planta em questão, o que poderá ser feito posteriormente de acordo com o entendimento da empresa partícipe. Para que se tenha uma melhor compreensão do projeto da usina como um todo, a próxima seção apresenta alguns dados relativos às obras de implantação da mesma.

4.1 Contextualização da Usina da WA

A Usina da WA, em processo de implantação, está localizada na Rua João Schwartz nº 1470, bairro Barracão, no município de Gaspar/SC. A área de terreno total destinada para a construção da usina é de 3,5 *Ha*, e deverá ter em seu pleno funcionamento 1600 *m*² de área construída. A Figura 15 mostra um croqui da usina. A área na cor cinza claro representa (de modo figurativo) a área do terreno, sendo as demais figuras geométricas o conjunto de obras de infraestrutura de construção civil planejadas para a usina.

Uma parte significativa das construções indicadas na Figura 15 já está finalizada, sendo elas:

- Área 05 - Área administrativa, laboratórios e auditório;
- Área 04 - Área alocada para os geradores de energia e subestação;
- Áreas 02 e 03 - tanques fechados para reação de biomassa; e
- Água - lagoa de contenção com capacidade de até 3000 *m*³.

Outras áreas estão em fase avançada de construção ou em andamento. São elas:

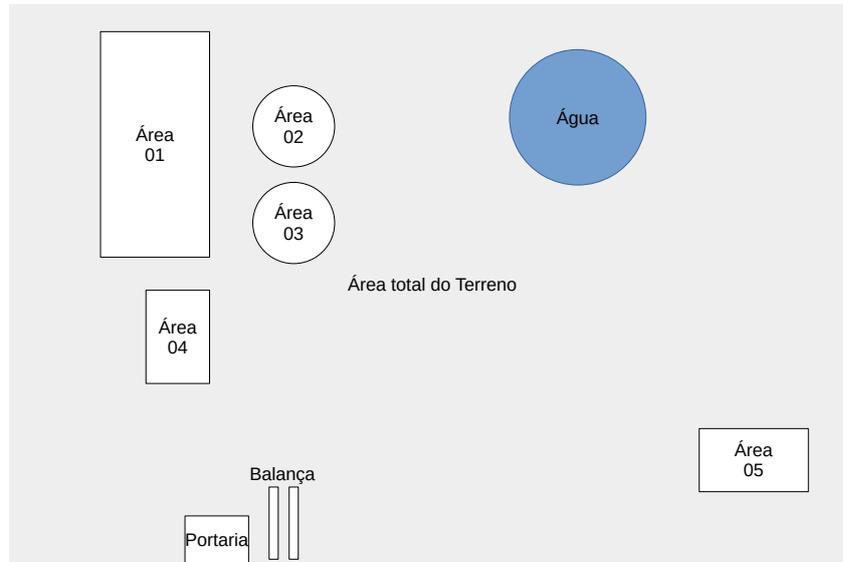


Figura 15: Croqui aproximado da área da usina (terreno) e áreas construídas. Fonte: Autor.

- Área 01 - Armazenamento de contêineres e higienização de caminhões;
- Portaria, para controle de acesso ao local da usina; e
- Balança para monitoramento de peso dos caminhões que entram na usina trazendo matéria prima (resíduos orgânicos).

4.1.1 Imagens da infraestrutura de construção civil

Durante a visita ao local da obra, no dia da reunião de *kickoff* do projeto, foi possível registrar algumas fotos digitais da infraestrutura de construção civil já em fase de implementação na usina. Nesta seção, o croqui estará associado a diferentes imagens das áreas construídas, como forma de registro do que pode ser constatado naquele momento.

A Figura 16 mostra a imagem do prédio onde fica a administração da usina, laboratórios e um auditório. As instalações físicas, incluindo energia e ar condicionado, foram entregues e estavam operacionais. Havia mobiliário na sala de reuniões, porém as demais dependências ainda estavam sem mobília até aquele momento. Na mesma imagem é possível identificar a Portaria, ponto de entrada e saída de pessoas e materiais na área da usina.

A Figura 17 mostra a edificação construída para abrigar as máquinas que irão gerar energia elétrica, a partir do gás metano gerado pelo processamento de biomassa. Até o dia na visita, os equipamentos ainda não haviam sido comprados, porém a equipe técnica

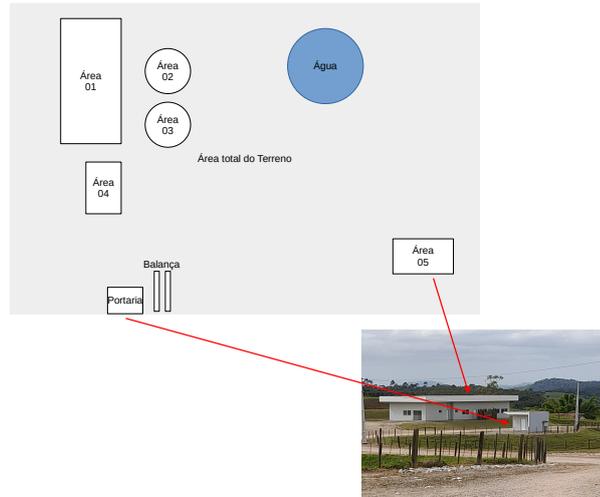


Figura 16: Foto da Administração, laboratórios e Auditório. Fonte: Autor.

da WA já estava em fase de orçamentação de dois modelos possíveis. Segundo o gerente da obra, a capacidade máxima esperada de geração de energia é de 1,8 MWh.



Figura 17: Foto da área onde ficarão alocados os equipamentos geradores de energia. Fonte: Autor.

Na Figura 18 é mostrada a imagem da área 03 do croqui. Ela refere-se a uma estrutura em concreto armado onde são depositados os materiais orgânicos que irão gerar as reações para produção de gás metano. São duas construções em formato cilíndrico, cada uma com

capacidade de armazenamento de até 4500 m^3 de material orgânico.

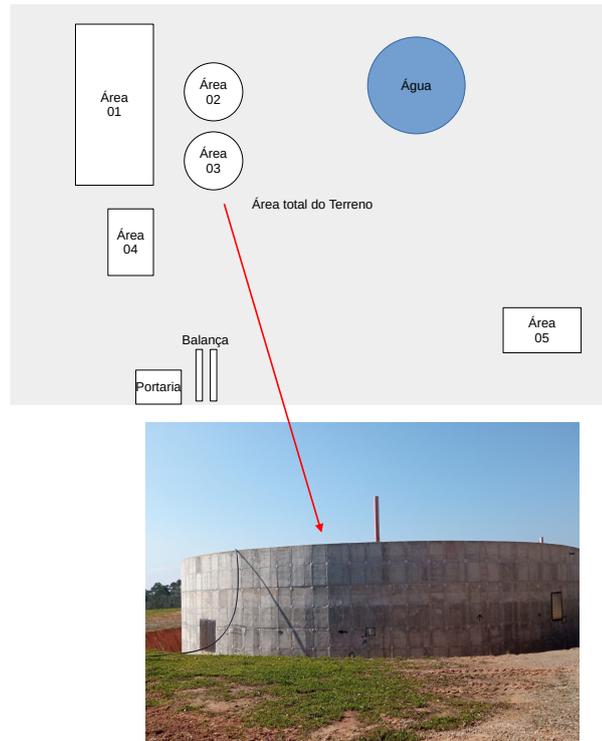


Figura 18: Foto de uma das estruturas em concreto armado para acumular a biomassa - reator. Fonte: Autor.

A Figura 19 apresenta uma imagem de outro ângulo das áreas 2 e 3, tendo ao fundo a construção na área 1, onde é feita a manutenção e higienização de máquinas e caminhões. Esta área ainda deve sofrer algumas alterações para que possa ser multifuncional para algumas operações da usina.

Na Figura 20 é mostrada uma imagem da lagoa de contenção construída pra recebimento do material final do processo de geração de gás. Este material residual depositado nesta lagoa é adequado par uso como fertilizante na agricultura. A empresa WA planeja uma expansão futura na planta para aproveitamento destes rejeitos e também produzir e comercializar este material fertilizante. A capacidade total da lagoa é de 3000 m^3 .

4.2 Análise da Usina em relação ao *Toolbox*

Nesta seção é apresentado um posicionamento do projeto original da usina em relação à Indústria 4.0. Este posicionamento refere-se às cinco “classes de desempenho” que cada uma das seis “camadas de aplicação” da ferramenta Toolbox de Produção (mostrado na Figura 7). As subseções a seguir descrever os critérios de avaliação e, ao final, uma tabela sumariza com o posicionamento atual da planta da usina em nosso entendimento.

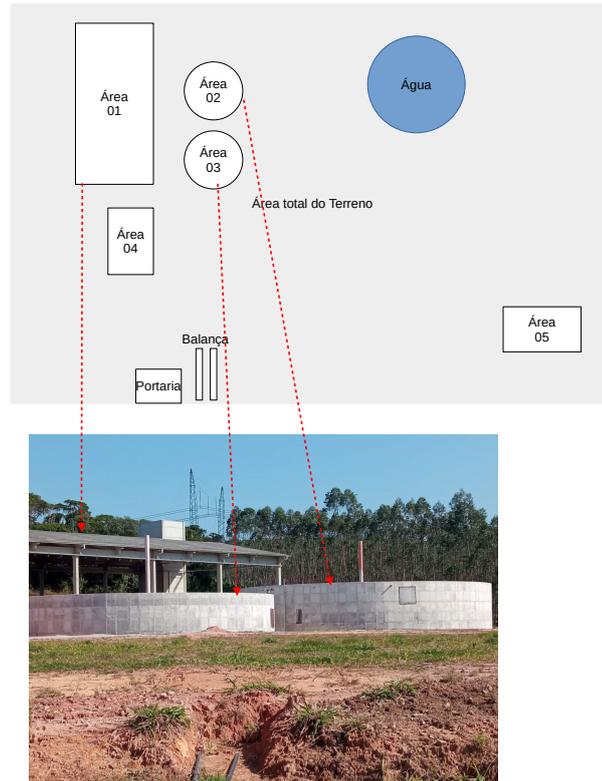


Figura 19: Foto das duas estruturas em concreto armado para acumular a biomassa, tendo a área 1 ao fundo. Fonte: Autor.

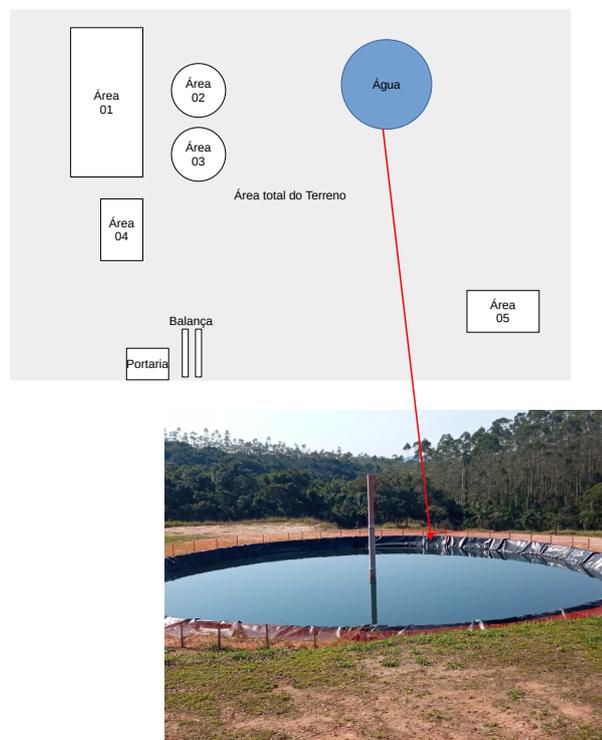


Figura 20: Foto da lagoa de retenção construída na área de usina para retenção de matéria orgânica final, oriunda do processo de geração de energia por biomassa. Fonte: Autor.

4.2.1 Processamento de dados na Produção

Nesta camada a planta encontra-se em seu menor nível de maturidade possível. Não foi previsto no projeto original o armazenamento de dados do processo produtivo para fins de extração de dados com técnicas de inteligência artificial e focando na retroalimentação da produção. Os equipamentos que serão adquiridos, segundo dados privados da empresa partícipe, permitem o encaminhamento de dados de tempo real para armazenamento remoto, o que facilitará a migração para uma classe de desempenho superior.

4.2.2 Comunicação entre máquinas

Neste quesito, o posicionamento da planta também está em seu menor grau de maturidade possível. Apesar dos equipamentos permitirem o acesso remoto à eles para obtenção de dados originados por sensores nativos das máquinas, não há hoje uma comunicação entre “máquina para máquina” (M2M). Esse critério é importante num cenário onde duas ou mais usinas possam compartilhar em tempo real os dados de produção de energia. Tome-se como exemplo a situação na qual a empresa partícipe venha a construir duas ou mais usinas de geração de energia similares a esta. Se por algum motivo uma das usinas parar a produção por problemas técnicos, as outras usinas do grupo podem compensar a produção de energia temporariamente, de modo automático, enquanto a usina com problemas gera alerta de manutenção para a equipe técnica da empresa.

4.2.3 Conectividade da produção com o restante da Empresa

Conforme comentado anteriormente, os equipamentos de geração de energia a serem adquiridos para a planta da usina preveem a comunicação remota para aquisição de dados de seus sensores. Porém, estes dados não estão ainda relacionados com outras unidades de negócios da empresa partícipe. No primeiro momento estarão disponíveis apenas para técnicos da área de manutenção de máquinas.

Considerando que a empresa partícipe pretende gerar gás metano e biofertilizantes além de energia elétrica, os cenários de produção passam a ser mais dependentes do desempenho de cada unidade geradora, tornando a conectividade da produção com o restante da empresa um requisito fundamental para o planejamento, comercialização e redução de custos operacionais. Neste requisito, posicionamos este nível de aplicação em seu segundo grau de maturidade possível, onde a comunicação entre unidades de negócio demandará intervenção direta de seres humanos, como por exemplo troca de e-mail.

4.2.4 Infraestrutura de TI na Produção

A planta da usina fica numa região remota do município de Gaspar/SC e, segundo informações coletadas junto à equipe no local, o sinal de telefonia celular atuante é 3G com qualidade precária. A empresa providenciou uma conexão por fibra óptica junto a um provedor particular de internet para viabilizar a comunicação na usina. Os testes funcionais com essa nova conexão foram eficientes e dentro do esperado. Uma boa conectividade com a Internet é importante, porque as máquinas geradoras de energia demandam conexão IP para comunicação remota. Assim, foi previsto no projeto original apenas um ponto de rede junto ao equipamento gerador de energia, sem maiores detalhes de conexão.

Por certo apenas um ponto de conexão com a rede não se suficiente. Devem ser necessários outros serviços, também conectados, como segurança de acesso físico, sistema de segurança para conexão online, alarmes para monitoramento de incêndio, entre outros incluindo diferentes sensores no ambiente ou nos equipamentos, com a possibilidade de integração de todos esses serviços. Assim, por demandar serviços conectados a Internet, mesmo que ainda não integrados entre si, pode-se considerar que no projeto original haverá um servidor básico para dados nas instalações de produção, o que nos leva a considerar este nível de aplicação como partindo de um grau dois de maturidade.

4.2.5 Interface Homem-Máquina

Os equipamentos geradores de energia a serem adotados permitem que o seu monitoramento e alguns de seus acionamentos possam ser realizados de forma remota, através de uma conexão IP. Esse monitoramento é realizado através de uma aplicação web desenvolvida pelo fabricante e não permite alterações nem incrementos de novos serviços. Esta aplicação deve ser acessada por um técnico que faz as requisições de leituras e/ou acionamentos. Ou seja, a aplicação não é pró-ativa no sentido de realizar ações de controle sobre os equipamentos em caso de necessidade iminente. Isso só acontece por ação direta da pessoa responsável que fará o monitoramento remoto. Essa camada precisará ser amplamente implementada e explorada para atender o conceito de produção em Indústria 4.0, como o monitoramento de frota de caminhões coletores, planejamento de coleta de acordo com a sazonalidade de material orgânico disponível, além de outras atividades de produção e administração da planta.

4.2.6 Eficiência para pequenos lotes

A eficiência em pequenos lotes deverá ocorrer quando a usina iniciar a produção subprodutos como fertilizantes e gás metano para comercialização. A planta deve começar a operar nos dois primeiros anos apenas com a geração de energia elétrica e gás metano para consumo interno da operação. Uma vez estabilizados esses dois processos iniciais, uma nova rodada de investimentos deve ser feita na planta para implementar o modelo de negócios para a comercialização, tanto do gás quanto dos potenciais fertilizantes. Entende-se aqui que, uma análise mais apurada deverá ser feita para orientar a inclusão ou alteração de tecnologias para enquadrar os novos processos no conceito de Indústria 4.0 quando ocorrerem os futuros investimentos.

4.2.7 Posicionamento da Planta no Toolbox

O Quadro 1 apresentado a seguir posiciona a planta da usina de geração de energia analisada no contexto da *Toolbox Industrie 4.0*, no requisito **Produção**, conforme solicitação de projeto. Pode-se observar que das seis camadas de aplicação da *Toolbox* quatro ainda não foram implementadas ou previstas no projeto original e, por esse motivo, estão posicionadas na primeira coluna do Quadro, referente as condições de uma “fábrica sem ferramentas da indústria 4.0”.

Apenas duas camadas estão posicionadas com algum nível de qualificação. A primeira delas é a Infraestrutura de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) dentro da linha de produção. Ela está posicionada no primeiro nível porque está previsto no projeto original um ponto de rede junto aos equipamentos geradores de energia. Porém, é importante deixar claro que ter um ponto de acesso a Internet é apenas uma premissa mínima para que a infraestrutura de TIC possa vir a ser adequadamente estabelecida. Assim, entende-se que é um item não implementado mas com visível condição de evolução.

A segunda camada com algum nível de qualificação é referente a Interface Homem-máquina. O fabricante do equipamento fornece uma aplicação WEB com capacidade para que se tenha algum monitoramento e alguns níveis de atuação sobre os equipamentos. Por isso é possível admitir que o projeto atual possui um nível mínimo de monitoramento e controle centralizado no que diz respeito à atuação e acompanhamento de sua operação em nível de equipamento. O que deve ser devidamente planejado é a gestão de informações vindas de toda a cadeia produtiva, incluindo a matéria prima para compostagem na usina em termos de sua logística e sazonalidade.

QUADRO 1 – POSICIONAMENTO DO PROJETO ATUAL NA TOOLBOX INDUSTRIE 4.0 – PRODUÇÃO						
Item necessário em uma Indústria 4.0	Coluna referente a fábrica sem ferramentas da Indústria 4.0	Armazenamento de dados para documentação	Monitoramento de processos	Controle para avaliação de planejamento de processos	Planejamento, controle e processo automático	Colunas de itens de uma fábrica com ferramentas da Indústria 4.0. Geralmente os itens são evolutivos.
Processamento de Dados na Produção	Nenhum processamento de Dados X					
Comunicação entre Máquinas	Sem comunicação X	Interfaces <i>Field Bus</i>	Interface de Ethernet Industrial	Máquinas com acesso a internet	Serviços de WEB (M2M, software)	
Produção é Interligada por rede por toda a empresa	Nenhuma rede de produção interligada com as unidades de negócios X	Troca de Informações por e-mail	Padronização de dados com regras e dados uniformes	Dados uniformizados e sem divisões vinculadas ao servidor de dados	Big Data	
Infraestrutura de Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC) dentro da linha de produção	Intercambio de informações por e-mail X	Servidores de dados na produção	Portais para compartilhamento de dados	Automatização da Informação	Clientes e fornecedores interligados com o processo	
Interface Homem/Máquina	Nenhuma ligação de informação entre homem e máquina X	Interface local de uso para os usuários	Monitoramento e controle centralizado e descentralizado	Interfaces de uso móvel	Realidade assistida aumentada	
Eficiência para pequenos lotes	Sistema rígido de produção e pequena proporção de partes idênticas X	Utilização de sistemas flexíveis de produção e partes idênticas	X Sistema de produção flexível e projetos modulares para produtos	Component-driven, produção flexível de produtos modulares dentro da empresa	Component-driven, produção modular em valor agregado de redes	

LEGENDA

► Item em evolução ou item não implementado

X

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste projeto foi fazer um mapeamento de uma planta de usina para geração de energia elétrica por compostagem, já em andamento, para avaliar seu posicionamento em relação às tecnologias da Indústria 4.0. A ideia da empresa partícipe foi antecipar os desenvolvimentos futuros que seriam necessários para tornar a usina em um modelo de inovação e eficácia.

Para atingir este objetivo, inicialmente foi feita uma revisão da literatura com três abordagens distintas. Na primeira abordagem, foi feito um levantamento geral na literatura para contextualizar as tecnologias necessárias na implementação do conceito I4.0 e o que se espera de sua interconexão. A ideia foi apontar as tecnologias que deverão ser mais detalhadamente avaliadas no momento de uma implementação efetiva na planta da usina. Num segundo momento foi feito um levantamento de técnicas para posicionar o projeto da usina na concepção I4.0. A ferramenta que nos pareceu mais adequada é a aplicação de *Toolbox para Produção*, pois ela permite um posicionamento da planta proposta e permite que sejam levadas em conta particularidades de cada processo, atendendo à expectativa da empresa partícipe nesse projeto.

Este estudo não teve a participação de estudantes por ser uma atividade de avaliação técnica para ser feita num curto espaço de tempo. O envolvimento de estudantes demanda um tempo maior para que eles possam adequar as atividades de pesquisa com as demais obrigações acadêmicas. A participação de alunos bolsistas de graduação e/ou mestrado se justificará quando a empresa partícipe entender que mais investimentos deverão ser realizados para implementar tecnologias que posicionem a usina em um nível de evolução superior como Indústria 4.0.

Por fim, é importante destacar que a aplicação de conceitos I4.0 diretamente em uma usina de geração de energia por biomassa pode ser considerado pioneiro, pois não encontramos publicações diretamente relacionadas ao tema até o momento. Esse é um ponto interessante de ser explorado, pois sabe-se que redução em processos de produção (de um modo geral) pode ter redução de custos de até 50% segundo alguns autores [15].

Poderemos verificar isso nos processos da empresa partícipe, uma vez que além de energia e gás, a empresa pretende futuramente vender como sub-produtos os fertilizantes obtidos no processo de geração.

REFERÊNCIAS

- [1] LIMA, F. R.; GOMES, R. Conceitos e tecnologias da indústria 4.0: uma análise bibliométrica. *Revista Brasileira de Inovação*, SciELO Brasil, v. 19, 2021.
- [2] SOUSA, J. C. S. d. Indústria 4.0: fundamentos, perspectivas e aplicações. Centro de Ciências Exatas e Naturais-CCEN, 2022.
- [3] SANTOS, M. M. D.; LEME, M. O.; JUNIOR, S. L. S. *Indústria 4.0: fundamentos, perspectivas e aplicações*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2018.
- [4] PESSOA, C. R. M. et al. A internet das coisas: Conceitos aplicações, desafios e tendências. In: *13th International Conference on Information Systems and Technology Management-Contecsi*. [S.l.: s.n.], 2016.
- [5] SOARES, M.; COUTINHO, Í.; NETO, M. T. R. Interação entre iiot e indústria 4.0 com a gestão de projetos. *Percurso Acadêmico*, v. 10, n. 19, p. 1–13, 2020.
- [6] AKKAYA, I. et al. Systems engineering for industrial cyber-physical systems using aspects. *Proceedings of the IEEE*, v. 104, n. 5, p. 997–1012, 2016.
- [7] RIEDESEL, J. *Software Telemetry: Reliable logging and monitoring*. [S.l.]: Simon and Schuster, 2021.
- [8] WALTER, K.-D. Implementing m2m applications via gprs, edge and umts. *White paper—M2M Alliance*, 2009.
- [9] BOSWARTHICK, D.; ELLOUMI, O.; HERSENT, O. *M2M communications: a systems approach*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.
- [10] SWETINA, J. et al. Toward a standardized common m2m service layer platform: Introduction to onem2m. *IEEE Wireless Communications*, IEEE, v. 21, n. 3, p. 20–26, 2014.
- [11] WANG, Y.; TRAN, T.; ANDERL, R. Toolbox approach for the development of new business models in industrie 4.0. In: *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*. [S.l.: s.n.], 2018. v. 2, p. 682–690.
- [12] HERMANN, M. et al. Design principles for industrie 4.0 scenarios: a literature review. *Technische Universität Dortmund, Dortmund*, v. 45, p. 1–15, 2015.
- [13] SCHLICK, J. et al. Industrie 4.0 in der praktischen anwendung. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung· Technologien· Migration*, Springer, p. 57–84, 2014.
- [14] ANDERL, R. Industrie 4.0-advanced engineering of smart products and smart production. In: *Proceedings of international seminar on high technology*. [S.l.: s.n.], 2014. v. 19.

- [15] BLANCHET, M.; RINN, T. Think act beyond mainstream: The industrie 4.0 transition quantified. how the fourth industrial revolution is reshuffling the economic, social and industrial model. *München: Roland Berger GmbH*. http://www.rolandberger.de/media/pdf/Roland_Berger_Industry_4-0_20160425.pdf. *Zugegriffen am*, v. 3, p. 2016, 2016.
- [16] XU, Z. et al. A data-driven approach for constructing the component-failure mode matrix for fmea. *Journal of Intelligent Manufacturing*, Springer, v. 31, p. 249–265, 2020.