



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Gabriel Josias Minhoni

**Caracterização e análise espacial do potencial energético de resíduos
industriais catarinenses como estratégia de descarbonização**

Florianópolis

2026

Gabriel Josias Minhoni

Caracterização e análise espacial do potencial energético de resíduos industriais catarinenses como estratégia de descarbonização

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em engenheiro sanitário e ambiental.

Orientador: Prof. Armando Borges de Castilhos Junior, Dr.

Coorientadora: Marília Medeiros Machado, MSc.

Florianópolis
2026

Minhoni, Gabriel Josias

Caracterização e análise espacial do potencial energético de resíduos industriais catarinenses como estratégia de descarbonização / Gabriel Josias Minhoni ; orientador, Armando Borges de Castilhos Junior, coorientador, Marília Machado Medeiros, 2026.

80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Resíduos Industriais. 3. Recuperação Energética. 4. Descarbonização. I. Junior, Armando Borges de Castilhos. II. Medeiros, Marília Machado. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Gabriel Josias Minhoni

Caracterização e análise espacial do potencial energético de resíduos industriais catarinenses como estratégia de descarbonização

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel e aprovado em sua forma final pelo Curso Engenharia Sanitária e Ambiental.

Local Florianópolis, 03 de julho de 2026.

Insira neste espaço
a assinatura

Coordenação do Curso

Banca examinadora

Insira neste espaço
a assinatura

Prof. Armando Borges de Castilhos Junior, Dr.
Orientador

Insira neste espaço
a assinatura

Prof. Matheus Cavali, Dr.
Universidade de São Paulo

Insira neste espaço
a assinatura

Simone Kubeneck, MSc.
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, ao ensino público, gratuito e de qualidade da Universidade Federal de Santa Catarina, por proporcionar uma educação de excelência.

Aos meus professores do departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental pelas aulas ministradas e pelos conhecimentos transferidos, sobretudo ao meu orientador Armando que me proporcionou grandes oportunidades na academia.

Aos meus colegas do LARESO, Jonathan, José, Maria, Marília, Marina, Matheus, Luiza, Simone, Igor, Gabriela, Leonardo e Júlia, pelas conversas e trocas de conhecimento, além dos momentos de descontração no meio de tanto trabalho.

A minha família que me deu apoio enquanto estive na graduação, a minha irmã Hannah, minha mãe Jaqueline, meu Pai Rogério e a Andreia, minhas avós, meus primos e tios, ao meu afilhado Pedro que acabou de nascer e ao meu avô Nelson que me acompanhou de cima.

Aos meus amigos que fiz durante a graduação, começando com o grupo dos meus amigos que fiz desde o início e que levarei para a vida, Lucas, Flávia, Manu, Sérgio e Bárbara, meu afilhado de graduação Marcos, Ezequiel, ao meu companheiro do vôlei Marcelo, a Júlia, ao José, meu camarada de luta.

Aos meus amigos que fiz no intercâmbio, Pedro, Juan, Fernando e Isabele, que viraram minha família, enquanto a minha estava em outro continente. Aos meus colegas do Master em Déchets da ENGEES, aos professores e aos meus colegas do Laboratoire ICUBE.

À WST, empresa que me acolheu para a realização do estágio, aos colegas de trabalho, ao meu supervisor de estágio Christian.

Ao CALESA e ao NEAmb que proporcionaram a execução de atividades em prol da comunidade, com educação ambiental e apoio à comunidade estudantil.

Aos meus amigos que não fizeram parte da minha graduação diretamente, mas me incentivaram, os Felipes, João, Alice, Denilson, Miras, Jony, o meu compadre Jhow, e aos gêmeos Lucas e André. À Luiza que me manteve lúcido durante o conturbado décimo semestre. E ao pessoal do Gatu's, Thiago, Carlos, Luan, Kauã e companhia que aliviaram os sábados à noite.

“Como eu vou saber, pobre arqueólogo do futuro, o que inquietamente procuro em minhas escavações do ar?”

- O Descobridor, Mario Quintana

RESUMO

A recuperação energética de resíduos industriais tem se consolidado como alternativa para redução da disposição em aterros, diversificação da matriz energética e mitigação das emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de recuperação energética dos resíduos industriais gerados em Santa Catarina a partir dos dados do Sistema de Controle de Movimentação de Resíduos e Rejeitos (MTR) referentes ao ano de 2024. Os resíduos foram agrupados conforme suas características físico-químicas e avaliados por meio do Sistema de Classificação e Avaliação Tecnológica de Resíduos (SCATR), desenvolvido com base em análise multicritério para determinar sua aptidão às tecnologias de biodigestão anaeróbia, incineração com recuperação energética e coprocessamento em fornos de clínquer. A partir dos índices de aptidão energética, das propriedades dos resíduos e das eficiências de conversão de cada tecnologia, foram estimados os potenciais energéticos e sua distribuição espacial no estado. Os resultados indicaram que aproximadamente 4 milhões de toneladas de resíduos apresentaram potencial para valorização energética, possibilitando a geração de cerca de 2.960 GWh por biodigestão, 2.674 GWh por incineração e 10.710 GWh de energia térmica por coprocessamento. A análise espacial evidenciou a concentração do potencial de biodigestão no oeste catarinense e dos potenciais de incineração e coprocessamento nas regiões de maior atividade industrial. Além disso, a recuperação energética dos resíduos avaliados apresentou potencial para evitar aproximadamente 3,6 milhões de toneladas de CO₂ equivalente por ano, considerando a substituição de fontes fósseis de energia e o desvio de resíduos biodegradáveis dos aterros. Os resultados demonstram que a valorização energética pode contribuir significativamente para a gestão sustentável dos resíduos industriais e para as estratégias de descarbonização em Santa Catarina.

Palavras-chave: resíduos industriais; recuperação energética; biodigestão anaeróbia; coprocessamento; incineração; emissões de gases de efeito estufa.

ABSTRACT

Energy recovery from industrial waste has emerged as an important strategy for reducing landfill disposal, diversifying the energy matrix, and mitigating greenhouse gas emissions. In this context, this study aimed to assess the energy recovery potential of industrial waste generated in the state of Santa Catarina, Brazil, using data from the Waste Transportation Manifest System (MTR) for the year 2024. Waste streams were grouped according to their physicochemical characteristics and evaluated through the Waste Classification and Technological Assessment System (SCATR), developed based on a multicriteria analysis approach to determine their suitability for anaerobic digestion, waste-to-energy incineration, and co-processing in cement kilns. Based on energy suitability indices, waste properties, and technology-specific conversion efficiencies, the energy recovery potential and its spatial distribution across the state were estimated. The results indicated that approximately 4 million tonnes of industrial waste presented potential for energy recovery, enabling the generation of about 2,960 GWh through anaerobic digestion, 2,674 GWh through incineration, and 10,710 GWh of thermal energy through co-processing. Spatial analysis revealed a concentration of anaerobic digestion potential in western Santa Catarina, while the highest incineration and co-processing potentials were associated with major industrial regions. Furthermore, the assessed waste streams showed the potential to avoid approximately 3.6 million tonnes of CO₂ equivalent per year through the replacement of fossil energy sources and the diversion of biodegradable waste from landfills. The findings demonstrate that energy recovery can significantly contribute to sustainable industrial waste management and support decarbonization strategies in Santa Catarina.

Keywords: industrial waste; energy recovery; anaerobic digestion; co-processing; waste-to-energy incineration; greenhouse gas emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa dos Setores Industriais Catarinenses.....	20
Figura 2: Fluxograma da metodologia.....	36
Figura 3: Mapa do potencial energético para incineração.....	59
Figura 4: Mapa do potencial energético para biodigestão.....	60
Figura 5: Mapa do potencial energético para coprocessamento.....	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Níveis de importância por critérios bibliográficos	53
Quadro 2: Níveis de importância por tecnologia e por parâmetro	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Potencial calorífico de referência por tipo de resíduo industrial	29
Tabela 2: Critérios quantitativos de referência para avaliação de aptidão tecnológica	30
Tabela 3: Eficiências de conversão energética por tecnologia.....	31
Tabela 4: Fatores de emissão por tecnologia.....	33
Tabela 5: Limites de emissão atmosférica por poluente e legislação aplicável (valores em mg/Nm ³ , base seca, salvo indicação).....	34
Tabela 6: Pesos (w_i) atribuídos a cada parâmetro por tecnologia de recuperação energética.....	43
Tabela 7: Quantidade de resíduos em toneladas gerada em 2024 por grupo	49
Tabela 8: Quantidade de resíduos gerado por município e o grupo de maior geração para os 10 maiores municípios geradores	50
Tabela 9: Parâmetros médios físico-químicos por grupo de resíduos.....	51
Tabela 10: Parâmetros químicos por grupo de resíduos.....	51
Tabela 11: Produção de biogás média por grupo de resíduo.....	52
Tabela 12: PCIs médios por grupo de resíduo	52
Tabela 14: Valores da função de adequação por grupo e parâmetro	54
Tabela 15: Índices de aptidão energética por grupo de resíduos.....	55
Tabela 16: Eficiências de conversão elétrica e térmica de cada tecnologia.....	56
Tabela 17: Potencial energético por tecnologia.....	56
Tabela 18: Top 5 municípios com potencial energético de biodigestão	57
Tabela 19: Top 5 municípios com potencial energético de incineração	58
Tabela 20: Top 5 municípios com potencial energético de coprocessamento	58
Tabela 21: Emissões evitadas pela recuperação energética	62
Tabela 22: Emissões evitadas pelo desvio de aterro	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABREMA	Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente
BMP	Potencial Bioquímico de Metano (Biochemical Methane Potential)
BAT	Best Available Techniques
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
CH ₄	Metano
CHP	Combined Heat and Power (Cogeração de Calor e Energia)
C/N	Relação Carbono/Nitrogênio
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ eq	Dióxido de Carbono Equivalente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPA	Controle da Poluição Atmosférica
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FEAM	Fundação Estadual do Meio Ambiente
FIESC	Federação das Indústrias do Estado de Santa Catarina
GHG	Greenhouse Gas
GEE	Gases de Efeito Estufa
IAE	Índice de Aptidão Energética
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
IEA	International Energy Agency
IGES	Institute for Global Environmental Strategies
IMA	Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina
IN	Instrução Normativa
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
MTR	Manifesto de Transporte de Resíduo
PCI	Poder Calorífico Inferior

PERS	Plano Estadual de Resíduos Sólidos
PLANARES	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RDF	Refuse Derived Fuel
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SCATR	Sistema de Classificação e Avaliação Tecnológica de Resíduos
SEEG Estufa	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
SO ₂	Dióxido de Enxofre
SV	Sólidos Voláteis
USEEIO	United States Environmentally Extended Input-Output
WLC	Weighted Linear Combination

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1.	CARACTERÍSTICAS DA INDÚSTRIA CATARINENSE.....	18
2.2.	GESTÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS EM SANTA CATARINA	20
2.2.1.	Sistema MTR e monitoramento dos resíduos industriais	21
2.3.	VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS: CONCEITOS E DEFINIÇÕES.....	23
2.4.	TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA	24
2.4.1.	Incineração.....	24
2.4.2.	Coprocessamento em Fornos de Clínquer	25
2.4.3.	Biodigestão Anaeróbia	26
2.4.4.	Tecnologias não contempladas neste estudo	27
2.4.5.	Relação das tecnologias com os resíduos	28
2.5.	PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DOS RESÍDUOS INDUSTRIAIS.....	29
2.6.	EMISSÕES DE GEE E POTENCIAL DE DESCARBONIFICAÇÃO	31
2.7.	GARGALOS AMBIENTAIS E CONTROLE DE EMISSÕES	33
3	METODOLOGIA	36
3.1.	BASE DE DADOS E AQUISIÇÃO DAS INFORMAÇÕES.....	36
3.2.	TRATAMENTO E PADRONIZAÇÃO DOS DADOS	37
3.3.	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS E AGRUPAMENTO	37
3.3.1.	Definição dos grupos operacionais	37
3.3.2.	Caracterização físico-química	38
3.4.	SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS (SCATR)	40
3.4.1.	Índice de Aptidão Energética (IAE)	40
3.4.2.	Determinação e hierarquização dos pesos	42

	3.5. ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA.....	44
	3.6. ESPACIALIZAÇÃO DO POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA 45	
	3.7. CÁLCULO DE EMISSÕES EQUIVALENTE CARBONO.....	47
4	RESULTADOS	49
	4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS INDUSTRIAIS GERADOS EM SANTA CATARINA.....	49
	4.2. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS POR GRUPO OPERACIONAL	50
	4.3. ÍNDICES DE APTIDÃO ENERGÉTICA (IAE)	53
	4.4. POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA.....	55
	4.5. ESPACIALIZAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO	57
	4.6. ESTIMATIVA DA MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES	61
5	CONCLUSÃO	64
6	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

A busca por recursos secundários e materiais recuperados a partir dos resíduos de atividades produtivas tem se intensificado, impulsionada tanto pela escassez de recursos primários quanto por fatores geopolíticos e ambientais (BRASIL, 2021). No entanto, o Brasil, e particularmente o estado de Santa Catarina, ainda apresenta baixo aproveitamento na recuperação de recursos, principalmente em razão da má gestão de resíduos, que carece de políticas e planos voltados a alternativas economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis (Crema et al., 2024).

É estimado que Santa Catarina libere aproximadamente 46,4 milhões de toneladas de dióxido de carbono anualmente (SEEG, 2023), das quais 41,2% estão relacionadas à produção e ao consumo de combustíveis e energia elétrica para transporte, indústria e agropecuária. Somado a isso, as emissões relacionadas ao tratamento de resíduos respondem por 3,45 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente, sendo que, a partir de 2010, ano de estabelecimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), houve um aumento de 41% nessas emissões (ABREMA, 2024).

A PNRS estabelece uma hierarquização no gerenciamento de resíduos, priorizando, nesta ordem, a não geração, a redução, a valorização e, por último, a destinação final. Diante disso, o aproveitamento energético de resíduos, entendido como uma alternativa de valorização, deve ser considerado após as etapas de não geração, redução e reciclagem. Essa estratégia, conhecida como *waste-to-energy* (WtE), tem se destacado como alternativa promissora na gestão de resíduos, envolvendo tecnologias de conversão térmica como incineração, pirólise, coprocessamento e produção de combustível derivado de resíduos (CDR) (BRASIL, 2021). Apesar desse potencial, a ausência de planejamento estratégico e de análises de viabilidade técnica e econômica pode tornar sua adoção desvantajosa, em função dos elevados custos de implantação e operação (FEAM, 2012).

Segundo o Atlas da Competitividade da Indústria Catarinense (FIESC, 2022), a economia industrial do estado é fortemente diversificada, com destaque para os setores cerâmico, têxtil, agroindustrial, metalmeccânico e de papel e celulose, cada um com distribuição territorial característica, o Oeste dominado pela agroindústria, e o Sul pela produção cerâmica. Essa especialização regional tem implicações diretas sobre a recuperação energética, a dimensão territorial é determinante para a viabilidade de projetos dessa natureza, uma vez que a espacialização do potencial energético permite identificar regiões prioritárias para implantação de empreendimentos, otimizar a logística, reduzir custos de transporte e subsidiar políticas públicas voltadas à economia circular e à transição energética (Da Silva et al., 2019).

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo analisar o potencial de recuperação energética dos resíduos industriais gerados em Santa Catarina a partir dos dados do sistema MTR. Para isso, propõe-se um sistema de classificação dos resíduos com base em parâmetros técnicos, como poder calorífico e teor de umidade, reorganizando-os em grupos operacionais e empregando análise multicritério para determinar sua aptidão frente às tecnologias de biodigestão anaeróbia, incineração com recuperação energética e coprocessamento em fornos de clínquer. O potencial energético identificado é então espacializado, e complementado por um balanço comparativo das emissões de CO₂ equivalente entre o cenário atual de disposição e um cenário hipotético de aproveitamento energético. Com isso, busca-se fornecer subsídios técnicos para o planejamento da gestão de resíduos industriais no estado, contribuindo para estratégias de descarbonização e de transição para uma indústria de baixo carbono.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o potencial da utilização dos resíduos da indústria catarinense como fonte energética através dos registros do MTR.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Analisar os tipos e volume de resíduos industriais gerados em Santa Catarina a partir dos dados do MTR, caracterizando-os com base em propriedades multicritério relevantes para recuperação energética.
2. Classificar os resíduos industriais, segundo suas propriedades e viabilidade operacional em tecnologias de recuperação energéticas, associando-os a tecnologias adequadas de conversão,
3. Estimar o potencial energético e a quantidade de resíduos recuperados.
4. Analisar espacialmente o potencial energético dos resíduos, mapeando a distribuição geográfica da geração, e comparar a nível de energia e impactos ambientais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CARACTERÍSTICAS DA INDÚSTRIA CATARINENSE

A indústria catarinense destaca-se como uma das mais relevantes do Brasil, representando aproximadamente 30 % do Produto Interno Bruto (PIB) do estado (CNI, 2019). Sua estrutura produtiva caracteriza-se por elevada diversificação, abrangendo

diferentes segmentos manufatureiros distribuídos regionalmente. Entre os principais setores industriais destacam-se o de alimentos, construção, máquinas e materiais elétricos, vestuário, máquinas e equipamentos, que, somando, representam cerca de 51,1 % da atividade industrial catarinense (CNI, 2019).

Além da diversidade setorial, a indústria do estado apresenta forte especialização territorial, com diferentes regiões concentrando atividades produtivas específicas (CNI, 2019). Segundo a Confederação Nacional da Indústria, a região Oeste destaca-se pela predominância da agroindústria, especialmente nos segmentos de processamento de carnes e alimentos. No Sul sobressaem-se as atividades ligadas à indústria cerâmica e mineral, enquanto o Vale do Itajaí concentra importantes polos da indústria têxtil e do vestuário. A região Norte apresenta forte presença da indústria metalmeccânica, de máquinas e equipamentos, tecnologia e eletroeletrônica, e a região Serrana destaca-se pela indústria madeireira e de papel e celulose, com grandes volumes de resíduos lignocelulósicos associados.

Essa distribuição territorial dos setores produtivos determina diretamente os padrões espaciais de geração de resíduos industriais, uma vez que diferentes processos produtivos resultam em resíduos com características físico-químicas distintas (CNI, 2019). A compreensão dessa estrutura regional é, portanto, fundamental para identificar oportunidades de valorização energética e orientar políticas de gestão de resíduos em escala territorial (FIESC, 2022). A Figura 1 ilustra a distribuição dos principais setores industriais pelas mesorregiões catarinenses.

Figura 1: Mapa dos Setores Industriais Catarinenses



Fonte: Elaborado pelo autor com ferramenta de Inteligência Artificial

2.2. GESTÃO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS EM SANTA CATARINA

O gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo os resíduos industriais, é norteado, sobretudo, pela Lei nº 12.305/2010, que apresenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e estabelece diversos instrumentos voltados à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos, dentre os quais se destacam os planos de resíduos sólidos, os sistemas de informação e inventários, a logística reversa, a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, os incentivos econômicos e a educação ambiental. Esses instrumentos visam promover a redução na geração de resíduos, ampliar a reciclagem e incentivar formas de valorização, incluindo o aproveitamento energético, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a eficiência no uso de recursos (BRASIL, 2010).

A PNRS é estruturada em uma hierarquia de gestão de resíduos, com a seguinte ordem de prioridade: Não geração, redução, reutilização, reciclagem,

tratamento dos resíduos sólidos e destinação final ambientalmente adequada dos rejeitos.

No cenário dos resíduos industriais, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES) reforça essa direção ao estabelecer metas de elevação da massa recuperada para cerca de 48,1% até 2040, incluindo explicitamente o tratamento térmico via recuperação energética (*Waste-to-Energy* - WtE) como rota estrutural para desviar resíduos não recicláveis de aterros, especialmente em consórcios intermunicipais e grandes centros geradores (PLANARES, 2022). Essa pressão regulatória, somada às metas de descarbonização setorial, tem impulsionado a adoção de rotas de recuperação energética como alternativas estratégicas à disposição em aterros (BRASIL, 2021).

O contexto catarinense apresenta particularidades relevantes, embora o estado possua um sistema de monitoramento de resíduos industriais bem estruturado, o Sistema de Controle de Movimentação de Resíduos e Rejeitos (MTR), gerido pelo Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA), a infraestrutura de destinação final ainda é limitada. O diagnóstico do Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS, 2018) aponta que o estado conta com apenas seis aterros licenciados para resíduos industriais, concentrados majoritariamente na faixa centro-norte do território. A análise espacial realizada no âmbito deste trabalho (Seção 4.5) evidencia que há regiões a mais de 100 km dos aterros existentes, distância adotada pelo próprio PERS como parâmetro razoável para o contexto catarinense. Esse descompasso entre a distribuição da infraestrutura de destinação e a localização dos polos industriais eleva custos logísticos e emissões de gases de efeito estufa associadas ao transporte de resíduos, reforçando a relevância da implantação de unidades de recuperação energética próximas aos centros geradores (Moraes et al., 2019).

2.2.1. Sistema MTR e monitoramento dos resíduos industriais

O Sistema de Controle de Movimentação de Resíduos e Rejeitos (MTR), gerido pelo IMA, permite rastrear o fluxo de resíduos industriais desde a fonte

geradora até a destinação final em todo o território catarinense. O sistema opera por meio da Declaração de Movimentação de Resíduos (DMR), que consolida as seguintes informações por manifesto:

- empresa geradora e empresa destinadora;
- quantidade transportada, em toneladas;
- município de origem e município de destino;
- classe do resíduo, conforme ABNT NBR 10004/2004;
- código identificador do resíduo, conforme IN IBAMA nº 13/2012;
- tecnologia de destinação empregada.

A articulação dessas informações permite consolidar inventários anuais detalhados por tipo de resíduo, setor gerador e região, constituindo a principal base de dados utilizada neste estudo. O IMA organiza o monitoramento por meio de 16 coordenadorias regionais, que funcionam como polos de fiscalização e auditoria dos dados inseridos no sistema (IMA, 2024).

A classificação dos resíduos no MTR segue os códigos da Instrução Normativa IBAMA nº 13/2012 (IN nº 13/2012), que organiza os resíduos sólidos industriais em uma estrutura hierárquica baseada na origem produtiva e no processo gerador. Cada resíduo recebe um código alfanumérico composto por categoria de atividade econômica, subcategoria de processo e tipo de resíduo, permitindo a identificação padronizada de centenas de tipos de resíduos em nível nacional. Embora essa estrutura garanta rastreabilidade e padronização dos registros, ela não foi concebida para avaliações de recuperação energética, os critérios de agrupamento refletem a origem dos resíduos, não seu comportamento físico-químico frente às tecnologias de valorização. Por essa razão, neste trabalho os códigos da IN nº 13/2012 foram reorganizados em grupos operacionais com características energéticas similares, conforme descrito na metodologia (Seção 3.2).

2.3. VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS: CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Valorização de resíduos é o conjunto de processos pelos quais materiais residuais são reaproveitados como insumos, produtos ou fontes de energia, evitando sua disposição final em aterros (De Oliveira et al., 2014). Dentro da hierarquia da PNRS, a valorização abrange reciclagem, compostagem e recuperação energética, nessa ordem de prioridade (BRASIL, 2010).

Recuperação energética é a modalidade de valorização na qual o conteúdo energético dos resíduos é convertido em energia elétrica, térmica ou combustível (CNI, 2019). Aplica-se preferencialmente a resíduos não recicláveis ou rejeitos com poder calorífico significativo. No Brasil, o PLANARES reconhece a recuperação energética como rota estrutural dentro da hierarquia de gestão, especialmente para resíduos industriais e urbanos que não possuem viabilidade técnica ou econômica de reciclagem (PLANARES, 2022).

Poder Calorífico Inferior (PCI) é o parâmetro fundamental para a avaliação do potencial energético de um resíduo. Representa a quantidade de energia liberada por unidade de massa na combustão completa do material, descontando a energia consumida na vaporização da umidade presente (CNI, 2019). É expresso em kcal/kg ou MJ/kg e determina se um resíduo pode sustentar a combustão de forma autônoma ou se necessita de combustível auxiliar (CNI, 2019). O PCI pode ser estimado a partir de dois métodos complementares: a análise imediata, que determina os teores de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo, refletindo o comportamento de queima do resíduo; e a composição elementar, que determina os teores de C, H, O, N, S e Cl, permitindo cálculos estequiométricos mais precisos e a estimativa de emissões atmosféricas (Kumar et al., 2023). A escolha entre os dois métodos depende do tipo de resíduo e da precisão requerida, conforme discutido na metodologia deste trabalho.

Os principais métodos de tratamento de resíduos com recuperação de energia incluem a incineração com recuperação energética, a digestão anaeróbia em biodigestores e a disposição em aterros sanitários com aproveitamento do biogás (da Silva, 2019). No Brasil, a disposição em aterros sanitários é a opção mais utilizada,

apesar de aterro sanitário ainda ser indispensável em sistemas integrados de gestão de resíduos urbanos, uma vez que deve ser usado apenas em casos em que não há maneiras viáveis de o resíduo ser recuperado (da Silva, 2019).

2.4. TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

As tecnologias de recuperação energética transformam resíduos com potencial calorífico em energia elétrica, térmica ou combustível, operando por rotas térmicas ou bioquímicas. A seleção da tecnologia mais adequada depende das características físico-químicas dos resíduos, da infraestrutura disponível e das condições logísticas e industriais da região (CNI, 2019). Este trabalho avalia três rotas: incineração, coprocessamento em fornos de clínquer e biodigestão anaeróbia. A escolha destas tecnologias para a presente análise justifica-se por serem as rotas de recuperação energética (*Waste-to-Energy*) mais consolidadas mundialmente e as que apresentam maior sinergia com o perfil econômico e ambiental do estado de Santa Catarina (Tsuda, 2019). A análise conjunta dessas três tecnologias permite cobrir todo o espectro do gerenciamento de resíduos: a biodigestão trata a matéria orgânica putrescível, o coprocessamento valoriza energeticamente e mineralmente o CDR e resíduos industriais específicos; e a incineração processa o RSU misto ou rejeitos, garantindo a máxima redução de massa a ser aterrada (Crema et al., 2024). Essa abordagem integrada fortalece a economia circular e contribui diretamente para o alcance de diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) no estado.

2.4.1. Incineração

A incineração é um processo de combustão controlada em ambiente com excesso de oxigênio e temperaturas entre 850 °C e 1.200 °C, visando a redução de massa (cerca de 70%) e volume (até 90%) dos resíduos (Tsuda, 2019). O calor gerado é capturado por caldeiras para produzir vapor, que movimenta turbinas para geração

de eletricidade ou calor industrial. Os resíduos mais indicados incluem resíduos sólidos urbanos mistos, resíduos industriais e resíduos de serviços de saúde. Em termos de eficiência, plantas dedicadas apenas à eletricidade operam entre 17% e 30%, enquanto sistemas de cogeração (CHP) atingem de 70% a 85% (European Commission, 2006). Embora exija maior escala (idealmente acima de 250 a 500 toneladas/dia), a incineração apresenta-se como solução estratégica para municípios catarinenses de médio e grande porte ou organizados em consórcios, como os da região da AMESC, visando prolongar a vida útil de aterros e atender à demanda por energia elétrica (Rossi, 2016).

O parâmetro crítico de viabilidade é o PCI: valores abaixo de 1.450 kcal/kg inviabilizam a queima autossustentada, enquanto resíduos com PCI acima de 2.000 kcal/kg dispensam combustível auxiliar (CNI, 2019). A umidade deve ser inferior a 45% e o teor de material volátil superior a 40% para garantir ignição estável. Compostos como cloro e enxofre são monitorados para evitar a formação de potenciais gases ácidos (HCl e SO₂) e corrosão de equipamentos. No Brasil, as emissões são reguladas pela Resolução CONAMA nº 316/2002, que estabelece limites para CO, material particulado, HCl, NOx e dioxinas/furanos, exigindo sistemas sofisticados de controle de poluição atmosférica (CPA) que representam entre 15% e 35% do capital das instalações (Floriani, 2007). Em Santa Catarina, existem estudos de viabilidade para RSU na região da AMESC e operação de planta piloto em Joinville (Floriani, 2007).

2.4.2. Coprocessamento em Fornos de Clínquer

O coprocessamento integra o tratamento térmico de resíduos à fabricação de cimento, utilizando-os como substitutos parciais de combustível fóssil (coque de petróleo) ou de matéria-prima mineral (Crema et al., 2024). A queima ocorre a temperaturas superiores a 1.450 °C, garantindo a destruição completa da matéria orgânica, enquanto a fração inorgânica é incorporada à estrutura cristalina do clínquer, eliminando a geração de cinzas adicionais (Santos, 2021). Essa característica torna o

coprocessamento uma das rotas com melhor aproveitamento energético e mineral dos resíduos, com eficiência térmica próxima a 100% (Santos, 2021).

Os requisitos são mais restritivos que os da incineração: o PCI mínimo é de 2.000 kcal/kg, o teor de cloro deve ser inferior a 0,5%, para evitar corrosão e distúrbios na qualidade do clínquer, e a umidade não deve superar 20%, pois impacta diretamente a temperatura de clínquerização (Santos, 2021). Metais pesados como cádmio, mercúrio e tálio são controlados por limites normativos estritos (< 100 mg/kg), regulamentados pela Resolução CONAMA nº 499/2020. Em Santa Catarina, o coprocessamento é uma rota consolidada, monitorada pelo IMA, e representando parcela significativa da destinação industrial no estado (Santos, 2021). O setor cimenteiro catarinense adota o coprocessamento como estratégia de descarbonização, com metas de redução de 35% das emissões de CO₂ até 2030 e 60% até 2050 (PNRS, 2022).

O estado de Santa Catarina possui infraestrutura cimenteira instalada, como demonstrado no estudo de caso de Imbituba, SC (Crema et al., 2024), onde a produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) a partir de rejeitos urbanos mostrou-se uma alternativa econômica e logisticamente viável para substituir combustíveis importados e caros, como o coque de petróleo.

2.4.3. Biodigestão Anaeróbia

A biodigestão é um processo bioquímico no qual microrganismos decompõem a fração orgânica úmida dos resíduos na ausência de oxigênio, gerando biogás, rico em metano (CH₄) e dióxido de carbono, e digestato, que pode ser utilizado como biofertilizante (Tsuda, 2019). Diferentemente das rotas térmicas, a biodigestão opera em temperaturas entre 35 °C e 55 °C e é especialmente adequada para resíduos com elevada fração orgânica biodegradável e umidade superior a 50–60%, como dejetos animais, resíduos de alimentos e lodos de estações de tratamento de efluentes (Soares, 2023).

A eficiência de conversão elétrica do biogás gira em torno de 25% a 36%, podendo atingir 85% em sistemas de cogeração (CHP) com aproveitamento do calor do motor (IEA Bioenergy, 1997). A produção potencial de biogás é estimada a partir do Potencial Bioquímico de Metano (BMP), função dos sólidos voláteis, da demanda química de oxigênio (DQO) e da fração orgânica biodegradável do substrato. A relação carbono/nitrogênio (C/N) deve situar-se entre 25 e 30 para garantir a estabilidade microbiológica do processo, concentrações de amônia (NH_3) acima de 1,5 g/L podem ser tóxicas e paralisar a metanogênese (Da Silva et al., 2019). Em Santa Catarina, a biodigestão é amplamente aplicada no tratamento de efluentes da agroindústria, em frigoríficos, abatedouros e no manejo de lodos biológicos industriais (SEEG, 2023).

2.4.4. Tecnologias não contempladas neste estudo

A gaseificação e a pirólise são rotas tecnológicas com potencial de recuperação energética, mas não foram incluídas no escopo deste trabalho. A gaseificação consiste na oxidação parcial da matéria orgânica com fornecimento limitado de oxigênio acima de 700 °C, gerando gás de síntese (syngas) com eficiência térmica de 60% a 90% (Santos, 2021). A pirólise opera na ausência total de oxigênio entre 400 °C e 900 °C, gerando bio-óleo, gás de pirólise e biocarvão (CNI, 2019). Ambas as tecnologias se encontram em estágio experimental e de testes piloto no contexto catarinense (Floriani, 2007), sem aplicação industrial consolidada que permita parametrização a partir dos dados do MTR. Além disso, os registros do MTR não classificam destinações para gaseificação ou pirólise como rotas distintas, impossibilitando a identificação dos fluxos de resíduos associados a essas tecnologias na base de dados utilizada.

2.4.5. Relação das tecnologias com os resíduos

Para cada tecnologia de recuperação energética, a importância dos parâmetros físico-químicos pode ser organizada em uma escala de classificação que vai da viabilidade técnica (fator crítico) ao controle de qualidade e ambiental. Resíduos poliméricos e pneus destacam-se entre os materiais com maior potencial energético, apresentando poderes caloríficos comparáveis aos combustíveis fósseis convencionais, como o coque de petróleo, o que os torna especialmente adequados para processos térmicos, como incineração e coprocessamento (Rossi, 2014).

Em contrapartida, resíduos orgânicos úmidos apresentam baixo poder calorífico devido ao elevado teor de umidade, frequentemente superior a 60%, o que limita sua utilização em processos de combustão direta e favorece sua destinação para rotas bioquímicas, especialmente a biodigestão anaeróbia, capaz de converter a matéria orgânica biodegradável em biogás rico em metano (CNI, 2019).

Para resíduos com composição heterogênea, destaca-se a produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR), cuja homogeneização e redução de contaminantes proporcionam maior estabilidade operacional e melhor desempenho energético em processos térmicos avançados (CNI, 2019). No contexto catarinense, o coprocessamento em fornos de clínquer constitui uma das principais rotas para o aproveitamento de pneus e determinados resíduos perigosos, apresentando a vantagem adicional da incorporação da fração mineral residual ao clínquer, reduzindo a geração de rejeitos finais (Crema et al., 2024).

Embora a incineração e o coprocessamento sejam processos baseados na oxidação térmica dos resíduos, apresentam finalidades operacionais distintas. A incineração consiste em uma tecnologia de tratamento e destinação final, cujo principal objetivo é reduzir o volume e a massa dos resíduos, podendo recuperar parte da energia liberada na forma de calor ou eletricidade (CNI, 2019). Já o coprocessamento integra os resíduos ao processo produtivo da indústria cimenteira, utilizando-os simultaneamente como fonte energética e matéria-prima para a produção de clínquer (Santos, 2021).

Em função dessa integração, o coprocessamento opera em temperaturas mais elevadas e não gera resíduos sólidos secundários, uma vez que a fração mineral dos resíduos é incorporada à matriz do cimento (Santos, 2021). Consequentemente, os critérios de aceitação dos resíduos são mais restritivos, com destaque para limites de cloro, umidade, cinzas e metais pesados, enquanto a incineração prioriza parâmetros relacionados à manutenção da combustão, como poder calorífico, umidade e teor de materiais voláteis (Santos, 2021).

2.5. PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DOS RESÍDUOS INDUSTRIAIS

A utilização de resíduos sólidos industriais (RSI) para recuperação energética apresenta vantagens técnicas relevantes em relação aos resíduos sólidos urbanos (RSU), principalmente devido ao maior poder calorífico e à maior homogeneidade de composição (Neuwahl, 2019). Enquanto o RSU brasileiro é caracterizado por alto teor de umidade e matéria orgânica, frequentemente superior a 50%, os resíduos industriais catarinenses apresentam PCI mais elevado e constante, variando entre 2.376 e 5.664 kcal/kg segundo Floriani (2007), o que os torna insumos preferenciais para rotas de recuperação energética.

A Tabela 1 consolida os valores de referência de PCI para os principais tipos de resíduos com potencial energético, conforme reportado na literatura. Esses valores, obtidos para resíduos homogêneos de referência, foram utilizados como base de validação dos PCIs calculados neste trabalho para cada grupo operacional por meio estimativas a partir dos parâmetros encontrados.

Tabela 1: Potencial calorífico de referência por tipo de resíduo industrial

Resíduo	PCI / PCS	Referência
Plásticos	6.300 kcal/kg (PCI)	EPE, 2008
Têxteis	3.480 kcal/kg (PCI)	EPE, 2008
Madeira	2.520 kcal/kg (PCI)	EPE, 2008
Papel e papelão	4.030 kcal/kg (PCI)	EPE, 2008
Resíduos perigosos inflamáveis	Mín. 2.500 kcal/kg (PCI)	Georgiopoulou, 2017

Resíduo	PCI / PCS	Referência
Lodos biológicos desidratados	2.377 a 5.664 kcal/kg (PCS)	Floriani, 2007
Pneus inservíveis	6.780 kcal/kg (PCI)	EPE, 2008
CDR / RDF	15 a 25 MJ/kg (PCI)	CNI, 2019

Fonte: Elaborado pelo autor

Além do PCI, a viabilidade técnica de cada resíduo para uma determinada rota de recuperação energética depende de um conjunto de parâmetros físico-químicos que definem o desempenho operacional do processo. A Tabela 2 apresenta os critérios quantitativos de referência adotados neste trabalho para cada tecnologia, obtidos a partir de documentos normativos, referências técnicas internacionais e literatura especializada. Esses limites fundamentam a construção dos Índices de Aptidão Energética (IAE) descritos na metodologia. Para fins de comparação, o coque de petróleo, combustível fóssil convencionalmente utilizado em fornos de clínquer, apresenta PCI de aproximadamente 7.500 kcal/kg (Piaia, 2021), valor superior à maioria dos grupos de resíduos avaliados neste estudo, à exceção de Poliméricos/Plásticos (10.648 kcal/kg).

Tabela 2: Critérios quantitativos de referência para avaliação de aptidão tecnológica

Parâmetro	Incineração	Coprocessamento	Biodigestão
PCI mínimo (kcal/kg)	≥ 1.450 (mín.) ≥ 2.000	≥ 2.000	N/A
Umidade (%)	< 45	< 20	$> 50-60$
Cinzas (%)	< 35	< 35	Remoção prévia
Material volátil / SV (%)	> 40	Alta ignição	Quanto maior, melhor
Cloro total (%)	Monitorado	$< 0,5$	N/A
Relação C/N	N/A	N/A	25–30
Inibidores (NH ₃)	N/A	N/A	$< 1,5$ g/L
Temperatura de operação (°C)	850 – 1.200	> 1.450	35 – 55

Fonte: CNI, 2019; CONAMA nº 264/1999; IEA Bioenergy, 1997

A Tabela 3 apresenta as eficiências de conversão energética das tecnologias avaliadas e das demais rotas WtE, para referência comparativa. Observa-se que sistemas de cogeração (CHP) apresentam aproveitamento energético significativamente superior aos sistemas dedicados exclusivamente à geração de eletricidade, o que reforça a importância da integração das plantas de recuperação energética com demandas térmicas industriais existentes na região.

Tabela 3: Eficiências de conversão energética por tecnologia

Tecnologia	Ef. elétrica	Ef. térmica / CHP	Referência
Incineração	17% – 30%	70% – 85%	European Commission, 2006
Coprocessamento	15% – 30%	~100% (térmica)	CNI, 2019
Biodigestão anaeróbia	25% – 36%	65% – 85%	IEA Bioenergy, 1997

Fontes: European Commission, 2006; CNI, 2019; IEA Bioenergy, 1997; Santos, 2021.

2.6. EMISSÕES DE GEE E POTENCIAL DE DESCARBONIZAÇÃO

O setor de resíduos respondeu por cerca de 5% das emissões brutas de gases de efeito estufa (GEE) do Brasil em 2024, aproximadamente 96 MtCO₂eq, sendo o setor que mais cresceu entre 2023 e 2024, com aumento de 3,6% nas emissões (SEEG, 2023). Esse crescimento está associado ao aumento de cerca de 9% na quantidade de resíduos coletados e reflete a relação direta entre geração de resíduos, crescimento populacional e atividade econômica.

A característica central das emissões do setor é o forte peso do metano (CH₄), gerado principalmente pela decomposição anaeróbica da fração orgânica em aterros sanitários e lixões (IPCC, 2006). O metano possui potencial de aquecimento global cerca de 25 vezes superior ao CO₂ em um horizonte de 100 anos, o que amplifica o impacto climático da disposição final inadequada de resíduos orgânicos (IPCC, 2006). Estima-se que, para cada tonelada de resíduo desviada de aterros e tratada em unidades de recuperação energética, aproximadamente uma tonelada de CO₂

equivalente seja evitada, pela combinação da supressão das emissões de metano e da substituição de combustíveis fósseis (CNI, 2019).

A recuperação energética, especialmente o coprocessamento, que substitui coque de petróleo em fornos de clínquer, e a biodigestão, que capta o metano antes que seja emitido à atmosfera, constitui, portanto, uma ferramenta de descarbonização de duplo efeito: reduz as emissões do setor de resíduos e substitui fontes de energia fósseis nos setores consumidores. Esse potencial é reconhecido pelo PLANARES, que inclui o WtE entre as rotas estruturais para atingir as metas de recuperação de resíduos e redução de emissões (PLANARES, 2022; SEEG, 2023). Considerando que na queima de cada 1 kg de coque de petróleo, aproximadamente 0,7 kg são emitidos como CO₂ (Verdiani et al., 2025), a utilização de resíduos parece uma alternativa mais viável.

Um aspecto frequentemente subestimado na contabilidade de emissões do setor é a contribuição do transporte de resíduos. A metodologia do SEEG não incorpora as distâncias percorridas pelos veículos de coleta e transporte até a destinação final, embora esses deslocamentos, especialmente em regiões com infraestrutura fragmentada, como Santa Catarina, elevem diretamente as emissões do setor de transportes. No estado, a concentração dos aterros licenciados na faixa centro-norte implica que resíduos de regiões como o Oeste catarinense percorram centenas de quilômetros até a destinação final, gerando emissões de CO₂ pelo tráfego de caminhões pesados que não são contabilizadas no setor de resíduos. A implantação de unidades de recuperação energética próximas aos polos geradores, reduziria tanto as emissões de metano nos aterros quanto as emissões de CO₂ associadas ao transporte, configurando um ganho ambiental duplo.

A quantificação dos benefícios climáticos da recuperação energética de resíduos pode ser realizada por meio da abordagem de emissões evitadas, empregada em inventários de gases de efeito estufa e estudos de avaliação do ciclo de vida. Nessa abordagem, os resíduos atuam como substitutos de fontes convencionais de energia ou combustíveis fósseis, permitindo estimar a mitigação de emissões a partir da energia recuperada e dos fatores de emissão associados às fontes substituídas (IPCC, 2006; GHG Protocol, 2023). No caso da incineração com

recuperação energética e da biodigestão anaeróbia, a redução de emissões está relacionada à substituição da eletricidade da rede, enquanto no coprocessamento em fornos de clínquer considera-se principalmente a substituição do coque de petróleo, além da incorporação da fração mineral dos resíduos ao produto final, eliminando a geração de cinzas (Verdiani et al., 2025). Adicionalmente, a valorização energética pode contribuir para a redução das emissões associadas à disposição de resíduos biodegradáveis em aterros sanitários, evitando a formação de metano decorrente da decomposição anaeróbia da matéria orgânica (IPCC, 2006). Os fatores de emissão apontados nestes estudos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Fatores de emissão por tecnologia

Tecnologia	Unidade	Fator de emissão evitado	Referência
Biodigestão (eletricidade)	tCO ₂ eq/MWh	0,074	GHG Protocol Brasil
Incineração com recuperação energética	tCO ₂ eq/MWh	0,074	IPCC 2006
Coprocessamento	tCO ₂ eq/t coque substituído	0,7	Hemidat et al. (2019)
Coprocessamento	tCO ₂ eq/GJ	0,0946	IPCC 2006
Aterro – resíduos alimentares/orgânicos	tCO ₂ eq/t resíduo	1,0–1,5	IPCC Waste Model
Aterro – lodos	tCO ₂ eq/t resíduo	0,5–1,0	IPCC Waste Model
Aterro – madeira/papel	tCO ₂ eq/t resíduo	0,3–0,8	IPCC Waste Model

Fonte: elaborado pelo autor

2.7. GARGALOS AMBIENTAIS E CONTROLE DE EMISSÕES

Os principais gargalos ambientais associados à recuperação energética de resíduos concentram-se nas emissões atmosféricas decorrentes de combustão incompleta e na gestão das cinzas residuais, que podem concentrar substâncias perigosas (Floriani, 2007). A combustão incompleta ocorre quando há falhas operacionais, insuficiência de oxigênio, temperatura inadequada na câmara de queima ou tempo de residência insuficiente, resultando na liberação de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não queimados, dioxinas e furanos (PCDD/F),

hidrocarbonetos poliaromáticos (HPAs) e compostos orgânicos voláteis (COVs) (Santos, 2021).

Do ponto de vista da saúde humana, esses poluentes apresentam impactos severos: o CO interfere na capacidade de transporte de oxigênio pelo sangue; os COVs provocam irritação de mucosas e distúrbios neurológicos, sendo o benzeno classificado como carcinogênico; dioxinas e furanos estão associados a câncer, distúrbios hormonais e danos ao sistema imunológico mesmo em concentrações muito baixas; os HPAs apresentam potencial carcinogênico e mutagênico (Floriani, 2007). No ambiente, esses compostos contribuem para o efeito estufa, formam ozônio troposférico e se acumulam na cadeia alimentar como poluentes orgânicos persistentes.

O controle dessas emissões é regulado no Brasil por resoluções do CONAMA, com padrões específicos por tecnologia. A Tabela 5 apresenta os limites de emissão estabelecidos pela legislação brasileira e pela EPA norte-americana, evidenciando o rigor crescente das normas ambientais para operação de unidades de recuperação energética.

Tabela 5: Limites de emissão atmosférica por poluente e legislação aplicável (valores em mg/Nm³, base seca, salvo indicação)

Poluente	CONAMA 316/2002 (Incineração)	CONAMA 499/2020 (Coprocessoamento)	EPA 40 CFR 60	COPAM 154/2010
Material Particulado (mg/Nm ³)	70	50	70	50 (novas) / 70 (exist.)
CO (mg/Nm ³)	124,94	N/A	157 ppmv	100 ppmv
NOx (mg/Nm ³)	560	800	388 ppmv	450 (novas) / 730 (exist.)
SOx (mg/Nm ³)	280	280	20 ppmv	280
HCl (mg/Nm ³)	80	10	62	1,8 kg/h ou 99% remoção
HF (mg/Nm ³)	5	5	—	5
Dioxinas/Furanos (ng TEQ/Nm ³)	0,5	0,1	0,41	N/A
Mercúrio – Hg (mg/Nm ³)	0,028	0,05	0,47	0,01 mg/kg no resíduo
Chumbo – Pb (mg/Nm ³)	7	0,35	0,04	0,35
Cádmio – Cd (mg/Nm ³)	N/A	0,10	N/A	0,10

Poluente	CONAMA 316/2002 (Incineração)	CONAMA 499/2020 (Coprocessamento)	EPA 40 CFR 60	COPAM 154/2010
Tálio – TI (mg/Nm ³)	N/A	0,10	N/A	0,10

Fontes: CONAMA 316/2002; CONAMA 499/2020; EPA 40 CFR Part 60; COPAM 154/2010.

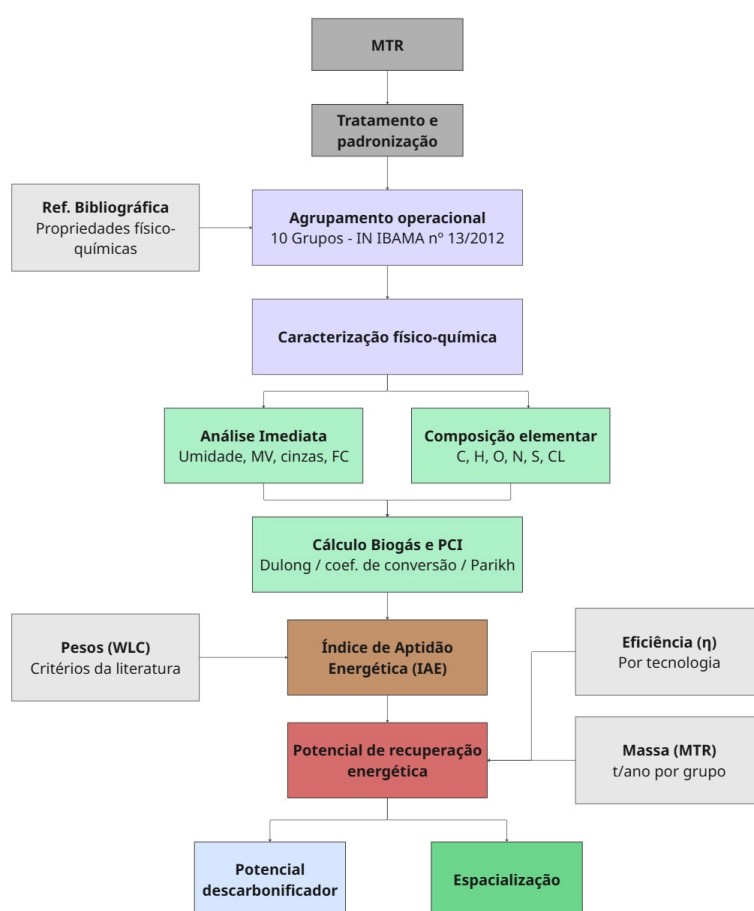
Comparando as diferentes rotas, o coprocessamento em fornos de clínquer é frequentemente considerado a rota de maior desempenho ambiental dentre as rotas térmicas: a alta temperatura (> 1.450 °C) garante a destruição completa da matéria orgânica, e a fração inorgânica é incorporada ao clínquer, eliminando cinzas adicionais. A Resolução CONAMA 499/2020 impõe limites mais restritivos que os da incineração para vários poluentes, como HCl (10 mg/Nm³ contra 80 mg/Nm³) e dioxinas/furanos (0,1 ng TEQ/Nm³ contra 0,5 ng TEQ/Nm³), o que reflete tanto a maior temperatura de operação quanto a necessidade de proteger a qualidade do produto final (clínquer). A biodigestão, por operar em baixas temperaturas e sem combustão, não gera dioxinas ou furanos, mas exige controle de odores e manejo adequado do digestato. A incineração é a tecnologia que mais depende de sistemas de controle de poluição atmosférica (CPA), com investimentos entre 15% e 35% do capital da planta destinados a essa finalidade (Floriani, 2007).

Apesar desses desafios, a recuperação energética apresenta compensação ambiental relevante frente à disposição em aterros: redução de até 70% na massa e 90% no volume dos resíduos, supressão das emissões de metano da decomposição orgânica, substituição de combustíveis fósseis e destruição de patógenos e poluentes orgânicos persistentes que não seriam adequadamente tratados em aterros convencionais. O avanço regulatório e tecnológico tem elevado progressivamente os padrões de eficiência e segurança ambiental das plantas de recuperação energética, consolidando essas rotas como alternativas estratégicas de descarbonização e gestão ambientalmente adequada de resíduos (CNI, 2019).

3 METODOLOGIA

3.1. BASE DE DADOS E AQUISIÇÃO DAS INFORMAÇÕES

Figura 2: Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor

A principal fonte de dados utilizada neste estudo é o sistema do Manifesto de Transporte de Resíduos (MTR), que registra informações sobre geração, transporte e destinação de resíduos industriais em Santa Catarina. Foram extraídas variáveis relativas à localização dos geradores e destinadores, à massa transportada e à classificação dos resíduos segundo a Instrução Normativa IBAMA nº 13/2012 (IN nº 13/2012). Complementarmente, foram consultados inventários ambientais estaduais,

bases cartográficas e literatura técnico-científica especializada em propriedades energéticas de resíduos e tecnologias de recuperação energética.

3.2. TRATAMENTO E PADRONIZAÇÃO DOS DADOS

Os dados obtidos foram submetidos a etapas de tratamento, padronização e validação, visando reduzir inconsistências e possibilitar análises espaciais e quantitativas. As etapas incluíram normalização de nomes de municípios, padronização de identificadores de empresas, remoção de registros inconsistentes e consolidação dos fluxos de resíduos. O processamento foi realizado por meio da linguagem Python, utilizando bibliotecas voltadas à manipulação de dados tabulares e geoespaciais.

3.3. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS E AGRUPAMENTO

3.3.1. Definição dos grupos operacionais

Os resíduos industriais foram identificados a partir dos códigos da IN IBAMA nº 13/2012 presentes nos registros do MTR. Embora essa instrução forneça uma classificação abrangente baseada na origem produtiva e no processo gerador dos resíduos, não foi concebida para avaliações de recuperação energética. Dessa forma, os resíduos foram reorganizados em grupos operacionais que representam materiais com comportamento físico-químico semelhante frente às principais tecnologias de valorização energética avaliadas: incineração, coprocessamento em fornos de clínquer e biodigestão anaeróbia. A definição dos grupos considerou simultaneamente a estrutura hierárquica da IN nº 13/2012 e a associação dos resíduos às rotas tecnológicas identificadas na literatura especializada, segundo três critérios principais:

- Conteúdo energético significativo: resíduos sem potencial de conversão energética, como materiais inertes e aqueles com poder calorífico negligenciável, foram excluídos da análise.
- Compatibilidade com as tecnologias avaliadas: foram mantidos apenas resíduos com potencial de aplicação em ao menos uma das três rotas tecnológicas selecionadas, descartando categorias com restrições legais para recuperação energética no Brasil, como resíduos contaminados e radioativos conforme o Decreto nº 10.936/2022, a Resolução CONAMA nº 362/2005 e CONAMA 499/2020. Foi descartado os resíduos que já vão para compostagem e reciclagem, para respeitar a hierarquização do Plano Nacional de Resíduos Sólidos.
- Comportamento físico-químico homogêneo dentro do grupo: os grupos orgânicos foram subdivididos em função das discrepâncias encontradas na literatura entre resíduos de origem animal e vegetal, cujos parâmetros energéticos, especialmente poder calorífico e fração orgânica biodegradável, apresentaram valores consideravelmente distintos, justificando tratamentos separados.

A associação entre os códigos da IN nº 13/2012 e os grupos operacionais foi realizada por meio de análise semântica das descrições oficiais dos resíduos, com apoio da literatura técnica especializada. Foram definidos dez grupos operacionais: Biomassa Orgânica Animal, Biomassa Orgânica Vegetal, Lignocelulósicos, Poliméricos/Plásticos, Têxteis, Borrachas e Pneus, Lodos, Oleosos e Solventes, Minerais/Inertes e Mistos/CDR (Combustível Derivado de Resíduos).

3.3.2. Caracterização físico-química

Como os registros do MTR não incluem dados laboratoriais dos resíduos, adotou-se uma abordagem indireta de caracterização físico-química baseada em revisão bibliográfica sistemática, pesquisando em trabalhos que foram realizados análises de cada grupo operacional, por meio de palavras-chave em repositórios. Para cada grupo operacional foram levantados valores representativos dos principais

parâmetros energéticos por meio de dois métodos complementares: a análise imediata e a composição elementar.

A análise imediata determina os teores de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo, fornecendo indicadores diretos do comportamento de queima, velocidade de ignição, estabilidade da chama, volume de rejeitos sólidos e barreira térmica imposta pela água (Floriani, 2007). Trata-se de um método mais acessível e amplamente adotado para triagem de biomassas e resíduos heterogêneos.

A composição elementar determina os teores de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), enxofre (S) e cloro (Cl), sendo indispensável para cálculos estequiométricos de demanda de ar, estimativa de emissões atmosféricas e dimensionamento de processos bioquímicos (Da Silva et al., 2019).

A escolha entre os dois métodos para estimativa do Poder Calorífico Inferior (PCI) foi orientada pelo tipo de resíduo e pelas recomendações da literatura. Para os grupos Poliméricos/Plásticos, Têxteis, Borrachas/Pneus e Lodos, o PCI foi estimado pela equação adaptada de Dulong (Crema et al., 2024) (Equação 1), baseada na composição elementar:

$$PCI = 0,338 \cdot C + 1,428 \cdot \left(H - \frac{O}{8}\right) + 0,095 \cdot S \quad \left(\frac{MJ}{kg}\right) \quad (1)$$

Para os demais grupos, foi adotada a correlação de Parikh et al. (Equação 2), baseada nos dados da análise imediata:

$$PCI = 0,3536 \cdot FC + 0,1559 \cdot MV - 0,0078 \cdot Cz \quad \left(\frac{MJ}{kg}\right) \quad (2)$$

onde *FC* é o teor de carbono fixo (%), *MV* o teor de material volátil (%) e *Cz* o teor de cinzas (%). O carbono fixo foi obtido por diferença: $FC = 100 - MV - Cz$, considerando a base seca.

Essa diferenciação metodológica se justifica pela recomendação de Nhuchhen e Salam (Nhuchhen et al., 2012), que demonstraram que a correlação de Parikh (Parikh et al., 2007) subestima sistematicamente o PCI de materiais com elevada fração de hidrocarbonetos, como plásticos, borrachas e lodos com alto teor de lipídio,

para os quais a equação de Dulong, baseada na composição elementar, apresenta melhor desempenho preditivo.

Para os processos de biodigestão anaeróbia, foram considerados adicionalmente: fração orgânica biodegradável, relação C/N, demanda química de oxigênio (DQO), teor de umidade e presença de compostos inibidores da atividade microbológica. Para os processos térmicos: PCI, teor de umidade, material volátil, teor de cinzas e presença de cloro, enxofre e metais pesados.

Os valores de cada parâmetro foram levantados em faixas mínima, média e máxima para cada grupo, representando a variabilidade inerente à diversidade de materiais presentes em cada categoria. Os valores médios foram adotados como referência nos cálculos do potencial energético. O conjunto completo de parâmetros compilados é apresentado no APÊNDICE A.

3.4. SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS (SCATR)

Com o objetivo de associar os grupos de resíduos às rotas de recuperação energética mais adequadas de forma quantitativa e reprodutível, foi desenvolvido o Sistema de Classificação e Avaliação Tecnológica de Resíduos (SCATR). O sistema transforma as informações físico-químicas dos grupos operacionais em indicadores de aptidão tecnológica, possibilitando a avaliação simultânea de diferentes alternativas de valorização energética.

3.4.1. Índice de Aptidão Energética (IAE)

A aptidão de cada grupo de resíduos para cada rota tecnológica foi quantificada por meio do Índice de Aptidão Energética (IAE), que envolve a análise simultânea de múltiplos parâmetros físico-químicos expressos em unidades distintas e com

importâncias operacionais distintas. Para esse tipo de problema, os métodos de Análise de Decisão Multicritério (*Multi-Criteria Decision Analysis* — MCDA) são amplamente empregados na literatura de gestão ambiental e planejamento energético, por permitirem integrar critérios heterogêneos em um índice comparável (Zyoud, 2017).

Entre os métodos MCDA, a Combinação Linear Ponderada (*Weighted Linear Combination* — WLC) destaca-se pela transparência, pela facilidade de interpretação dos resultados e pela ampla aplicação em problemas de aptidão territorial e tecnológica (Shao et al., 2020). O método consiste em transformar cada critério em uma função de adequação adimensional normalizada no intervalo [0, 1] e calcular um índice composto por meio da soma ponderada das contribuições de cada parâmetro (Equação 3):

$$IAE = \sum (w_i \cdot f_i) \quad (3)$$

onde w_i é o peso relativo do parâmetro i e f_i é sua função de adequação normalizada. O IAE varia entre 0 e 1, com valores próximos de 1 indicando elevada compatibilidade com a rota tecnológica avaliada.

Cada parâmetro foi transformado em uma função de adequação adimensional $f_i \in [0,1]$, construída a partir dos limites operacionais quantitativos reportados na literatura e na legislação para cada tecnologia (Tabela 2). Parâmetros favoráveis ao processo, como PCI, material volátil e fração orgânica biodegradável, receberam funções crescentes, nas quais valores mais elevados resultam em maior escore. Parâmetros restritivos, como umidade, cinzas e inibidores, receberam funções decrescentes, penalizando resíduos com características menos adequadas. Assim, a equação 4 descreve o cálculo para a adequação adimensional favorável, enquanto a equação 5 descreve para os restritivos.

Para os parâmetros favoráveis:

$$f_i = \frac{f - f_{min}}{f_{max} - f_{min}} \quad (4)$$

Para os parâmetros restritivos:

$$f_i = \frac{f_{max} - f}{f_{max} - f_{min}} \quad (5)$$

Sendo f o parâmetro médio encontrado para cada grupo, f_{min} e o f_{max} os valores limitantes das tecnologias, quando houver, quando não houver usou-se os valores máximos encontrados dos grupos de resíduos.

3.4.2. Determinação e hierarquização dos pesos

Os pesos foram definidos com base na importância operacional de cada parâmetro para cada tecnologia, conforme critérios técnicos reportados na literatura e na legislação ambiental. Os parâmetros foram hierarquizados em três níveis:

Nível 1: Viabilidade técnica: parâmetros cuja não conformidade inviabiliza ou compromete severamente o processo. Na biodigestão anaeróbia, enquadram-se a fração orgânica biodegradável e a umidade, que determinam a capacidade de conversão biológica da matéria orgânica em biogás (CNI, 2019). A umidade deve ser superior a 50–60%, sendo esta, a rota preferencial para resíduos úmidos, como alimentos e dejetos (CNI, 2019). Na incineração e no coprocessamento, o PCI é o parâmetro central: valores acima de 2.000 kcal/kg permitem combustão autossustentada, enquanto no coprocessamento o limite mínimo situa-se em 2.000 kcal/kg, podendo ser reduzido a 1.500 kcal/kg para resíduos pré-tratados (Santos, 2021).

Nível 2: Eficiência operacional: parâmetros que influenciam diretamente o rendimento energético e a estabilidade do processo. Na incineração, a umidade (< 45%) e o material volátil (> 40%) regem a velocidade de ignição e a transferência de calor (CNI, 2019). No coprocessamento, a umidade deve ser inferior a 20% para não comprometer a temperatura de clinquerização, e o teor de cinzas (< 35%) impacta diretamente o volume de material incorporado ao clínquer (Santos, 2021). Na biodigestão, a relação C/N na faixa de 25–30 e os sólidos voláteis definem a

produtividade de biogás e a estabilidade microbiológica do processo (Perralejo et al., 2025).

Cabe destacar que o material volátil desempenha papéis distintos nas rotas térmica e bioquímica: no coprocessamento, rege a dinâmica de combustão e a estabilidade da chama, pois altos teores favorecem ignição rápida (Floriani, 2007). Na biodigestão, quantificado como sólidos voláteis (SV), define a fração efetivamente fermentável do substrato, quanto maior a concentração de SV, maior o potencial de produção de biogás. Contudo, resíduos com alta fração de lignina, embora apresentem elevado teor de material volátil favorável à rota térmica, resultam em rendimento nulo de biogás nessa fração específica, por serem resistentes à decomposição anaeróbia (Orellana, 2020).

Nível 3: Controle ambiental e operacional: parâmetros associados à formação de emissões, resíduos secundários ou riscos operacionais. Na incineração, cloro e enxofre são monitorados para evitar a formação de gases ácidos (HCl e SO₂) e corrosão de equipamentos (CNI, 2019). No coprocessamento, o cloro recebe peso elevado por ser altamente restritivo (< 0,5%), influenciando diretamente a qualidade do clínquer e a corrosão dos equipamentos, metais pesados (Cd, Hg, Tl) são controlados por limites normativos rigorosos (< 100 mg/kg) (Santos, 2021). Na biodigestão, a amônia (NH₃) acima de 1,5 g/L pode ser tóxica e paralisar a metanogênese (Perralejo et al., 2025).

A distribuição final dos pesos foi normalizada de forma que $\sum w_i = 1$ para cada tecnologia, permitindo que o índice final represente uma combinação ponderada das contribuições relativas de cada parâmetro. Os valores adotados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Pesos (w_i) atribuídos a cada parâmetro por tecnologia de recuperação energética.

Parâmetro	Biodigestão	Incineração	Coprocessamento
PCI	—	0,500	0,500
Umidade	0,200	0,135	0,125
Material Volátil	0,150	0,120	0,120

Parâmetro	Biodigestão	Incineração	Coprocessamento
Cinzas	0,150	0,145	0,175
Fração orgânica	0,200	—	—
Relação C/N	0,150	—	—
Inibidores	0,150	0,100	0,080
Total	1,000	1,000	1,000

Fonte: Elaborado pelo autor

3.5. ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

O potencial de recuperação energética foi estimado a partir da massa anual registrada no MTR para cada grupo operacional, ponderada pelo IAE correspondente à rota tecnológica avaliada. Essa ponderação garante que grupos com características físico-químicas mais afastadas dos limites operacionais ideais contribuam proporcionalmente menos para o potencial energético total, resultando em uma estimativa mais conservadora e tecnicamente fundamentada da energia efetivamente recuperável.

Para as rotas térmicas (incineração e coprocessamento), a energia recuperável foi calculada conforme a Equação 6:

$$E = m \cdot IAE \cdot PCI \cdot \eta \quad (6)$$

onde m é a massa anual processável (t/ano), PCI é o poder calorífico inferior representativo do grupo (MJ/t) e η é a eficiência de conversão energética da tecnologia, obtida na literatura especializada.

Para a biodigestão anaeróbia, a produção potencial de biogás foi estimada a partir dos sólidos voláteis, da demanda química de oxigênio (DQO) e da fração orgânica biodegradável, utilizando coeficientes de conversão reportados na literatura. A energia recuperável foi obtida a partir do poder calorífico do biogás e das eficiências elétricas e térmicas dos sistemas de aproveitamento, igualmente ponderadas pelo IAE.

Para a estimativa da produção de biogás pela rota bioquímica, foi adotado o modelo do Potencial Bioquímico de Metano teórico (BMP), calculado a partir da composição elementar dos resíduos segundo a Equação 7:

$$BMP_{CH_4} = \frac{n_{CH_4} \cdot R \cdot T}{p \cdot SV} \quad (7)$$

onde n_{CH_4} é a quantidade molar de metano produzida por unidade de substrato (mol/g), R é a constante universal dos gases ($8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T é a temperatura de operação do biodigestor (308 K), p é a pressão de referência (101.325 Pa) e SV é o teor de sólidos voláteis do resíduo (g).

A energia recuperável a partir do biogás foi estimada utilizando o Poder Calorífico Inferior (PCI) do biogás de 5.100 kcal/Nm^3 , conforme valor de referência adotado pelo IPEA no Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvipastoril e Agroindústrias Associadas (IPEA, 2012). A energia final foi então obtida pela Equação 8:

$$E_{bio} = V_{CH_4} \cdot IAE \cdot PCI_{biogás} \cdot \eta \quad (8)$$

onde V_{CH_4} é o volume de metano produzido (Nm^3/ano), $PCI_{biogás}$ é o poder calorífico inferior do biogás (MWh/Nm^3) e η é a eficiência de conversão do sistema de aproveitamento energético.

3.6. ESPACIALIZAÇÃO DO POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

A espacialização do potencial de recuperação energética foi realizada por meio da construção de mapas de densidade por kernel, permitindo identificar zonas de concentração do potencial energético ao longo do território catarinense e subsidiar análises de viabilidade logística para implantação de tecnologias de valorização.

O processamento foi realizado em sistema de referência projetado (SIRGAS 2000 / UTM Zona 22S — EPSG:31982), garantindo precisão métrica nos cálculos de

distância. Os limites municipais foram obtidos a partir da malha territorial do IBGE (2024).

Para cada município com potencial energético estimado, foi calculado o centroide do polígono municipal, adotado como ponto de referência espacial da geração de resíduos. Sobre esses centroides foi aplicada uma função de kernel com decaimento exponencial, na qual a influência de cada município sobre os pontos da malha decresce com a distância segundo a Equação 9:

$$K(d) = E \cdot e^{-\frac{d}{\sigma}} , \quad d \leq R \quad (9)$$

onde E é o potencial energético do município (MWh/ano), d é a distância euclidiana entre o centroide e o ponto da malha (m), σ é o parâmetro de escala do decaimento (25.000 m) e R é o raio de influência máximo (50.000 m). Pontos situados além do raio R receberam contribuição nula. A malha de interpolação foi gerada com resolução espacial de 2 km $\times$ 2 km, cobrindo toda a extensão do estado. O valor final em cada célula da malha corresponde à soma das contribuições de todos os municípios dentro do raio de influência.

A adoção do raio de 50 km como limite de influência se fundamenta nas diretrizes do Plano Estadual de Santa Catarina (PERS), que estabelece metas de reaproveitamento de 50% dos resíduos até 2040 e, para distâncias logísticas superiores a 50 km, estimula a formação de consórcios intermunicipais e a criação de estações de transbordo para otimização do transporte até instalações de tratamento. Dessa forma, o raio adotado delimita zonas de viabilidade logística direta, dentro das quais a implantação de tecnologias de recuperação energética pode ser considerada sem necessidade de infraestrutura adicional de transbordo.

A visualização foi gerada com escala de cores, com valor máximo definido pelo percentil 99 da distribuição dos valores positivos da malha, reduzindo o efeito de outliers extremos na representação visual. As regiões sem geração de resíduos registrada no MTR foram mascaradas e apresentadas sem coloração.

3.7. CÁLCULO DE EMISSÕES EQUIVALENTE CARBONO

As emissões evitadas associadas à recuperação energética dos resíduos foram estimadas por meio da abordagem de substituição, recomendada pelas Diretrizes do IPCC (2006), empregada em estudos de avaliação do ciclo de vida e inventários de gases de efeito estufa. Nessa abordagem, considera-se que a energia recuperada a partir dos resíduos substitui fontes convencionais de energia ou combustíveis fósseis, resultando na redução das emissões de gases de efeito estufa.

Para as rotas de biodigestão anaeróbia e incineração com recuperação energética, as emissões evitadas foram calculadas a partir da energia elétrica potencialmente gerada, utilizando o fator de emissão médio da matriz elétrica brasileira. O cálculo foi realizado conforme a Equação 10:

$$CO_{2eq,evitado} = E \cdot FE_{rede} \quad (10)$$

onde:

- $CO_{2eq,evitado}$ corresponde às emissões evitadas (tCO₂eq);
- E é a energia elétrica recuperada (MWh);
- FE_{rede} é o fator de emissão da rede elétrica brasileira (tCO₂eq/MWh).

A metodologia de substituição energética (*displaced emissions*) é utilizada pelo IPCC e por estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (IPCC, 2006). O conceito é que a energia produzida a partir dos resíduos substitui energia da matriz convencional. Para o coprocessamento foi adotada a equivalência energética entre o resíduo e o coque de petróleo, estimando-se a massa de combustível fóssil substituída a partir da razão entre os respectivos poderes caloríficos inferiores (Verdiani et al., 2025). Inicialmente foi calculada a massa equivalente de coque substituída pelo resíduo, considerando a relação entre os poderes caloríficos inferiores (PCI), conforme a Equação 11:

$$M_{coque,eq} = M_{res} \cdot \frac{PCI_{res}}{PCI_{coque}} \cdot IAE_{copro} \quad (11)$$

onde:

- $M_{coque,eq}$ é a massa equivalente de coque substituída (t);
- M_{res} é a massa do resíduo utilizada no processo (t);
- PCI_{res} é o poder calorífico inferior do resíduo (kcal kg^{-1});
- PCI_{coque} é o poder calorífico inferior do coque de petróleo.

Em seguida, as emissões evitadas foram estimadas pela Equação 12:

$$CO_{2eq,evitado} = M_{coque,eq} \cdot FE_{coque} \quad (12)$$

onde:

- FE_{coque} corresponde ao fator de emissão do coque de petróleo ($\text{tCO}_2\text{eq t}^{-1}$).

Além da substituição energética, foi considerada a redução das emissões decorrentes da disposição de resíduos biodegradáveis em aterros sanitários. A decomposição anaeróbia da matéria orgânica gera metano (CH_4), gás de elevado potencial de aquecimento global. Assim, para os grupos de resíduos biodegradáveis (lodos, resíduos orgânicos vegetais, resíduos orgânicos animais e lignocelulósicos), as emissões evitadas pelo desvio de aterro foram estimadas conforme a Equação 13, usando o método FOD (*First Order Decay*) (IPCC, 2000):

$$CO_{2eq,aterro} = M \cdot FE_{aterro} \quad (13)$$

onde:

- M é a massa de resíduos desviada do aterro (t);
- FE_{aterro} é o fator de emissão associado à disposição em aterro ($\text{tCO}_2\text{eq t}^{-1}$).

Por fim, o potencial total de mitigação climática foi obtido pela soma das emissões evitadas pela substituição energética e das emissões evitadas pelo desvio de resíduos biodegradáveis dos aterros sanitários, conforme a equação 14:

$$CO_{2eq,total} = CO_{2eq,energia} + CO_{2eq,coprocessamento} + CO_{2eq,aterro} \quad (14)$$

Essa abordagem permite avaliar simultaneamente os benefícios energéticos e climáticos associados às diferentes tecnologias de recuperação energética analisadas, possibilitando a comparação entre rotas biológicas e térmicas de valorização dos resíduos industriais.

4 RESULTADOS

4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS INDUSTRIAIS GERADOS EM SANTA CATARINA

Os 10 grupos operacionais foram determinados em função das diferentes fontes de geração e características, no APÊNDICE B é possível observar todos os códigos da IN 013/2012 que entraram em cada grupo. Assim, foi encontrado o valor gerado de resíduos pelo MTR para o ano de 2024, totalizando 10.684.437,31 toneladas geradas, dessa quantidade foi filtrado para os resíduos pertencentes aos grupos definidos e filtrado para excluir destinações para a reciclagem e compostagem. Diante disso, na Tabela 7 encontra-se o valor de geração, em toneladas, para cada grupo de resíduo. Após o filtro, o valor total de resíduos analisados é de 4.018.316,84 toneladas.

Tabela 7: Quantidade de resíduos em toneladas gerada em 2024 por grupo

Grupo	Massa (t)
Lignocelulósicos	2.520.442,33
Lodos	888.474,65
Mistos/CDR	273.525,16
Resíduos Orgânicos Animais	157.125,02
Oleosos/solventes	64.284,64
Resíduos Orgânicos Vegetais	55.017,98
Borrachas/pneus	24.948,84
Poliméricos/plásticos	20.562,01

Grupo	Massa (t)
Têxteis	13.936,21

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que os resíduos lignocelulósicos foram os mais gerados entre os grupos analisados, com mais de 2,5 milhões de toneladas, correspondendo a aproximadamente 63% do total filtrado. Esse resultado reflete a expressiva participação da indústria madeireira e do setor de papel e celulose na matriz produtiva catarinense. A Tabela 8 apresenta os 10 municípios com maior geração de resíduos dos grupos analisados, confirmando a predominância dos Lignocelulósicos na maior parte dos municípios, com exceção de Joinville, onde os Mistos/CDR são o grupo prevalente, e Chapecó, onde predominam os Resíduos Orgânicos Animais, resultado coerente com o perfil agroindustrial da região oeste do estado.

Tabela 8: Quantidade de resíduos gerado por município e o grupo de maior geração para os 10 maiores municípios geradores

Município	Massa (t)	Maior Grupo
Caçador	24.168,588	Lignocelulósicos
Lages	26.032,506	Lignocelulósicos
Santa Cecília	7.293,470	Lignocelulósicos
Otacílio Costa	1.904,070	Lignocelulósicos
Fraiburgo	29.943,140	Lignocelulósicos
Joinville	76.383,194	Mistos/CDR
Irati	485,192	Lignocelulósicos
Chapecó	39.598,323	Resíduos Orgânicos Animais
Curitibanos	1.339,508	Lignocelulósicos
Três Barras	3.494,311	Lignocelulósicos

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS POR GRUPO OPERACIONAL

Após a consulta à bibliografia, foram definidos os valores utilizados para as características físico-químicas dos resíduos, seus valores médios são expressos na

Tabela 9. Essa tabela foi construída com base em 18 trabalhos, cujas referências para cada valor podem ser consultadas no APÊNDICE A. Procedimento semelhante foi adotado para os valores da composição química elementar para cada grupo, Tabela 10, baseado em duas fontes bibliográficas.

Tabela 9: Parâmetros médios físico-químicos por grupo de resíduos

Grupos	Fração Orgânica (%)	C/N	Material Volátil (%)	Cinzas (%)	DQO (mg/L)	Umidade (%)
Lignocelulósicos	46	50	81	3,3	30.000	17,5
Poliméricos/plásticos	~1	0	98	10	0	9
Têxteis	55	12	57	19,75	27.985	12,5
Borrachas/pneus	0	39	40	10	0	2
Lodos	75	10	59,57	37,5	215.468	50
Oleosos/solventes	89,5	99	82	17,67	876.364	17,5
Minerais/inertes	0	0	0	94,5	0	0
Mistos/CDR	57,9	0	82,95	9,75	0	18,75
Resíduos Orgânicos Vegetais	78	33	81	6,65	7.500	42,5
Resíduos Orgânicos Animais	62	8	70	22,5	524.500	82,5

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 10: Parâmetros químicos por grupo de resíduos

Grupos	C	H	N	S	O
Lignocelulósicos	38,32	5,34	1,42	0,80	41,99
Poliméricos/plásticos	82,01	12,03	0,43	1,01	2,31
Têxteis	43,55	7,74	1,33	0,87	38,24
Borrachas/pneus	88,20	6,97	2,21	0,59	2,02
Lodos	-	-	-	-	-
Oleosos/solventes	77,40	11,50	0,00	0,00	10,90
Minerais/inertes	6,25	0,43	1,64	1,14	1,98
Mistos/CDR	-	-	-	-	-
Resíduos Orgânicos Vegetais	36,37	4,39	0,78	1,45	36,30
Resíduos Orgânicos Animais	40,03	5,72	1,90	0,46	37,08

Fonte: Elaborado pelo autor

Com os valores dos parâmetros estabelecidos, foi calculado a produção de biogás por tipo de resíduo, utilizando a equação 7, os resultados foram expressos em Nm^3/t , como mostrado na Tabela 11. Os valores de biogás teórico produzido foram realizados apenas entre os grupos que apresentavam considerável taxa de material biodegradável, sendo os lignocelulósicos, têxteis, lodos, óleos e resíduos orgânicos.

Tabela 11: Produção de biogás média por grupo de resíduo

Grupos	Biogás (Nm^3/t)
Lignocelulósicos	146,26
Poliméricos/plásticos	-
Têxteis	193,89
Borrachas/pneus	-
Lodos	1.428,31
Oleosos/solventes	4.220,59
Minerais/inertes	-
Mistos/CDR	-
Resíduos Orgânicos Vegetais	36,57
Resíduos Orgânicos Animais	2.959,03

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos parâmetros encontrados, foi calculado o PCI de cada grupo de resíduo, usando a equação 2, baseado pela análise imediata, para os resíduos lignocelulósicos, lodos, mistos/CDR, orgânicos vegetais e animais e a equação 1, baseado na composição elementar, para os resíduos poliméricos, têxteis, borrachas e oleosos, as equações dão o resultado em MJ/kg , logo pra converter em kcal/kg foi multiplicado pelo fator de conversão igual a 238,84. Na Tabela 12 é apresentado os valores encontrados desta operação, com destaque para os resíduos plásticos, de borrachas e oleosos que apresentaram valores na faixa próxima dos 10.000 kcal/kg de poder calorífero inferior.

Tabela 12: PCIs médios por grupo de resíduo

Grupos	PCI (kcal/kg)
Lignocelulósicos	4335,93
Poliméricos/plásticos	10648,19

Grupos	PCI (kcal/kg)
Têxteis	4545,10
Borrachas/pneus	9424,92
Lodos	2395,51
Oleosos/solventes	9706,12
Minerais/inertes	288,45
Mistos/CDR	3687,10
Resíduos Orgânicos Vegetais	4046,77
Resíduos Orgânicos Animais	3198,03

Fonte: Elaborado pelo autor

4.3. ÍNDICES DE APTIDÃO ENERGÉTICA (IAE)

Para a obtenção dos valores de IAE, primeiro determinou-se os pesos, foi estipulado em uma ordem de importância de três níveis, em seguida foi relacionado em qual nível está o parâmetro, determinando os valores de dos pesos (w_i) de cada parâmetro para cada tecnologia, com a soma de cada tecnologia igual a 1, os pesos foram ajustados para atender os requisitos definidos no Quadro 1, a partir dos critérios bibliográficos do Quadro 2.

Quadro 1: Níveis de importância por critérios bibliográficos

Níveis	Biodigestão	Incineração	Coprocessamento	Peso
Nível I	Viabilidade Crítica	Viabilidade energética	Viabilidade operacional	50%
Nível II	Estabilidade	Eficiência térmica	Restrições de processo	35%
Nível III	Inibidores	Emissões e resíduos	Qualidade do produto	15%

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 2: Níveis de importância por tecnologia e por parâmetro

Tecnologias	PCI	Umidade	MV	Cinzas	Fração orgânica	C/N	Inibidores
Incineração (Oxidação)	Nível I	Nível II	Nível II	Nível III	-	-	Nível III
Coprocessamento (Cimento)	Nível I	Nível II	Nível II	Nível II	-	-	Nível III

Tecnologias	PCI	Umidade	MV	Cinzas	Fração orgânica	C/N	Inibidores
Biodigestão (Anaeróbia)	-	Nível I	Nível II	-	Nível I	Nível II	Nível III

Fonte: Elaborado pelo autor

Com base nessa hierarquização, foram definidos os pesos (w_i) de cada parâmetro para cada tecnologia, com a restrição de que a soma dos pesos seja igual a 1 em cada caso, como foi apresentado na Tabela 6.

As funções de adequação (f_i) foram moldadas a partir da expressão da equação 3, com as equações 4 e 5 moldando esses coeficientes, o resultado é observado na Tabela 13. É possível observar que os valores, que variam de 0 a 1, seguem a relação do valor dos parâmetros para os valores das condições de operação das tecnologias, a partir da Tabela 2.

Tabela 13: Valores da função de adequação por grupo e parâmetro

Grupos	Poder Calorífico (PCI)	Umidade (%)	Cinzas (%)	Material Volátil (%)	Relação C/N	Inibidores	Fração Orgânica
Lignocelulósicos	1,00	0,13	0,11	0,89	0,71	0,17	0,79
Poliméricos	1,00	0,12	0,40	0,98	0,00	0,50	0,72
Têxteis	1,00	0,25	0,44	0,57	0,52	0,50	0,57
Borrachas/pneus	1,00	0,18	0,71	0,50	0,56	0,17	0,00
Lodos	0,35	1,00	0,93	0,56	0,62	0,50	0,89
Oleosos/solventes	1,00	0,11	0,53	0,71	1,00	0,50	0,85
Minerais/inertes	0,00	0,44	1,00	0,00	0,00	0,50	0,00
Mistos/CDR	0,99	0,08	0,72	0,90	0,00	0,17	0,37
Orgânicos Vegetais	0,98	0,75	0,81	0,89	0,50	0,17	0,84
Orgânicos Animais	0,49	0,83	0,36	1,00	0,68	0,17	0,97

Fonte: Elaborado pelo autor

Com os valores de peso (w_i) e da função de adequação (f_i) definidos, calculou-se os índices de aptidão energética, expressos na Tabela 14. Os resultados evidenciam que Lodos e Resíduos Orgânicos Animais apresentam IAE mais elevado para a biodigestão anaeróbia, em razão da alta umidade e fração orgânica

biodegradável desses grupos. Por outro lado, Lignocelulósicos, Poliméricos/Plásticos e Mistos/CDR apresentaram IAEs mais favoráveis para incineração e coprocessamento. Os IAEs de incineração e coprocessamento ficaram próximos entre si para a maioria dos grupos, resultado esperado dado que ambas as tecnologias compartilham parâmetros operacionais similares, com destaque para o PCI como critério de maior peso. Observa-se que os resultados ficaram semelhantes ao destacado na revisão bibliográfica (Seção 2.4).

Tabela 14: Índices de aptidão energética por grupo de resíduos

Grupos	IAE biodigestão	IAE Incineração	IAE Coprocessamento
Lignocelulósicos	0,47	0,62	0,62
Poliméricos/plásticos	0,31	0,71	0,71
Têxteis	0,47	0,65	0,65
Borrachas/pneus	0,33	0,66	0,68
Lodos	0,77	0,29	0,32
Oleosos/solventes	0,60	0,70	0,70
Minerais/inertes	0,31	0,14	0,16
Mistos/CDR	0,36	0,71	0,73
Resíduos Orgânicos Vegetais	0,67	0,63	0,66
Resíduos Orgânicos Animais	0,69	0,32	0,34

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4. POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

A partir dos IAEs obtidos, das eficiências de conversão de cada tecnologia (Tabela 15), dos PCIs calculados e da massa gerada registrada no MTR, foi estimado o potencial de recuperação energética por meio da Equação 6. Para a biodigestão, a energia foi estimada a partir do volume de biogás produzido, do PCI do biogás de 5.100 kcal/Nm³ (IPEA, 2012) e da eficiência elétrica do sistema de aproveitamento.

Tabela 15: Eficiências de conversão elétrica e térmica de cada tecnologia

Tecnologia	Eficiência Elétrica (Média)	Eficiência Térmica / Total
Biodigestão	25% – 36%	65% – 85%
Incineração	20% – 30%	70% – 90%
Coprocessamento	15% - 30%	~100%

Fonte: Adaptado de (RAGOSSNIG; WARTHA; POMBERGER, 2009)

Foi calculado os valores em Megawatts por hora, para cada tecnologia, chegando a um valor somado de 5.634 GWh para biodigestão mais incineração, para energia elétrica, e 10.710 GWh para energia térmica. Na Tabela 16 é apresentado os valores por tecnologia de potencial energético, elétrico para biodigestão e incineração e térmico para o coprocessamento. Essa diferença reflete tanto o maior peso da massa de resíduos aptos ao coprocessamento quanto a eficiência térmica praticamente integral da tecnologia.

Tabela 16: Potencial energético por tecnologia

Elétrica Biodigestão (MWh)	Elétrica Incineração (MWh)	Térmica Coprocessamento (MWh)
2.960.192,98	2.674.002,39	10.710.442,78

Fonte: Elaborado pelo autor

O potencial de recuperação energética, se for utilizado para o abastecimento elétrico de residências, pode abastecer de 2,1 a 3,3 milhões de residências, dividindo o valor obtido pela média de consumo anual das residências brasileiras, que varia de 1.692 a 2.640 kWh, segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica (EPE, 2023).

Os fornos modernos de cimento por via seca, mais comuns no Brasil, possuem um consumo térmico específico que varia entre 3.260 kJ/kg e 3.770 kJ/kg por kg de clínquer produzido (Renó, 2007). Utilizando a média de 3,515 MJ/kg de clínquer e convertendo a energia em MJ, multiplicando por 3.600, temos uma produção de clínquer de aproximadamente 10,97 milhões de toneladas de clínquer, pode-se produzir 15.026.635 toneladas de cimento. O setor da construção civil no

Brasil consome cerca de 67 milhões de toneladas de cimento ao ano, segundo os indicadores do Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2025), então poderia cobrir cerca de 20 % de todo o consumo nacional.

Cabe ressaltar, no entanto, que a realização desse potencial está condicionada ao atendimento dos requisitos operacionais e ambientais discutidos na revisão bibliográfica (Seção 2.7). O controle de emissões atmosféricas, especialmente de dioxinas, furanos e metais pesados, exige sistemas de controle de poluição atmosférica que representam parcela significativa do investimento nas plantas de recuperação energética. Esses aspectos reforçam que o potencial estimado deve ser interpretado como um teto técnico-energético, sujeito a condicionantes ambientais, regulatórios e de viabilidade econômica que extrapolam o escopo deste estudo.

4.5. ESPACIALIZAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO

O potencial energético não é centralizado, varia com a região do estado e das atividades produtivas, na Tabela 17 mostra os municípios que mais têm o potencial de recuperar energia, com o destaque para os municípios do oeste catarinense, comparando com a Tabela 8, o resíduo mais gerado em Chapecó foi biomassa de origem animal, correspondendo com a tecnologia de biodigestão, sendo o grupo de resíduo mais apto para esta tecnologia, Tabela 14, e compatível com o setor produtivo, relacionado a Figura 1, que mostra o oeste catarinense como um grande produtor agroindustrial.

Tabela 17: Top 5 municípios com potencial energético de biodigestão

Município	Elétrica Biodigestão (MWh)
Chapecó	344.130,83
Joinville	211.775,66
Blumenau	154.648,56
Caçador	99.679,53
Otacílio Costa	97.319,59

Fonte: Elaborado pelo autor

Para a incineração e coprocessamento, a Tabela 18 e Tabela 19 mostram os 5 maiores municípios com os maiores potenciais para esses processos, respectivamente. As duas tabelas se assemelham por conta das características dos resíduos para as duas tecnologias, destacando os municípios da serra catarinense. Observando a Figura 1 novamente e a Tabela 8, que mostra os municípios mais geradores, o resíduo mais gerado são os lignocelulósicos, que apresentaram grande aptidão para a incineração e coprocessamento (Tabela 14), e sendo a serra catarinense a região que tem destaque da indústria da madeira, valida os resultados encontrados para estas tecnologias.

Tabela 18: Top 5 municípios com potencial energético de incineração

Município	Elétrica Incineração (MWh)
Caçador	190.670,70
Lages	174.129,13
Santa Cecília	143.708,94
Fraiburgo	91.814,65
Irati	88.909,76

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 19: Top 5 municípios com potencial energético de coprocessamento

Município	Térmica Coprocessamento (MWh)
Caçador	758.168,09
Lages	690.159,56
Santa Cecília	569.366,72
Fraiburgo	366.782,31
Irati	352.082,66

Fonte: Elaborado pelo autor

A espacialização dos dados, por meio da malha de interpolação com raio de influência de 50 km e decaimento exponencial, equação 9, permite visualizar a distribuição geográfica do potencial energético ao longo do território catarinense, o

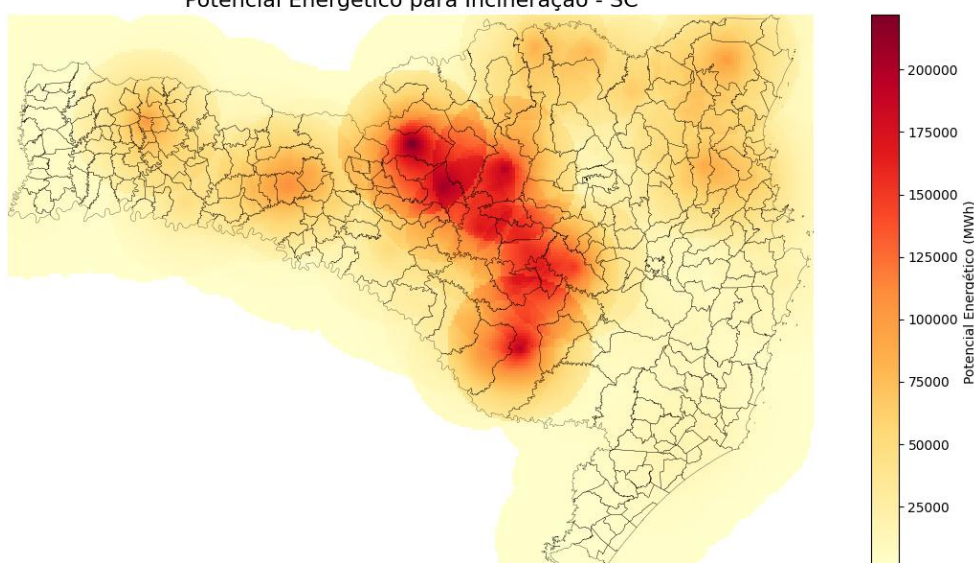
sigma foi determinado como a metade do raio (distância do centroide), caindo ~37% do valor original, para considerar o fator da distância.

Assim, foi possível visualizar a mancha do potencial de recuperação energética por tecnologia, distribuído no estado de Santa Catarina, na Figura 3 e Figura 5, é apresentado o mapa da incineração e coprocessamento, semelhantes, é possível visualizar as regiões onde o potencial é maior, com a região central do estado em destaque, e algumas regiões do norte oeste catarinense e vale do Itajaí. Vale destacar onde os raios de potencial energético se sobrepõem, como foi o caso de Caçador, Santa Cecília e Fraiburgo, formando uma região fortemente candidata para a instalação de uma usina de incineração ou coprocessamento.

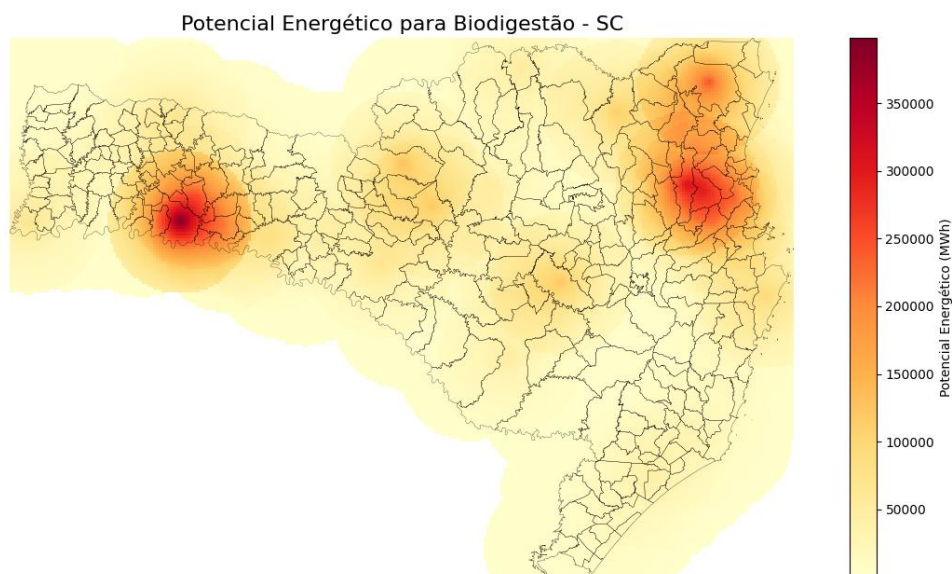
Para a biodigestão na Figura 4, de maneira mais centralizada, municipalmente, o mapa indica uma concentração mais localizada, com Chapecó se destacando como polo principal de potencial, seguido pela região do Vale do Itajaí, de forma mais distribuída, e pela região de Joinville. Essas três regiões configuram as principais áreas candidatas à implantação de sistemas de recuperação energética por biodigestão anaeróbia de resíduos industriais.

Figura 3: Mapa do potencial energético para incineração

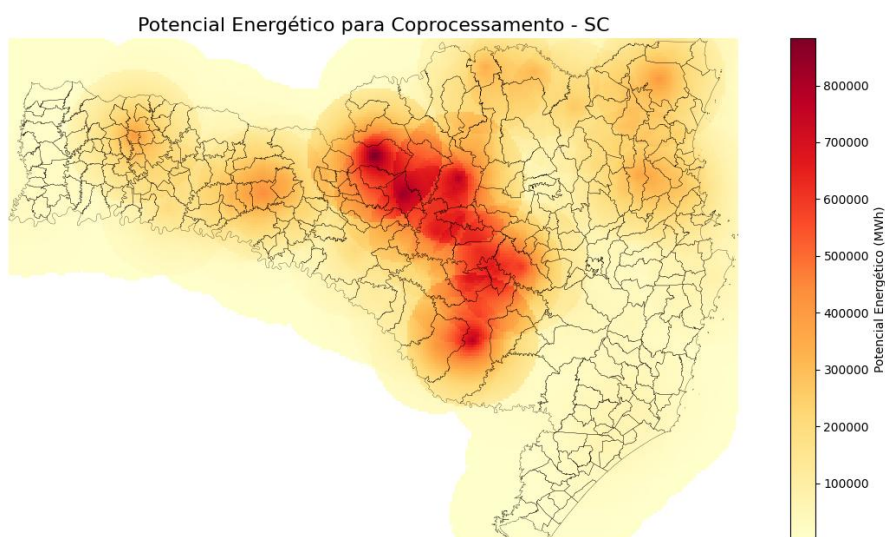
Potencial Energético para Incineração - SC



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 4: Mapa do potencial energético para biodigestão

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5: Mapa do potencial energético para coprocessamento

Fonte: Elaborado pelo autor

A espacialização do potencial energético evidenciou que a distribuição geográfica dos resíduos reflete o perfil produtivo regional do estado. Para as rotas térmicas, incineração e coprocessamento, a Serra Catarinense concentra o maior

potencial, com destaque para a sobreposição dos raios de influência de Caçador, Lages e Santa Cecília, que configuram uma região fortemente candidata à implantação de unidades de recuperação térmica de resíduos. Para a biodigestão, Chapecó se destaca como polo principal, seguido pelo Vale do Itajaí e pela região de Joinville, resultado coerente com a predominância da agroindústria de carnes e alimentos no Oeste catarinense. A metodologia de kernel com decaimento exponencial e raio de 50 km, fundamentada nas diretrizes logísticas do PLANARES, permitiu identificar zonas de viabilidade logística direta, onde a implantação de instalações de recuperação energética pode prescindir de infraestrutura adicional de transbordo.

4.6. ESTIMATIVA DA MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES

A partir dos dados estimados do potencial energético, agora pode-se estimar quanto o aproveitamento destas tecnologias pode impactar a nível de descarbonização, usando as equações 10 para calcular as tecnologias que geraram energia elétrica, e a partir dos dados obtidos na revisão bibliográfica, Tabela 4, foi usado o fator de emissão (FE_{rede}) igual a 0,074 tCO₂eq/MWh, multiplicando pela energia gerada pela biodigestão e incineração.

Para a energia térmica gerada no coprocessamento, foi utilizado a equação 11 para encontrar a quantidade de coque equivalente, necessário para gerar a mesma quantidade de energia, e com esse valor multiplicando pelo fator de emissão do coque (FE_{coque}) igual a 0,7 tCO₂eq/MWh, ou 0,022 tCO₂eq/GJ, pela equação 12, foi feito para cada resíduo e multiplicado pelo IAE de coprocessamento, para isso, a energia encontrada teve que ser transformada em GJ, multiplicando pelo fator de conversão 3,6. Foi um total de 1.247.000 de coque substituído e 860.112 tCO₂eq emissões evitadas.

Os resultados das três tecnologias são expressos na Tabela 20, somando um total de 416.930 tCO₂eq para a substituição elétrica e 860.112 tCO₂eq para a térmica.

Tabela 20: Emissões evitadas pela recuperação energética

Tecnologia	Energia recuperada	Fator de emissão	Emissões evitadas (tCO₂eq /ano)
Biodigestão	2.960.192,98 MWh	0,074 tCO ₂ eq/MWh	219.054
Incineração	2.674.002,39 MWh	0,074 tCO ₂ eq/MWh	197.876
Coprocessamento	38.557.594 GJ*	0,0946 tCO ₂ eq/GJ	860.112
Total recuperação energética			1.211.042

Fonte: Elaborado pelo autor

Para fazer o cálculo das emissões evitadas ao desvio de aterros sanitários, foi considerado a equação 13 para os resíduos biodegradáveis, considerando em um cenário que todos os resíduos são destinados para aterro contra um cenário que todos os resíduos são recuperados energeticamente, lembrando que os resíduos que foram destinados à compostagem foram excluídos da análise. Logo, foi somada a massa dos quatro grupos de resíduos considerados biodegradáveis, totalizando 3.621.060 toneladas, e multiplicada pelo fator de emissão de disposição em aterros sanitários (FE_{aterro}) igual a média dos fatores de emissão associados a esses grupos na Tabela 4, os resultados são apresentados na Tabela 21, resultando em um total de 2.317.777 tCO₂eq evitadas.

Tabela 21: Emissões evitadas pelo desvio de aterro

Grupo	Massa (t)	Fator (tCO₂eq/t)	Emissões evitadas (tCO₂eq)
Resíduos Orgânicos Vegetais	55.018	1,25	68.772
Resíduos Orgânicos Animais	157.125	1,25	196.406
Lodos	888.475	0,75	666.356
Lignocelulósicos	2.520.442	0,55	1.386.243
Total aterro	3.621.060	-	2.317.777

Fonte: Elaborado pelo autor

A aplicação dos fatores de emissão adotados permitiu estimar um potencial total de mitigação de aproximadamente 3,6 milhões de toneladas de CO₂ equivalente por ano. A segunda maior contribuição foi observada no coprocessamento,

responsável por cerca de 800 mil de tCO₂eq (23,9 % do total), em decorrência da substituição do coque de petróleo em fornos de clínquer.

O desvio de resíduos biodegradáveis dos aterros sanitários representou a principal fonte de mitigação, com potencial estimado de 2,32 milhões de tCO₂eq (64,5% do total), refletindo a redução das emissões de metano associadas à decomposição anaeróbia dos resíduos.

As rotas de biodigestão anaeróbia e incineração apresentaram potenciais de mitigação que representaram apenas 11,6 % do total mitigado, associados à substituição parcial da eletricidade proveniente da rede elétrica nacional.

Esse resultado evidencia que o principal benefício climático da recuperação energética de resíduos industriais catarinenses não reside na geração de eletricidade em si, mas em dois mecanismos de maior magnitude: a substituição de combustível fóssil na indústria cimenteira e a supressão de metano evitada pelo desvio de resíduos biodegradáveis dos aterros sanitários. Essa hierarquia decorre da própria natureza dos processos: enquanto a eletricidade gerada por biodigestão e incineração substitui uma matriz elétrica brasileira já predominantemente renovável e, portanto, de baixa intensidade de carbono, o coque de petróleo e o metano de aterro são fontes intrinsecamente mais intensivas em carbono, de modo que sua substituição ou supressão gera ganhos climáticos proporcionalmente maiores por unidade de resíduo desviada.

Esse padrão tem implicações diretas para a priorização de políticas de recuperação energética no estado: enquanto a expansão da geração elétrica a partir de resíduos contribui para a diversificação da matriz energética e para a gestão local de resíduos, seu impacto líquido sobre as emissões de GEE é limitado pela baixa intensidade de carbono do grid nacional. Já o direcionamento de resíduos lignocelulósicos e biodegradáveis para coprocessamento e biodigestão, em vez da disposição em aterros, representa uma estratégia de descarbonização com retorno climático mais expressivo por tonelada de resíduo manejada.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo geral estimar o potencial de recuperação energética dos resíduos industriais gerados em Santa Catarina, a partir dos dados do sistema MTR referentes a 2024, avaliando três rotas tecnológicas, incineração, coprocessamento em fornos de clínquer e biodigestão anaeróbia.

Quanto à caracterização dos resíduos, a análise dos registros do MTR permitiu identificar e organizar os resíduos industriais catarinenses em dez grupos operacionais com propriedades físico-químicas representativas, construídos a partir de critérios relevantes à recuperação energética, poder calorífico, umidade, material volátil, cinzas, fração orgânica biodegradável e relação C/N. Essa caracterização permitiu reduzir a elevada heterogeneidade da base de dados a um conjunto operacionalmente tratável, sem perder a representatividade físico-química necessária à etapa seguinte.

Quanto à classificação tecnológica, o Sistema de Classificação e Avaliação Tecnológica de Resíduos (SCATR), desenvolvido neste trabalho, mostrou-se eficaz para associar cada grupo de resíduo às tecnologias de recuperação energética mais adequadas por meio dos Índices de Aptidão Energética (IAE), calculados pelo método WLC. Os resultados revelaram padrões de compatibilidade coerentes com a literatura, maior aptidão de resíduos úmidos e biodegradáveis para a biodigestão, e de resíduos com alto PCI e baixa umidade para as rotas térmicas, validando a análise do método proposto.

Quanto à estimativa do potencial energético e da quantidade de resíduos recuperados, foram identificadas 4.018.316,84 toneladas de resíduos com potencial de valorização energética, das 10.684.437,31 toneladas totais registradas no MTR. O potencial elétrico combinado de biodigestão e incineração foi estimado em 5.634 GWh/ano, e o potencial térmico do coprocessamento em 10.710 GWh/ano. Do ponto de vista climático, a substituição dessas rotas pela disposição em aterros representaria uma mitigação de aproximadamente 3,6 milhões de tCO₂eq/ano, estimativa obtida em cenário idealizado, sem a inclusão das emissões operacionais

das próprias rotas de recuperação energética, cuja incorporação via Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é recomendada para maior exatidão em estudos futuros.

Quanto à análise espacial, a espacialização do potencial energético confirmou que sua distribuição geográfica acompanha o perfil produtivo regional do estado, com a Serra Catarinense concentrando o maior potencial para rotas térmicas e o Oeste catarinense, com destaque para Chapecó, liderando o potencial de biodigestão. A metodologia de kernel com decaimento exponencial e raio de 50 km, fundamentada nas diretrizes logísticas do PERS, permitiu identificar zonas de viabilidade logística direta para a implantação de futuras instalações.

De forma geral, o SCATR constitui uma contribuição metodológica replicável para outras regiões com sistemas de registro de resíduos similares ao MTR, por se basear inteiramente em dados públicos e dispensar campanhas laboratoriais extensas na fase de triagem. Esse ganho de acessibilidade tem como contrapartida limitações que devem ser consideradas: a adoção do centroide municipal como proxy geográfico da geração, a representação de cada grupo operacional por valores médios da literatura que podem não capturar a variabilidade interna de categorias amplas, como Oleosos/Solventes, com mais de 60 nomenclaturas distintas da IN 013/2012 agrupadas sob um único conjunto de parâmetros, a natureza autodeclaratória e não validada dos registros do MTR, e o caráter puramente técnico do potencial estimado, que não incorpora viabilidade econômica, disponibilidade de instalações licenciadas ou aceitação social. Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a validação laboratorial dos parâmetros físico-químicos adotados, a extensão do método SCATR para segregar em mais grupos de resíduos, ou até por código da IN 013/2012 específico, a inclusão de outras possíveis tecnologias, como gaseificação e pirólise quando houver dados consolidados em Santa Catarina, e a realização de análises de ciclo de vida e de viabilidade econômica para as regiões de maior potencial identificadas, especialmente a Serra Catarinense e o Oeste catarinense.

6 REFERÊNCIAS

ABREMA. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2024**. São Paulo: ABREMA, 2024.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, (2010)

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Roteiro para avaliação da viabilidade de projetos de combustível derivado de resíduos (CDR)**. Brasília, DF: MDR, 2021.

CARRIJO AZEVEDO MELO, Leônidas; ALBERTO SILVA, Carlos; DE OLIVEIRA DIAS, Bruno. **CARACTERIZAÇÃO DA MATRIZ ORGÂNICA DE RESÍDUOS DE ORIGENS DIVERSIFICADAS**. *Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFLA*, 2008.

CARVALHO, Cristina Silva *et al.* **Composição química da matéria orgânica de lodos de esgoto**. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 10, n. 3, p. 413–419, 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Recuperação energética de resíduos sólidos: um guia para tomadores de decisão**. Brasília, DF: CNI, 2019.

Companhia Pernambucana de Meio Ambiente - CPRH. **Roteiro Complementar de licenciamento e fiscalização: Indústria de papel e celulose**. Recife, 1998.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2023.

CREMA, Joana *et al.* **Potencial de desenvolvimento e aplicação de combustível derivado de resíduos sólidos urbanos na indústria de cimentos: estudo de caso de Imbituba/SC**. Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais e de Saneamento, 14 maio 2024.

DA SILVA, Elissando Rocha; TONELI, Juliana Tófano de Campos Leite; PALACIOS-BERECHÉ, Reynaldo. **Estimation of municipal solid waste energy recovery potential using mathematical models of anaerobic biodigestion and incineration**. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 24, n. 2, p. 347–357, 1 mar. 2019.

DE OLIVEIRA, Jairo Pinto *et al.* **Caracterização físico-química de resíduos oleosos do saneamento e dos óleos e graxas extraídos visando a conversão em biocombustíveis**. *Química Nova*, v. 37, n. 4, p. 597–602, 2014.

EUROPEAN COMMISSION. **Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration**. Brussels: European Commission, Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC), 2006.

FABIO RUBENS; SOARES. **Modelos de Negócios Para o aproveitamento energético de resíduos agropecuários e agroindustriais**. 2023.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Guia técnico ambiental de aproveitamento energético de resíduos: tecnologias de aproveitamento energético de resíduos sólidos**. Belo Horizonte: FEAM, 2012.

FIESC – FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SANTA CATARINA. **Atlas da Competitividade da Indústria Catarinense**. Florianópolis: Observatório FIESC, 2022.

Floriani, Silvia Layara. **POTENCIAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS INDUSTRIAIS COMO FONTE DE ENERGIA E AVALIAÇÃO DAS EMISSÕES GASOSAS EM COMBUSTOR EM ESCALA PILOTO**. Florianópolis, 2007.

GHG PROTOCOL. **Especificações do Programa Brasileiro GHG Protocol: contabilização, quantificação e publicação de inventários corporativos de emissões de gases de efeito estufa**. São Paulo: GHG Protocol Brasil, FGV/WRI, 2023.

HEMIDAT, S.; ACHOUR, F.; EL FAGHRI, A.; HYDOUK, K.; OUZOKI, H. **Municipal solid waste treatment by integrated anaerobic digestion and pyrolysis process: energy recovery and greenhouse gas emissions reduction**. *Sustainability*, Basel, v. 11, n. 20, p. 5819, 2019. DOI: 10.3390/su11205819.

HAN, Wenwen; HAN, Deshang; CHEN, Hongbo. **Pyrolysis of Waste Tires: A Review**. *Polymers*. MDPI. , 1 abr. 2023

IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas 2012**. Disponível em: <<http://www.ipea.gov.br>>.

IEA BIOENERGY. **Biogas from Anaerobic Digestion**. Paris: International Energy Agency, IEA Bioenergy Task 37, 1997.

IMA – INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE DE SANTA CATARINA. **Boletim de Desempenho de Resíduos de Santa Catarina**. Florianópolis: IMA, 2024.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama: IGES, 2000.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Volume 5: Waste. Hayama: IGES, 2006.

KUMAR, Atul; SAMADDER, Sukha Ranjan. **Development of lower heating value prediction models and estimation of energy recovery potential of municipal solid waste and RDF incineration.** *Energy*, v. 274, p. 127273, jul. 2023.

MAGALHÃES ARAÚJO, Anderson. **BORRA DE ÓLEO DE SOJA: CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE ECONÔMICA FORTALEZA 2016.** UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. Fortaleza, 2016.

NEUWAHL, Frederik *et al.* **Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration.** European Commition, 2010.

NHUCHHEN, Daya Ram; SALAM, Pio Abdul. **Development of lower heating value prediction models and estimation of energy recovery potential of municipal solid waste and RDF.** *Renewable Energy*, v. 48, p. 388–398, 2012.

ORELLANA, BRUNA BARBARA MACIEL AMORAS *et al.* **CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS DA REGIÃO DO DISTRITO FEDERAL PARA FINS ENERGÉTICOS.** *ENERGIA NA AGRICULTURA*, v. 35, n. 1, p. 46–61, 20 mar. 2020.

PIAIA, Juliano Zaffalon. **Uso de Rejeitos da Coleta Seletiva de Materiais Recicláveis para Produção de Combustível Derivado de Resíduos - CDR.** Programa de PósGraduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, 2021.

PARIKH, Jigisha; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. **A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials.** *Fuel*, v. 86, n. 12–13, p. 1710–1719, ago. 2007.

PARRALEJO, Ana I.; GONZÁLEZ, Jerónimo; ROYANO, Luis; GONZÁLEZ, Juan F. **Optimizing anaerobic co-digestion formula of agro-industrial wastes in semi-continuous regime.** *Energies*, Basel, v. 18, n. 7, art. 1689, 2025

PLANARES – PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Qualidade Ambiental, 2022. 209 p.

RAGOSSNIG, A. M.; WARTHA, C.; POMBERGER, R. **Climate impact analysis of waste treatment scenarios" thermal treatment of commercial and pretreated waste versus landfilling in Austria.** *Waste Management and Research*, v. 27, n. 9, p. 914–921, 2009.

Rossi, Catherine da Rosa. **Potencial de Recuperação Energética dos Resíduos Sólidos Urbanos na Região da AMESC.** Universidade Federal de Santa Catarina. Campus Araranguá. Engenharia de Energia. Repositório UFSC, 2016.

RENÓ, Maria Luiza Grillo. **Cimento e Energia: estudo a partir da análise do ciclo de vida.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

SANTOS, Mariana Ferreira. **PROTOCOLO DE AVALIAÇÃO TÉCNICA DE RESÍDUOS PERIGOSOS PARA REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO EM FORNOS DE CLÍNQUER.** Salvador, 2021. Disponível em: <<http://tede.unifacs.br/tede/handle/tede/828>>. Acesso em: 18 set. 2025.

SEEG – SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES E REMOÇÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. **Emissões de GEE em Santa Catarina.** São Paulo: Observatório do Clima, 2023.

SHAO, Meng *et al.* **A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection.** *Renewable Energy*. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 1 set. 2020

SNIC – SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2025**. Rio de Janeiro: SNIC, 2025.

VERDIANI, V. B.; YAMAJI, F. M.; LIMA, L.; BELINI, G. **Visão geral sobre o processo de coprocessamento na indústria do cimento no Brasil**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 25, e140295, jan./dez. 2025. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

VIEIRA, Victor Hugo Argentino de Moraes; GRIMBERG, Elisabeth; FERRÃO, Pedro Souza; FERREIRA, Rafael Eudes. **Recuperação energética de resíduos sólidos urbanos: mitos e fatos sobre incineração e outras formas de tratamento térmico**. 1. ed. São Paulo: Aliança Resíduo Zero Brasil; Instituto Pólis, 2025.

TSUDA, Taís Miyuki. **UNIDADE DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ANÁLISE PRELIMINAR PARA IMPLANTAÇÃO EM PAÍSES EM DESENVOLVIMENTO**. Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2019

ZYOUN, Shaher H.; FUCHS-HANUSCH, Daniela. **A bibliometric-based survey on AHP and TOPSIS techniques**. *Expert Systems with Applications*. [S.l.]: Elsevier Ltd. , 15 jul. 2017

APÊNDICE A: Referências dos valores de cada parâmetro

Grupos	Fração Orgânica	C/N	Material Volátil	Cinzas	DQO	Inibidores	Umidade
Lignocelulósicos	(Da Silva et al., 2019)	(CNI, 2019)	(ORELLANA et al., 2020)	(ORELLANA et al., 2020)	(CPRH et al., 1998)	(Santos, 2021)	(ORELLANA et al., 2020)
Poliméricos	(CREMA et al., 2024)	-	(CREMA et al., 2024)	(Da Silva et al., 2019)	-	(VIEIRA et al., 2025)	(VIEIRA et al., 2025)
Têxteis	(Floriani, 2007)	(Da Silva et al., 2019)	(Floriani, 2007)	(Floriani, 2007)	(DE OLIVEIRA et al., 2014)	(Floriani, 2007)	(Floriani, 2007)
Borrachas/pneus	-	-	(HAN et al., 2023)	(Da Silva et al., 2019)		(Floriani, 2007)	(Da Silva et al., 2019)
Lodos	(CARVALHO et al., 2015)	(CARVALHO et al., 2015)	(Floriani, 2007)	(Floriani, 2007)	(DE OLIVEIRA et al., 2014)	(Floriani, 2007)	(CNI, 2019)
Oleosos	(DE OLIVEIRA et al., 2014)	(DE OLIVEIRA et al., 2014)	(Araújo, 2016)	(Santos, 2021)	(DE OLIVEIRA et al., 2014)	(Santos, 2021)	(Santos, 2021)
Inertes	-	-	-	(Da Silva et al., 2019)	-	(NEUWAHL et al., 2010)	-
CDR	(CREMA et al., 2024)		(CREMA et al., 2024)	(Santos, 2021)		(Floriani, 2007)	(Santos, 2021)
Org. Vegetais	(ORELLANA et al., 2020)	(CNI, 2019)	(ORELLANA et al., 2020)	(ORELLANA et al., 2020)	(IPEA, 2012)	(CNI, 2019)	(CNI, 2019)
Org. Animais	(Melo et al., 2008)	(Melo et al., 2008)	-	(CREMA et al., 2024)	(IPEA, 2012)	(Da Silva et al., 2019)	-

Fonte: Elaborado pelo autor

APÊNDICE B: Códigos IBAMA por grupo operacional

Grupo Operacional	Código IBAMA	Descrição
Resíduos Orgânicos Vegetais	020103	Resíduos de tecidos vegetais
Resíduos Orgânicos Vegetais	030201(*)	Produtos orgânicos não halogenados de preservação da madeira
Resíduos Orgânicos Vegetais	040210	Matéria orgânica de produtos naturais (por exemplo gordura, cera)
Resíduos Orgânicos Vegetais	190502	Fração não compostada de resíduos animais e vegetais
Resíduos Orgânicos Vegetais	200108	Resíduos biodegradáveis de cozinha e cantinas
Resíduos Orgânicos Vegetais	200201	Resíduos de varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana biodegradáveis
Resíduos Orgânicos Vegetais	200302	Resíduos de mercados públicos e feiras
Resíduos Orgânicos Vegetais	200303	Resíduos da limpeza de ruas e de galerias de drenagem pluvial
Resíduos Orgânicos Vegetais	200306	Resíduos de limpeza de esgotos, bueiros e bocas de lobo

Grupo Operacional	Código IBAMA	Descrição
Resíduos Orgânicos Animais	020102	Resíduos de tecidos animais
Resíduos Orgânicos Animais	020106	Fezes, urina e estrume de animais (incluindo palha suja), efluentes recolhidos separadamente e tratados noutro local
Resíduos Orgânicos Animais	020202	Resíduos de tecidos animais e orgânico de processo (sebo, soro, ossos, sangue, etc.)
Resíduos Orgânicos Animais	190502	Fração não compostada de resíduos animais e vegetais
Resíduos Orgânicos Animais	040210	Matéria orgânica de produtos naturais (por exemplo gordura, cera)
Lignocelulósicos	020107	Resíduos Silvícolas
Lignocelulósicos	030101	Resíduos do descasque da madeira
Lignocelulósicos	030104(*)	Serragem, aparas, fitas de aplainamento, madeira, aglomerados e folheados, contendo substâncias perigosas
Lignocelulósicos	030105	Serragem, aparas, fitas de aplainamento, madeira, aglomerados e folheados não abrangidos em 03 01 04 (*)
Lignocelulósicos	030199	Outros resíduos não anteriormente especificados
Lignocelulósicos	030301	Resíduos do descasque da madeira e resíduos de madeira
Lignocelulósicos	030310	Rejeitos de fibras e lodos de fibras, fillers, e revestimentos, provenientes da separação mecânica
Lignocelulósicos	150101	Embalagens de papel e cartão
Lignocelulósicos	150103	Embalagens de madeira
Lignocelulósicos	170201	Madeira (Classe B conforme Resolução CONAMA 307/02)
Lignocelulósicos	191201	Papel e cartão
Lignocelulósicos	191206(*)	Madeira contendo substâncias perigosas
Lignocelulósicos	191207	Madeira não abrangidas em 19 12 06 (*)
Lignocelulósicos	200101	Papel e cartão
Lignocelulósicos	200137(*)	Madeira contendo substâncias perigosas
Lignocelulósicos	200138	Madeira não abrangida em 20 01 37 (*)
Poliméricos/plásticos	020104	Resíduos de plásticos (excluindo embalagens)
Poliméricos/plásticos	070213	Resíduos e refugos de plásticos
Poliméricos/plásticos	120105	Aparas de matérias plásticas
Poliméricos/plásticos	150102	Embalagens de plástico
Poliméricos/plásticos	160119	Plástico
Poliméricos/plásticos	170203	Plástico (Classe B conforme Resolução CONAMA 307/02)

Grupo Operacional	Código IBAMA	Descrição
Poliméricos/plásticos	191204	Plásticos
Poliméricos/plásticos	200139	Plásticos
Têxteis	040108	Aparas, serragem e pós de couro provenientes de couros curtidos ao cromo
Têxteis	040109	Resíduos da confecção e acabamentos
Têxteis	040209	Resíduos de materiais têxteis (têxteis impregnados, elastômeros, plastômeros)
Têxteis	040221	Resíduos de fibras têxteis não processadas
Têxteis	040222	Resíduos de fibras têxteis processadas
Têxteis	040299	Outros resíduos não anteriormente especificados
Têxteis	150109	Embalagens têxteis
Têxteis	191208	Têxteis
Têxteis	200110	Roupas
Têxteis	200111	Têxteis
Borrachas/pneus	160123	Pneus inservíveis/usados aeronáuticos
Borrachas/pneus	160124	Pneus inservíveis/usados de automóveis
Borrachas/pneus	160126	Pneus inservíveis/usados de caminhões e ônibus
Borrachas/pneus	160128	Pneus inservíveis/usados de tratores
Borrachas/pneus	160129	Pneus inservíveis/usados outras aplicações
Borrachas/pneus	160199	Outros resíduos não anteriormente especificados
Borrachas/pneus	191211	Borrachas
Lodos	020101	Lodos provenientes da lavagem e limpeza
Lodos	020201	Lodos provenientes da lavagem e limpeza
Lodos	020204	Lodos do Tratamento local de efluentes
Lodos	020301	Lodos de lavagem, limpeza, descasque, centrifugação e separação
Lodos	020305	Lodos do Tratamento local de efluentes
Lodos	020403	Lodos do Tratamento local de efluentes
Lodos	020404	Vinhaça
Lodos	020502	Lodos do Tratamento local de efluentes
Lodos	020603	Lodos do Tratamento local de efluentes
Lodos	020701	Resíduos de lavagem, limpeza e redução mecânica das matérias primas
Lodos	020702	Resíduos da destilação de álcool

Grupo Operacional	Código IBAMA	Descrição
Lodos	020705	Lodos do Tratamento local de efluentes
Lodos	030302	Lodos de lixívia verde (provenientes da valorização da lixívia de cozimento ou licor negro)
Lodos	030305	Lodos de branqueamento, provenientes da reciclagem de papel
Lodos	030309	Resíduos de lodo de cal
Lodos	030311	Lodos do tratamento local de efluentes não abrangidos em 03 03 10
Lodos	040106	Lodos, em especial do tratamento de efluentes, contendo cromo
Lodos	040107	Lodos, em especial do tratamento de efluentes, sem cromo
Lodos	040111(*)	Lodos provenientes do tratamento de efluentes líquidos originados no processo de curtimento de couros ao cromo
Lodos	040219(*)	Lodos do tratamento local de efluentes contendo substâncias perigosas
Lodos	040220	Lodos do tratamento local de efluente não abrangidos em 04 02 19 (*)
Lodos	050106(*)	Lodos contendo hidrocarbonetos provenientes de operações de manutenção das instalações ou equipamentos, inclusive lodos provenientes de separadores e da limpeza dos tubos dos trocadores de calor
Lodos	050110	Lodos do tratamento local de efluentes não abrangidos em 05 01 09 (*)
Lodos	061104(*)	Lodo de tratamento de efluentes líquidos originados na produção dos seguintes pigmentos: laranja e amarelo de cromo, laranja de molibdato, amarelo de zinco, verde de cromo, verde de óxido de cromo, (anidro e hidratado) e azul de ferro
Lodos	070101(*)	Líquidos de lavagem e efluentes orgânicos aquosos
Lodos	070111(*)	Lodos de tratamento de efluentes contendo substâncias perigosas
Lodos	070112	Lodos do tratamento local de efluentes não abrangidas em 07 01 11 (*)
Lodos	070201(*)	Líquidos de lavagem e efluentes orgânicos aquosos
Lodos	070212	Lodos do tratamento local de efluentes não abrangidas em 07 02 11 (*)
Lodos	070501(*)	Líquidos de lavagem e efluentes orgânicos aquosos
Lodos	070601(*)	Líquidos de lavagem e efluentes orgânicos aquosos
Lodos	070611(*)	Lodos de tratamento de efluentes contendo substâncias perigosas
Lodos	070612	Lodos do tratamento local de efluentes não abrangidas em 07 06 11 (*)

Grupo Operacional	Código IBAMA	Descrição
Lodos	070699	Outros resíduos não anteriormente especificados
Lodos	070701(*)	Líquidos de lavagem e efluentes orgânicos aquosos
Lodos	070711(*)	Lodos de tratamento de efluentes contendo substâncias perigosas
Lodos	070712	Lodos do tratamento local de efluentes não abrangidas em 07 07 11 (*)
Lodos	101213	Lodos de tratamento local de efluentes
Lodos	110108(*)	Lodos de fosfatização
Lodos	130503(*)	Lodo proveniente do interceptor
Lodos	130801(*)	Lodos ou emulsões de dessalinização
Lodos	140605(*)	Lodos ou resíduos sólidos contendo outros solventes
Lodos	170505(*)	Lodos de dragagem contendo substâncias perigosas (Classe D conforme Resolução CONAMA 307/02)
Lodos	170506	Lodos de dragagem não abrangidos em 17 05 05 (*) (Classe C conforme Resolução CONAMA 307/02)
Lodos	190205(*)	Lodos de tratamento físico-químico contendo substâncias perigosas
Lodos	190206	Lodos de tratamento físico-químico não abrangidos em 19 02 05 (*)
Lodos	190603	Lodo do tratamento anaeróbico de resíduos urbanos e equiparados
Lodos	190604	Lamas e lodos de digestores de tratamento anaeróbico de resíduos urbanos e equiparados
Lodos	190605	Lodo de tratamento anaeróbico de resíduos animais e vegetais
Lodos	190606	Lama e lodos de digestores de tratamento anaeróbico de resíduos animais e vegetais
Lodos	190702(*)	Lixiviados ou líquidos percolados de aterros contendo substâncias perigosas
Lodos	190703	Lixiviados ou líquidos percolados de aterros não abrangidos em 19 07 02 (*)
Lodos	190805	Lodos de tratamento de efluentes urbanos
Lodos	190811(*)	Lodos de tratamento biológico de efluentes industriais contendo substâncias perigosas
Lodos	190812	Lodos de tratamento biológico de efluentes industriais não abrangidos em 19 08 11 (*)
Lodos	190813(*)	Lodos de outros tratamentos de efluentes industriais contendo substâncias perigosas
Lodos	190814	Lodos de outros tratamentos de efluentes industriais não abrangidos em 19 08 13 (*)
Lodos	190899	Outros resíduos não anteriormente especificados
Lodos	190902	Lodos de clarificação da água

Grupo Operacional	Código IBAMA	Descrição
Lodos	191106	Lodos de tratamento local de efluentes não abrangidos em 19 11 05 (*)
Lodos	191303(*)	Lodos da descontaminação de solos contendo substâncias perigosas
Lodos	200304	Lodos de fossas sépticas
Oleosos/solventes	050103(*)	Resíduos provenientes de fundos de tanques empregados na indústria de refino de petróleo, inclusive do tanque de armazenamento de óleo cru
Oleosos/solventes	050108(*)	Outros alcatrões
Oleosos/solventes	070103(*)	Solventes, líquidos de lavagem e efluentes orgânicos halogenados
Oleosos/solventes	070104(*)	Outros solventes, líquidos de lavagem e efluentes orgânicos
Oleosos/solventes	070107(*)	Resíduos de destilação e resíduos de reação halogenados
Oleosos/solventes	070108(*)	Outros resíduos de destilação e resíduos de reação
Oleosos/solventes	070109(*)	Absorventes usados e tortas de filtro halogenados
Oleosos/solventes	070203(*)	Solventes, líquidos de lavagem e efluentes orgânicos halogenados
Oleosos/solventes	070204(*)	Outros solventes, líquidos de lavagem e efluentes orgânicos
Oleosos/solventes	070303(*)	Solventes, líquidos de lavagem e efluentes orgânicos halogenados
Oleosos/solventes	070304(*)	Outros solventes, líquidos de lavagem e efluentes orgânicos
Oleosos/solventes	070308(*)	Outros resíduos de destilação e resíduos de reação
Oleosos/solventes	070399	Outros resíduos não anteriormente especificados
Oleosos/solventes	070408(*)	Outros resíduos de destilação e resíduos de reação
Oleosos/solventes	070410(*)	Outros absorventes usados e tortas de filtro
Oleosos/solventes	070411(*)	Lodos de tratamento de efluentes contendo substâncias perigosas
Oleosos/solventes	070504(*)	Outros solventes, líquidos de lavagem e efluentes orgânicos
Oleosos/solventes	070604(*)	Outros solventes, líquidos de lavagem e efluentes orgânicos
Oleosos/solventes	070608(*)	Outros resíduos de destilação e resíduos de reação
Oleosos/solventes	070609(*)	Absorventes usados e tortas de filtro halogenados e halogenados
Oleosos/solventes	070610(*)	Outros absorventes usados e tortas de filtro
Oleosos/solventes	070703(*)	Solventes, líquidos de lavagem e efluentes orgânicos halogenados
Oleosos/solventes	070704(*)	Outros solventes, líquidos de lavagem e efluentes orgânicos

Grupo Operacional	Código IBAMA	Descrição
Oleosos/solventes	070708(*)	Outros resíduos de destilação e resíduos de reação
Oleosos/solventes	070710(*)	Outros absorventes usados e tortas de filtro
Oleosos/solventes	070799	Outros resíduos não anteriormente especificados
Oleosos/solventes	100126	Resíduos do tratamento de água de arrefecimento
Oleosos/solventes	100211(*)	Resíduos do tratamento de água de arrefecimento contendo hidrocarbonetos
Oleosos/solventes	100212	Resíduos do tratamento de água de arrefecimento não abrangidos em 10 02 11 (*)
Oleosos/solventes	100215	Outros lodos e tortas de filtro
Oleosos/solventes	120106(*)	Óleos minerais de corte e usinagem com halogênios (exceto emulsões, misturas e soluções)
Oleosos/solventes	120107(*)	Óleos minerais de corte e usinagem sem halogênios (exceto emulsões, misturas e soluções)
Oleosos/solventes	120108(*)	Emulsões, misturas e soluções de corte e usinagem com halogênios
Oleosos/solventes	120109(*)	Emulsões, misturas e soluções de corte e usinagem sem halogênios
Oleosos/solventes	120110(*)	Óleos sintéticos de corte e usinagem
Oleosos/solventes	120112(*)	Ceras e gorduras usadas
Oleosos/solventes	120119(*)	Óleos de usinagem facilmente biodegradáveis
Oleosos/solventes	130101(*)	Óleos hidráulicos contendo PCB (1)
Oleosos/solventes	130105(*)	Emulsões não coloidais
Oleosos/solventes	130109(*)	Óleos hidráulicos minerais clorados
Oleosos/solventes	130110(*)	Óleos hidráulicos minerais não clorados
Oleosos/solventes	130111(*)	Óleos hidráulicos sintéticos
Oleosos/solventes	130113(*)	Outros óleos hidráulicos
Oleosos/solventes	130201(*)	Óleos de motores, transmissões e lubrificação usados ou contaminados
Oleosos/solventes	130299(*)	Outros óleos de motores, transmissão e lubrificação
Oleosos/solventes	130301(*)	Óleos de isolamento térmico, de refrigeração e de transmissão de calor usados, fluidos dielétricos e resíduos contaminados com bifenilas policloradas (PCB)
Oleosos/solventes	130306(*)	Óleos minerais isolantes, de refrigeração e de transmissão de calor clorados, não abrangidos em 13 03 01 (*)
Oleosos/solventes	130307(*)	Óleos minerais isolantes, de refrigeração e de transmissão de calor não clorados
Oleosos/solventes	130308(*)	Óleos sintéticos isolantes, de refrigeração e de transmissão de calor

Grupo Operacional	Código IBAMA	Descrição
Oleosos/solventes	130310(*)	Outros óleos isolantes, de refrigeração e de transmissão de calor
Oleosos/solventes	130403(*)	Óleos bunker de outros tipos de navios
Oleosos/solventes	130506(*)	Óleos provenientes dos separadores óleo/água
Oleosos/solventes	130701(*)	Fuel óleo e óleo diesel
Oleosos/solventes	140601(*)	Clorofluorcarbonetos (CFC), HCFC, HFC
Oleosos/solventes	140602(*)	Outros solventes e misturas de solventes halogenados
Oleosos/solventes	140603(*)	Outros solventes e misturas de solventes
Oleosos/solventes	160107(*)	Filtros de óleo automotivos
Oleosos/solventes	190207(*)	Óleos e concentrados da separação
Oleosos/solventes	190208(*)	Resíduos combustíveis líquidos contendo substâncias perigosas
Oleosos/solventes	190209(*)	Resíduos combustíveis sólidos contendo substâncias perigosas
Oleosos/solventes	190809	Misturas de gorduras e óleos, da separação água/óleo, contendo apenas óleos e gorduras alimentares
Oleosos/solventes	190810(*)	Misturas de gorduras e óleos, da separação água/óleo, não abrangidas em 19 08 09
Oleosos/solventes	200125	Óleos e gorduras vegetais alimentares
Oleosos/solventes	200126(*)	Óleos e gorduras não abrangidos em 20 01 25
Mistos/CDR	030307	Rejeitos mecanicamente separados da fabricação de pasta a partir de papel e papelão usado
Mistos/CDR	030308	Resíduos de triagem de papel e papelão destinado a reciclagem
Mistos/CDR	050118(*)	Sólidos provenientes da emulsão residual oleosa, inclusive o sobrenadante proveniente de separadores tipo DAF (Dissolved Air Flotation)
Mistos/CDR	061302(*)	Carvão ativado usado - exceto 06 07 02 (*)
Mistos/CDR	100125	Resíduos do armazenamento de combustíveis e da preparação de centrais elétricas a carvão
Mistos/CDR	101110	Resíduos da preparação da mistura (antes do processo térmico) não abrangidas em 10 11 09 (*)
Mistos/CDR	130501(*)	Resíduos sólidos provenientes de desarenadores e de separadores óleo/água
Mistos/CDR	130508(*)	Misturas de resíduos provenientes de desarenadores e de separadores
Mistos/CDR	150106	Mistura de embalagens
Mistos/CDR	150110(*)	Embalagens de qualquer um dos tipos acima descritos contendo ou contaminadas por resíduos de substâncias perigosas

Grupo Operacional	Código IBAMA	Descrição
Mistos/CDR	170204(*)	Vidro, plástico e madeira, misturados ou não, contendo ou contaminados com substâncias perigosas (Classe D conforme Resolução CONAMA 307/02)
Mistos/CDR	190203	Misturas de resíduos contendo apenas resíduos não perigosos
Mistos/CDR	190204(*)	Misturas de resíduos contendo, pelo menos, um resíduos perigoso
Mistos/CDR	190501	Fração não compostada de resíduos urbanos e equiparados
Mistos/CDR	190801	Resíduos retirados da fase de gradeamento
Mistos/CDR	190802	Resíduos de desarenamento
Mistos/CDR	190901	Resíduos retirados da fase de gradeamento
Mistos/CDR	191210	Resíduos combustíveis (combustíveis derivados de resíduos)
Mistos/CDR	191213	Outros resíduos (incluindo misturas de materiais) do tratamento mecânico de resíduos não abrangidos em 19 12 12 (*)
Mistos/CDR	200203	Outros resíduos de varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana não biodegradáveis
Mistos/CDR	200301	Outros resíduos urbanos e equiparados, incluindo misturas de resíduos
Mistos/CDR	200399	Resíduos urbanos e equiparados não anteriormente especificados
Mistos/CDR	Classe B	Resíduos recicláveis para outras destinações tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas imobiliárias, considerando-se aquelas cujo recipiente apresenta apenas filme seco de tinta em seu revestimento interno, acúmulo de resíduo de tinta líquida e gesso. Classe B conforme Resolução CONAMA 307/02 - Contempla os resíduos códigos 170201, 170202, 170203, 170401, 170402, 170403, 170404, 170405, 170406, 170407, 170411, 170412, 170413 e 170802, conforme IBAMA 13/2012

Fonte: Elaborado pelo autor