



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ



ÉDER LUIZ HADAS

ANÁLISE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM PROJETO DE  
REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
DOS RESÍDUOS GERADOS NOS PROCESSOS DE MANUFATURA DE UMA  
FÁBRICA DE PNEUS

CURITIBA  
2022

ÉDER LUIZ HADAS

ANÁLISE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM PROJETO DE  
REAPROVEITAMENTO ENERGÉTICO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA DOS RESÍDUOS GERADOS NOS PROCESSOS DE MANUFATURA  
DE UMA FÁBRICA DE PNEUS

Dissertação de mestrado apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Manufatura, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Christian Scapulatempo Strobel

Coorientador: Prof. Dr. Márcio Fontana Catapan

CURITIBA  
2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Hadas, Éder Luiz

Análise técnica, econômica e ambiental de um projeto de reaproveitamento energético para geração de energia elétrica dos resíduos gerados nos processos de manufatura de uma fábrica de pneus / Éder Luiz Hadas. – Curitiba, 2022.

1 recurso on-line : PDF..

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Christian Scapulatempo Strobel

Coorientador: Prof. Dr. Márcio Fontana Catapan

1. Resíduos industriais. 2. Recursos energéticos. I. Strobel, Christian Scapulatempo. II. Catapan, Márcio Fontana. III. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura. IV. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE  
MANUFATURA - 40001016171P2

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE MANUFATURA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ÉDER LUIZ HADAS** intitulada: **Análise técnica, econômica e ambiental de um projeto de reaproveitamento energético para geração de energia elétrica dos resíduos gerados nos processos de manufatura de uma fábrica de pneus**, sob orientação do Prof. Dr. CHRISTIAN SCAPULATEMPO STROBEL, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 03 de Junho de 2022.

Assinatura Eletrônica

17/06/2022 10:08:59.0

CHRISTIAN SCAPULATEMPO STROBEL

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

17/06/2022 10:08:39.0

FERNANDO DESCHAMPS

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

18/06/2022 06:50:25.0

LEANDRO ALBERTO NOVAK

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ -  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA)

Assinatura Eletrônica

17/06/2022 12:34:49.0

PABLO DEIVID VALLE

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

17/06/2022 12:44:19.0

MARCIO FONTANA CATAPAN

Coorientador(a) (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 100 - Curitiba - Paraná - Brasil

CEP 81531-980 - Tel: (41) 3361-3123 - E-mail: ufprppgem@gmail.com

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 197558

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp>  
e insira o código 197558

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais Bernadete e Divonsir  
Hadas ao meu irmão Fábio e a minha  
noiva Tatiane.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Christian Scapulatempo Strobel, por todo o seu suporte, dedicação e contribuições para elaboração deste trabalho.

A Universidade Federal do Paraná por fornecer todos os recursos para desenvolvimento de um ensino de qualidade.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Manufatura.

Aos meus colegas de trabalho da Tupy, Rumo e Sumitomo Rubber.

Aos meus pais que considero exemplo de vida e que sempre me incentivaram a estudar e a me desenvolver profissionalmente.

A minha noiva que me suportou nos momentos de dificuldade que aconteceram durante este mestrado.

## RESUMO

A mudança climática global, a poluição ambiental e a redução da disponibilidade de recursos de energia fóssil, fazem com que a energia renovável seja um tema de crescente importância. Neste contexto o aproveitamento de resíduos industriais, através de processos como incineração, pirólise, gaseificação e digestão anaeróbia, para geração de energia, têm sido objeto de estudo de diversos pesquisadores. Nesta linha, este trabalho apresenta uma investigação sobre as tecnologias de conversão energética dos resíduos sólidos e, também, nos requisitos regulatórios e para licenciamento ambiental. Para cumprir o objetivo deste trabalho, foram apresentados dois processos: processo para seleção de tecnologia de recuperação energética e; processo para definição de características regulatórias visando produção e comercialização de energia elétrica. Além destes processos, foram confeccionados dois guias de suporte para apresentar: processo de licenciamento de centrais de recuperação energética de resíduos e; análise de viabilidade financeira para o projeto. Por fim, os processos e guias foram aplicados em um estudo de caso de uma fábrica de pneus com capacidade de produção de 30.000 pneus e, aproximadamente, 2 (duas) toneladas de resíduos sólidos diariamente. Foram obtidos os seguintes resultados através das aplicações dos processos e guias: para esta indústria foi indicado, através do processo para seleção de tecnologia, que a energia seja recuperada através tecnologia de incineração; o processo regulatório sugere que a energia não seja comercializada, portanto o projeto foi enquadrado como de autoprodução de energia; de acordo com o guia ambiental, o projeto precisa ser submetido ao processo de licenciamento completo e; por meio do guia de análise financeira, que o projeto é inviável financeiramente por apresentar um Valor Presente Líquido negativo.

**Palavras-chave:** Recuperação energética; viabilidade financeira; resíduos industriais.

## ABSTRACT

Global climate change, environmental pollution, and the reduced availability of fossil energy resources have transformed renewable energy into a topic of growing importance, and, in this context, the use of industrial waste through processes for energy generation, such as incineration, pyrolysis, gasification, and anaerobic digestion has been the object of study by several researchers. In this regard, this master's thesis presents an investigation of the technologies of energy conversion of solid waste and also of the regulatory requirements and environmental licensing. To fulfill this objective, two processes were presented: (i) a process for the selection of energy recovery technology and; (ii) a process for defining regulatory characteristics aimed at the production and commercialization of electric energy. In addition to these processes, two support guides were created for: (i) the licensing process for waste energy recovery plants and; (ii) a financial feasibility analysis for the project. Finally, the processes and guides were applied in a case study of a tire factory with a production capacity of 30,000 tires and about 2 (two) tons of solid waste per day. The following results were obtained through the application of the processes and guides: for this industry, one indicated that, through the process for technology selection, the energy be recovered through incineration technology; the regulatory model suggests that the energy not be commercialized, therefore the project was classified as self-produced energy; according to the environmental guide, the project needs to be submitted to the complete licensing process and; through the financial analysis guide, one found that the project is financially unfeasible because it has a negative Net Present Value - NPV.

**Key words:** Energy recovery; financial feasibility; industrial waste.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE: Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais;  
ACL: Ambiente de Contratação Livre;  
ACR: Ambiente de Contratação Regulada;  
ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica;  
CCEE: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica;  
CDR: Combustível Derivado de Resíduos;  
CH<sub>4</sub>: metano;  
CO: monóxido de carbono;  
CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono;  
CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente;  
DA: Digestão Anaeróbia;  
FC<sub>0</sub>: investimento inicial;  
FC<sub>k</sub>: período do planejamento;  
GEE: Gases de Efeito Estufa  
H<sub>2</sub>: gás hidrogênio;  
MDL: Mecanismo de Desenvolvimento Limpo;  
ONS: Operador Nacional do Sistema Elétrico;  
Payback: tempo de retorno do investimento;  
PCI: poder calorífico inferior;  
PCS: poder calorífico superior;  
PNMA: Política Nacional de Meio Ambiente;  
PNRS: Política Nacional de Resíduos Sólidos;  
RAS: Relatório Ambiental Simplificado;  
RSI: Resíduos Sólidos Industriais;  
RSU: Resíduos Sólidos Urbanos;  
SCEE: Sistema de Compensação de Energia Elétrica;  
SIN: Sistema Interligado Nacional;  
TIR: taxa do retorno do investimento;  
TMA: Taxa Mínima de Atratividade;  
TMB: Tratamento Mecânico-Biológico;  
VPL: valor presente líquido  
WTE: do inglês Waste-to-Energy - energia de resíduos sólidos.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01 - MAPA DE PROCESSOS DE CONVERSÃO DE RESÍDUOS .....	23
FIGURA 02 - PROCESSOS DE GESTÃO DE RESÍDUOS E SEUS PRODUTOS .....	25
FIGURA 03 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....	28
FIGURA 04 - TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA.....	29
FIGURA 06 - GASEIFICAÇÃO DIRETA E INDIRETA .....	32
FIGURA 07 - ADAPTAÇÃO DO ARRANJO DO CICLO DE RANKINE.....	34
FIGURA 08 - ADAPTAÇÃO DO ARRANJO DO CICLO DE RANKINE REGENERATIVO COM AQUECEDOR DE ALIMENTAÇÃO ABERTO.....	35
FIGURA 09 - DIAGRAMA T-S DO CICLO DE RANKINE REGENERATIVO IDEAL .....	36
FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DO PROJETO DE UMA PLANTA DE INCINERAÇÃO .....	41
FIGURA 11 - CONCEITO DE UM PROJETO DE PIRÓLISE RÁPIDA .....	46
FIGURA 12 - GASEIFICADORES DE LEITO FIXO.....	49
FIGURA 13 - GASEIFICADORES DE LEITO FLUIDIZADO .....	51
FIGURA 15 - DIGESTOR ANAERÓBIO DE BAIXA CARGA.....	56
FIGURA 16 - DIGESTOR ANAERÓBIO DE ÚNICO ESTÁGIO .....	57
FIGURA 17 - DIGESTOR ANAERÓBIO DE DOIS ESTÁGIOS .....	57
FIGURA 18 - FLUXOGRAMA DE PROJETO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA.....	58
FIGURA 19 – FLUXOGRAMA PRIMÁRIO DE UMA PLANTA DE RECUPERAÇÃO PARA PRODUÇÃO INDEPENDENTE DE ENERGIA.....	63
FIGURA 20 - CONFIGURAÇÃO PARA AUTOPRODUÇÃO <i>IN SITU</i> .....	64
FIGURA 21 - CONFIGURAÇÃO PARA AUTOPRODUÇÃO COM UNIDADE DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA <i>IN SITU</i> .....	64
FIGURA 22 - AUTOPRODUÇÃO DISTANTE DO CONSUMO .....	65
FIGURA 23 - FLUXOGRAMA PARA DEFINIÇÃO DE TECNOLOGIA.....	79
FIGURA 24 - FLUXOGRAMA REGULATÓRIO .....	83

FIGURA 25 - FLUXOGRAMA AMBIENTAL.....	86
FIGURA 26 - COMPOSIÇÃO DA VIABILIDADE FINANCEIRA.....	89
FIGURA 27 – DIAGRAMA SIMPLIFICADO DA CENTRAL DE RECUPERAÇÃO POR INCINERAÇÃO .....	92

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 01 - GERAÇÃO DE RESÍDUOS <i>PER CAPITA</i> POR DIA NAS REGIÕES DO BRASIL .....	20
GRÁFICO 02 - OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA NO PAÍS, SEPARADA POR FONTE.....	22
GRÁFICO 03 - PARTICIPAÇÃO SETORIAL NO CONSUMO DE ELETRICIDADE .....	26

## LISTA DE TABELAS

TABELA 01 - PREVISÃO DE CRESCIMENTO DA POPULAÇÃO MUNDIAL ....	20
TABELA 02 - DENSIDADE E PODER CALORÍFICO DO BIOGÁS EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METANO .....	54
TABELA 03 - FLUXO FINANCEIRO DO PROJETO (VALORES EM MIL REAIS). .....	96

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 01 - CUSTOS DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS POR TIPO (US\$/tonelada).....	19
QUADRO 02 - INVESTIMENTOS POR REGIÕES DO BRASIL ANUALMENTE	19
QUADRO 03 - PODER CALORÍFICO DE RESÍDUOS COMUNS .....	41
QUADRO 04 – COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE TECNOLOGIAS PARA INCINERAÇÃO POR COMBUSTÃO .....	43
QUADRO 05 - PRINCIPAIS PROCESSOS DE PIRÓLISE DE BIOMASSA .....	45
QUADRO 06 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS GASEIFICADORES DE LEITO FIXO .....	49
QUADRO 07 - COMPARAÇÃO ENTRE GASEIFICADORES DE LEITO FIXO E LEITO FLUIDIZADO .....	51
QUADRO 08 - CARACTERÍSTICAS DOS AMBIENTES DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA .....	66

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
1.1	O PROBLEMA DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS.....	18
1.1.1	RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS .....	21
1.1.2	SISTEMAS DE GESTÃO DE RESÍDUOS .....	23
1.1.3	PROCESSOS DE GESTÃO DE RESÍDUOS.....	23
1.2	JUSTIFICATIVA.....	24
1.3	OBJETIVO .....	26
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	28
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>29</b>
<b>2.1</b>	<b>PROCESSOS DE CONVERSÃO TÉRMICA DE RESÍDUOS</b> .....	<b>29</b>
<b>2.1.1</b>	<b>Incineração</b> .....	<b>29</b>
2.1.2	Pirólise .....	30
2.1.4	Digestão Anaeróbia .....	32
2.2	PRIMEIRA E SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA.....	33
2.2.1	Ciclo de Rankine.....	33
2.2.2	Ciclo de Rankine Ideal .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.2.3	Ciclo de Rankine Regenerativo Ideal com Aquecedores de Alimentação Aberto .....	35
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>37</b>
3.1	GESTÃO DE RESÍDUOS .....	37
3.2	COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR).....	38
3.3	INCINERAÇÃO .....	38
3.3.1	Poder Calorífico dos Resíduos .....	40
3.3.2	Tecnologias Aplicadas para Recuperação Energética por Meio de Incineração .....	41
3.4	GASEIFICAÇÃO E PIRÓLISE .....	44
3.4.1	Pirólise .....	44
3.4.1.1	<i>Recuperação Energética por Meio da Pirólise</i> .....	44
3.4.2	Gaseificação .....	47
3.4.2.1	<i>Tipos de Gaseificadores</i> .....	48

3.4.2.1.1 Gaseificador de leito fixo.....	48
3.4.2.1.2 Gaseificador de leito fluidizado .....	50
3.4.2.1.3 Gaseificação indireta .....	52
3.5 DIGESTÃO ANAERÓBIA .....	53
3.5.1 Insumos para Digestão Anaeróbia.....	53
3.5.2 Produção de Biogás.....	54
3.5.3 Dimensionamento de um Projeto de Digestão Anaeróbia .....	55
3.5.4 Digestores Anaeróbios.....	55
3.6 ASPECTOS LEGAIS E REGULATÓRIOS.....	58
3.6.1 Autorização para Instalação de Central de Geração de Energia .....	59
3.6.1.1 Diferença entre Concessão e Autorização.....	61
3.6.1.2 Sistema de Compensação de Energia Elétrica para Microgeração e Minigeração Distribuída .....	61
3.6.2 Classificação de Produtores de Energia .....	62
3.6.3 Mercado de Comercialização de Energia Elétrica .....	65
3.6.4 Consumidores de Energia.....	67
3.6.6 Sistemas Elétricos e Modelos Operacionais de Geração no Brasil .....	67
3.6.7 Licenciamento Ambiental.....	68
3.6.7.1 Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA).....	70
3.6.7.3 Relatório Ambiental Simplificado (RAS).....	72
3.6.7.2 Regulamentação Aplicada para o Tratamento Térmico de Resíduos.....	73
3.7 INDICADORES PARA AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROJETO.....	74
3.7.1 Despesas de capital.....	74
3.7.2 Despesas operacionais.....	74
3.7.3 Taxa Mínima de Atratividade (TMA) .....	74
3.7.4 Valor Presente Líquido (VPL) .....	74
3.7.5 Taxa Interna de Retorno (TIR).....	75
3.7.6 Tempo de Retorno ( <i>Payback</i> ).....	75
3.7.7 Custo Nivelado de Energia (LCOE) .....	76
3.8 CRÉDITOS DE CARBONO .....	76
3.8.1 Mecanismo de Desenvolvimento Limpo .....	77

<b>4 DISCUSSÕES E RESULTADOS .....</b>	<b>79</b>
4.1 MODELO PARA DEFINIÇÃO DA TECNOLOGIA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA.....	79
4.1.1 Gestão de Resíduos .....	80
4.1.2 Preparação de Resíduos .....	80
4.1.3 Biodegradabilidade .....	81
4.1.4 Determinação da Tecnologia de Recuperação Energética .....	81
4.1.5 Determinação da Potência.....	82
4.2 MODELO PARA ORIENTAÇÃO SOBRE PROCESSOS REGULATÓRIOS	82
4.2.1 Autorização para Produção de Energia Elétrica .....	83
4.2.2 Classificação da Instalação da Unidade .....	84
4.2.3 Ambientes de Comercialização de Energia .....	84
4.2.4 Modelo Operacional da Central .....	85
4.3 LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE UMA CENTRAL DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS .....	85
4.3.1 Caracterização da Central de Recuperação Energética .....	86
4.3.2 Definição dos Requisitos dos Estudos Ambientais .....	87
4.3.3 Elaboração dos Estudos Ambientais .....	87
4.3.4 Avaliação dos Estudos Ambientais .....	88
4.3.5 Acompanhamento Ambiental .....	88
4.4 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROJETO .....	89
4.4.1 Despesas de Capital .....	89
4.4.2 Despesas Operacionais .....	90
4.4.3 Ganhos .....	90
4.5 VALIDAÇÃO DAS MODELOS DE DECISÃO EM UM ESTUDO DE CASO .	90
4.5.1 Análise da Indústria de Estudo para Definição da Tecnologia .....	91
4.5.2 Definição da Potência da Usina de Recuperação Energética .....	91
4.5.3 Definição de Enquadramento Regulatório da Central .....	92
4.5.4 Licenciamento Ambiental do Projeto.....	93
4.5.5 Avaliação da Viabilidade Financeira do Projeto .....	93
4.5.5.1 <i>Cálculo das Despesas de Investimento</i> .....	93
4.5.5.2 <i>Cálculo das Despesas Operacionais</i> .....	94

<i>4.5.5.3 Cálculo dos Ganhos do Projeto</i> .....	94
<i>4.5.5.4 Fluxo Financeiro do Projeto e Cálculo dos Indicadores</i> .....	95
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>97</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS .....	98
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>99</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O setor industrial é um dos maiores responsáveis pela produção de resíduos no planeta, sendo que no Brasil, por exemplo, ele chega a produzir anualmente cerca de 1,60 bilhão de toneladas de Resíduos Sólidos Industriais - RSI por ano (MMA, 2022).

O aumento na geração de resíduos, estimulado pelo crescimento populacional, desenvolvimento econômico, urbanização e uso intensivo de recursos naturais, têm ocasionado impactos negativos para meio ambiente, sociedade e economia mundial. Além disso, acrescenta-se o fato de que grande parte dos resíduos sólidos não possui uma destinação final correta, causando danos imensuráveis para o meio ambiente. Segundo dados da Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE, das 82,5 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) produzidas no Brasil, apenas 60% tiveram a destinação adequada (ABRELPE, 2021).

Parte destes resíduos, no entanto, podem ser reaproveitados no formato de matéria-prima para aplicação como combustível visando geração de calor ou eletricidade. Portanto, em virtude da possível redução de resíduos dispostos em aterros, a recuperação energética de resíduos pode ser considerada uma prática para o desenvolvimento sustentável.

### 1.1 O PROBLEMA DO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS

Conforme informações descritas por Kaza *et al.* (2018), no mundo geram-se 2,01 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos anualmente, sendo que pelo menos 33% disso – em um cenário conservador – não é gerenciado de maneira ambientalmente correta. Ainda, segundo o mesmo relatório, a perspectiva é de que esse volume anual de resíduos aumente para 3,40 bilhões de toneladas até 2050.

Em virtude desta expectativa de aumento na produção de resíduos, os custos operacionais para a gestão de resíduos são um desafio, pois geralmente excedem US\$ 100 por tonelada, incluindo coleta, transporte, tratamento e descarte; por outro lado, países de baixa renda gastam menos no gerenciamento de resíduos em termos absolutos: cerca de US\$ 35 por tonelada (KAZA *et al.*, 2018).

O Quadro 01 apresenta o resumo das despesas típicas de gerenciamento de resíduos em suas principais categorias.

QUADRO 01 - CUSTOS DE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS POR TIPO (US\$/tonelada)

	Países de baixa renda	Países de baixa-média renda	Países de média-alta renda	Países de alta renda
Coleta	20-50	30-75	50-100	90-200
Aterro controlado	10-20	15-40	20-65	40-100
Aterro não controlado	2-8	3-10	-	-
Reciclagem	0-25	5-30	5-50	30-80
Compostagem	5-30	10-40	20-75	35-90

FONTE: Kaza *et al.* (2018).

Segundo a Abrelpe (2021), o mercado de limpeza urbana movimentou, em 2020, R\$ 27 bilhões. O Quadro 02 apresenta a composição dos investimentos anuais relativos ao gerenciamento de resíduos no Brasil separados por regiões.

QUADRO 02 - INVESTIMENTOS POR REGIÕES DO BRASIL ANUALMENTE

Regiões	Total (R\$ bilhões/ano)
Norte	1,91
Nordeste	6,23
Centro-Oeste	1,34
Sudeste	14,76
Sul	3,07
Brasil	27,32

FONTE: ABRELPE (2021).

A Tabela 01 exibe a previsão do crescimento da população mundial, estimado em mais de 1 bilhão de pessoas nos próximos 10 anos, atingindo 8,5 bilhões em 2030; em 2050 deverão ser 9,8 bilhões de pessoas (UNITED NATIONS, 2018). O crescimento populacional esperado, unido com a urbanização e o desenvolvimento social, aliado à melhoria do padrão de vida da humanidade, resultará em um aumento na geração de resíduos sólidos em todo o mundo.

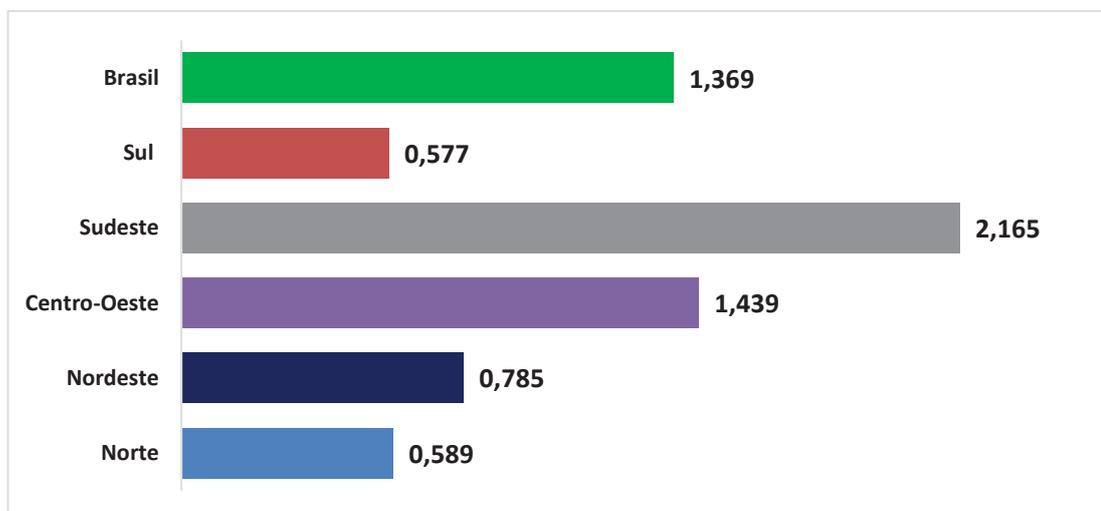
TABELA 01 - PREVISÃO DE CRESCIMENTO DA POPULAÇÃO MUNDIAL

REGIÃO GEOGRÁFICA	POPULAÇÃO (MILHÕES)				
	1950	1990	2018	2030	2050
Mundial	2536	5331	7633	8551	9772
África	229	635	1288	1704	2528
Ásia	1404	3221	4545	4947	5257
Europa	549	722	743	739	716
América Latina e Caribe	169	446	652	718	780
América do Norte	173	280	364	395	435
Oceania	13	27	41	48	57

FONTE: UNITED NATIONS (2018).

No mundo, a média de resíduos sólidos urbanos gerados por pessoa por dia é de 0,74 kg, mas varia entre 0,11 kg em países mais pobres e 4,54 kg nos países desenvolvidos (KAZA *et al.*, 2018).

No Brasil, a média de produção de resíduos por pessoa é de 1,4 kg por dia, o que totaliza uma taxa de cerca de 511 kg ao ano para cada brasileiro (Abrelpe, 2021). O Sudeste produz resíduos em proporção maior que sua participação na população brasileira, pois cada habitante dessa região produz em média 2,16 kg de resíduos sólidos por dia; conseqüentemente, a região gera o equivalente a 66% dos RSU do país (Abrelpe, 2021). O Gráfico 01 apresenta a geração *per capita* por dia de RSU em cada região do país.

GRÁFICO 01 - GERAÇÃO DE RESÍDUOS *PER CAPITA* POR DIA NAS REGIÕES DO BRASIL (EM QUILOGRAMAS).

FONTE: ABRELPE (2021).

Segundo a Abrelpe (2021), a despeito da gestão de resíduos no Brasil, em 2020 foram geradas 82,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU), destes 92,2% (76,1 milhões de toneladas) foi coletado, mas apenas 60,2% (45,8 milhões de toneladas) receberam a destinação adequada em aterros sanitários. Portanto, 30,2 milhões de toneladas de RSU acabaram em lixões ou aterros controlados, que não possuem um conjunto de sistemas e medidas mandatórios para proteger a saúde humana e o meio ambiente contra danos e degradações.

Neste sentido, a Lei nº 12.305 (Brasil, 2010b), que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, dispõe sobre os princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos.

### 1.1.1 RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS

Em contrapartida ao problema do crescimento na geração de resíduos no mundo atual, uma grande fração dos resíduos sólidos urbanos é tratada através de plantas de recuperação de energia de resíduos sólidos (*Waste-to-Energy* - WTE). Nesse sentido, para Kothari, Tyagi e Pathak (2010), destacam que a compatibilidade ambiental tornará os resíduos um dos principais substitutos das fontes de energia não renováveis.

Muitos países europeus e da Ásia, motivados por uma preocupação com a qualidade das águas e a escassez de espaço em aterros, promoveram programas de construção de usinas WTE na década de 1960 (METCALFE e FOSTER, 2004).

As tecnologias para recuperação de energia de resíduos desempenham papéis diferentes na reciclagem considerando a economia circular, haja vista que existem resíduos sem valor de mercado ou material, mas que possuem valor calorífico e por isso podem ser convertidos em energia para substituição do uso de combustíveis fósseis (QAZI *et al.*, 2018).

Segundo Mutz *et al.* (2017), o nome *Waste-to-Energy* refere-se a uma gama de tecnologias capazes de transformar resíduos sólidos em energia calorífica, eletricidade ou combustíveis alternativos. Portanto, fazem parte deste espectro de tecnologias: o processo de produção de gás de cozinha através de digestores de resíduos orgânicos, a coleta de gás metano em aterros sanitários, o tratamento térmico de resíduos em instalações de incineração ou gaseificação, a produção de

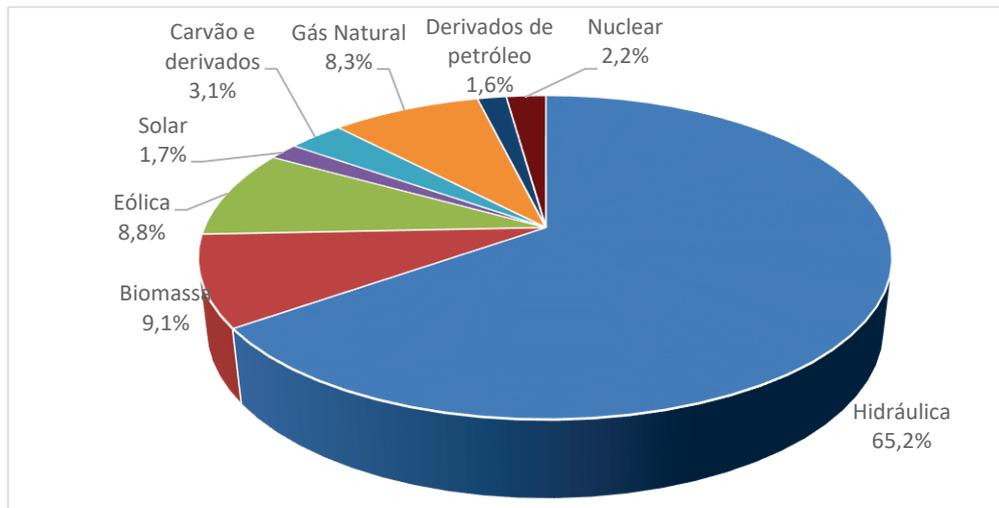
combustíveis por meio da pirólise e, até mesmo, a produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR).

Além de proporcionar o problema do crescimento da produção de resíduos, os crescimentos econômico e populacional são fatores importantes para o aumento da demanda de energia elétrica no mundo. Em decorrência desses fatores, a EIA (*U. S. Energy Information Administration*) em 2021 estimou que o uso global de energia aumentará em quase 50% até 2050.

De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia (MME, 2021), o Brasil dispõe de uma matriz elétrica predominantemente renovável, sendo que a fonte principal é a hídrica, que corresponde a 65,2% da oferta interna.

As fontes renováveis representam 84,8% da matriz de oferta de energia elétrica no Brasil (Gráfico 02), de uma capacidade total instalada de geração de energia elétrica do Brasil de 174.737 MW (MME, 2021).

GRÁFICO 02 - OFERTA DE ENERGIA ELÉTRICA NO PAÍS, SEPARADA POR FONTE



FONTE: MME (2021).

Considerando a possibilidade de recuperar energia de resíduos sólidos, o parágrafo primeiro da Lei n° 12.305 dá a autorização abaixo, mas é competência dos estados licenciar este tipo de atividade.

Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental. (BRASIL, 2010b).

### 1.1.2 SISTEMAS DE GESTÃO DE RESÍDUOS

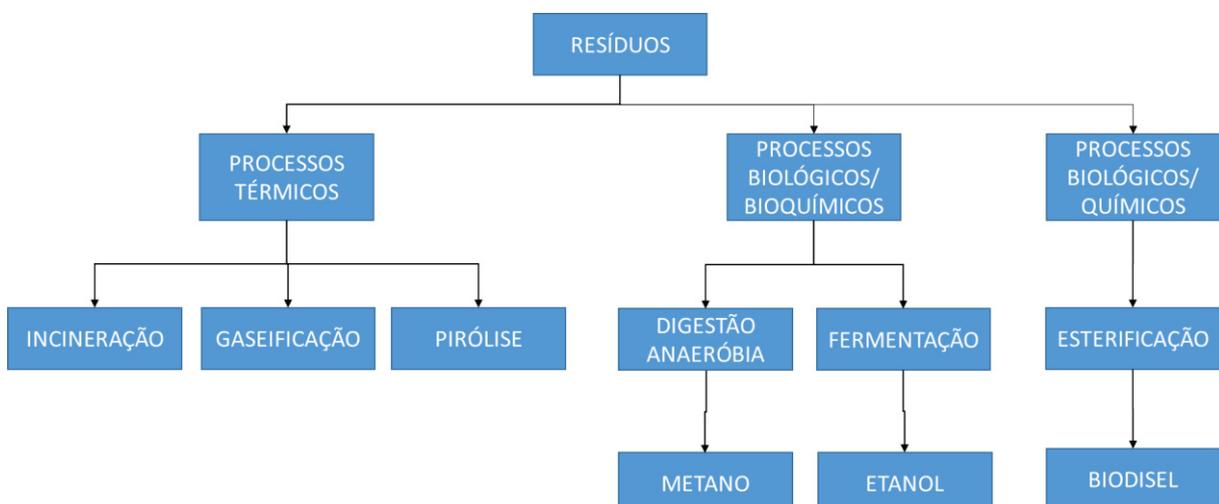
Os objetivos de um sistema de gestão de resíduos são a recuperação de materiais e de energia para posterior destinação em outros processos ou outros ramos de manufatura (ALI *et al.*, 2010). Logo, a escolha ideal para uma tecnologia de processamento de resíduos não está apenas sujeita a requisitos econômicos, capacidade de recuperação de energia ou redução de resíduos, mas também reside na busca do atendimento dos requisitos ambientais. Portanto, para obter um processo de gerenciamento de resíduos eficiente, é necessário selecionar a melhor tecnologia de processamento disponível.

### 1.1.3 PROCESSOS DE GESTÃO DE RESÍDUOS

As tecnologias WTE utilizam resíduos para produzir energia, preferencialmente calor e eletricidade. Segundo Lavaee (2013), é possível produzir energia através de resíduos convertidos em combustível na forma sólida, gasosa ou líquida, e, alternativamente, do calor e vapor resultantes da incineração dos mesmos.

Para Wagner (2007), os projetos WTE podem ser classificados como térmicos, bioquímicos/biológicos ou químicos. Os processamentos bioquímicos/biológicos são divididos em digestão anaeróbia – que levam à produção de matéria-prima química – e fermentação, que resulta na produção de etanol. O processamento químico passa pelo processo de esterificação e, finalmente, transforma-se em biodiesel (Figura 01).

FIGURA 01 - MAPA DE PROCESSOS DE CONVERSÃO DE RESÍDUOS



FONTE: LAVAEE (2013); WAGNER (2007).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

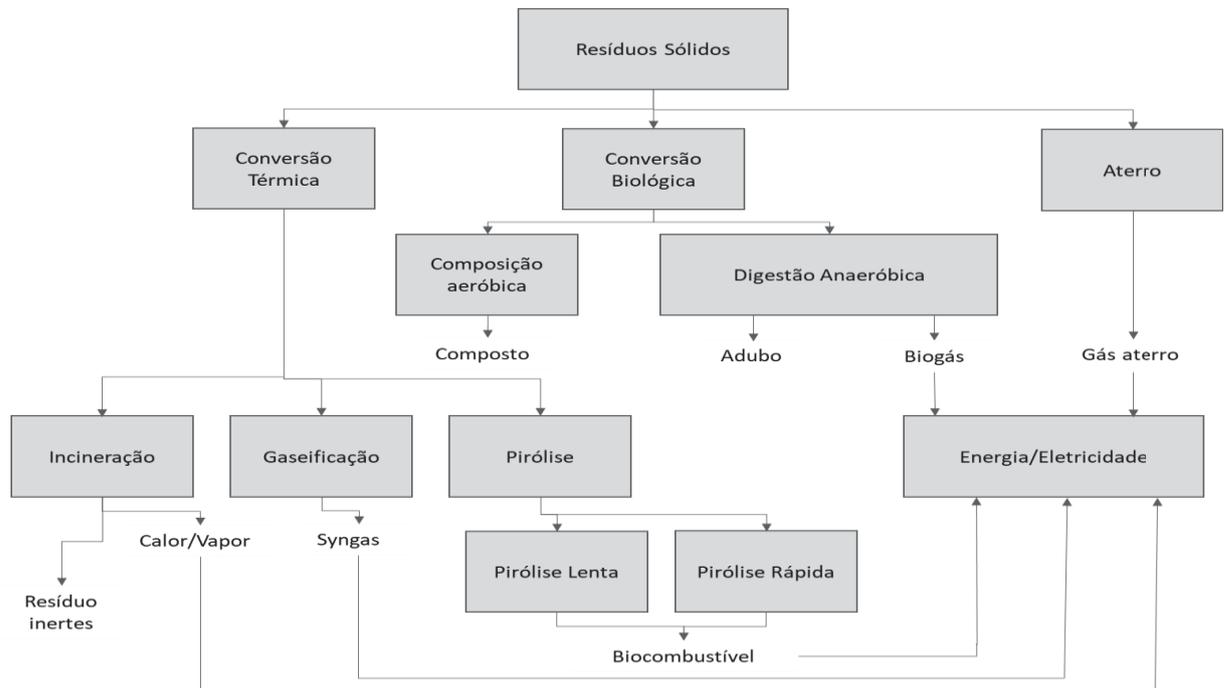
A preocupante perspectiva de aumento de geração de resíduos sólidos, atrelado aos altos custos de gerenciamento, leva a comunidade científica, assim como os poderes público e privado, em todo o mundo, a buscarem alternativas de aproveitamento dos resíduos de forma eficiente.

As indústrias têm papel fundamental na busca pelo desenvolvimento sustentável, uma vez que são responsáveis pela produção de grande parte dos resíduos, fato que torna as tecnologias de recuperação energéticas uma grande oportunidade.

As tecnologias para recuperação de energia por meio de resíduos podem ser consideradas recentes, eficientes e sustentáveis, pois suportam o conceito de “recuperação”, definido na hierarquia de gerenciamento de resíduos (JOUHARA *et al.*, 2017). Entretanto, existe uma variedade de processos de conversão de resíduos em energia, nos quais (como detalhado na Figura 02) as três tecnologias mais usadas são (KUMAR; SAMADDER, 2017):

- (i) conversão térmica (incineração, pirólise, gaseificação, produção de energia a partir de Combustível Derivado de Resíduos (CDR);
- (ii) conversão biológica (digestão anaeróbia/biometanação e compostagem); e
- (iii) aterro com recuperação de gás.

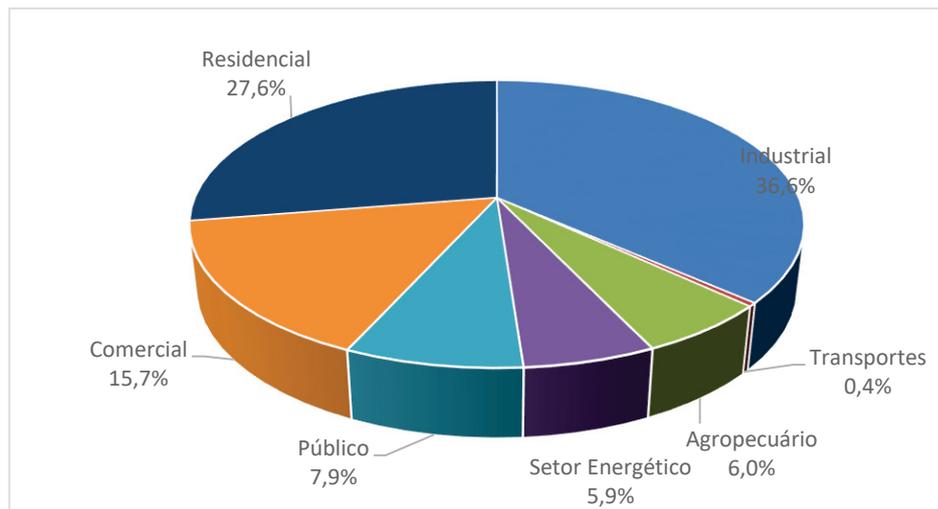
FIGURA 02 - PROCESSOS DE GESTÃO DE RESÍDUOS E SEUS PRODUTOS



FONTE: KUMAR; SAMADDER (2017).

Setor foco deste trabalho, a indústria possui a principal parcela da participação setorial no consumo de energia elétrica no Brasil (Gráfico 03), parcela esta que correspondente a 36,6% do total de 540,2 TWh (MME, 2021).

GRÁFICO 03 - PARTICIPAÇÃO SETORIAL NO CONSUMO DE ELETRICIDADE



FONTE: MME (2021).

### 1.3 OBJETIVO

O objetivo desta dissertação é descrever processos e guias para compreensão das principais tecnologias de conversão resíduos sólidos industriais em energia elétrica, abrangendo as implicações legais e aspectos financeiros relacionados à implantação de um projeto deste gênero no Brasil.

Como objetivos específicos necessários para este desenvolvimento, o trabalho também pretende:

- Apresentar processo para suportar a seleção da tecnologia de recuperação energética de resíduos para indústrias.
- Apresentar processo para suportar o processo de regulamentação da instalação, comercialização e operação de uma usina de recuperação energética.
- Apresentar guias para suporte no processo de licenciamento ambiental e análise viabilidade financeira.
- Aplicar processos e guias apresentados em um estudo de caso de uma indústria no Brasil.

## 1.4 PREMISSAS

Visando confeccionar este trabalho e alcançar seus objetivos foram assumidas premissas:

- Os processos de conversão energética serão descritos e não será considerado aspectos como eficiência e detalhamentos tecnológicos.
- Devido as constantes atualizações, as regulamentações energéticas consideradas serão as validas até maio do ano de 2022.
- O trabalho da ênfase as legislações ambientais nacionais, pois os processos de licenciamento ambiental possuem diferenças em cada estado brasileiro
- A avaliação econômica do projeto será realizada de maneira simplificada e de maneira representativa.

## 1.5 METODOLOGIA

Ao longo da elaboração deste trabalho foram utilizadas pesquisas bibliográfica e documental para obtenção de dados e informações.

Inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica sobre os processos de conversão energética de resíduos. Com base no conhecimento gerado nesta revisão apresentou-se os processos de recuperação energética de maneira consolidada.

Para apresentar a regulamentação de empreendimentos de recuperação energética, fez-se necessário realizar uma pesquisa bibliográfica sobre as legislações aplicadas. Por meio desta, foi possível identificar as etapas necessárias para regularizar um projeto deste gênero.

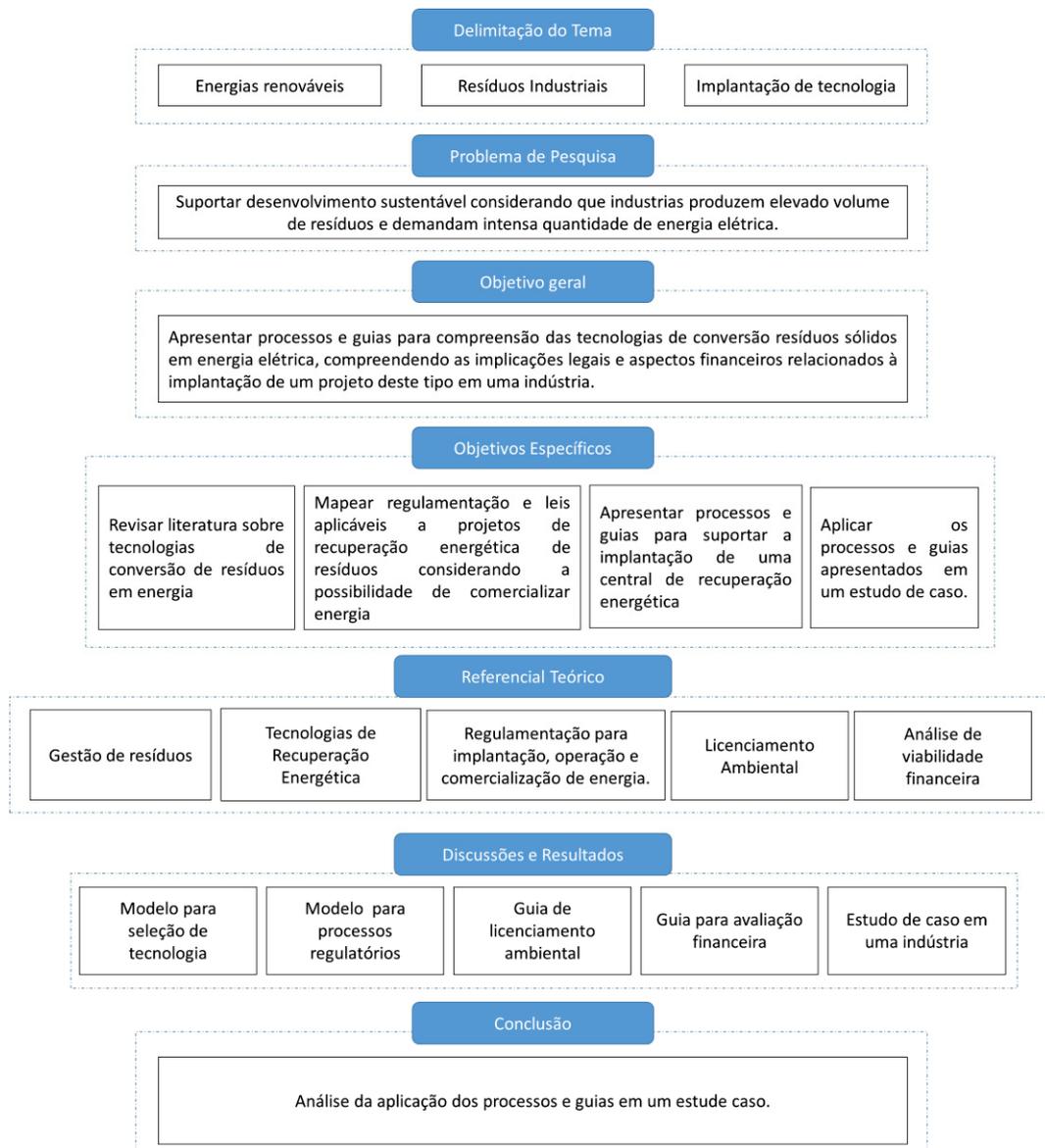
Visando consolidar o processo aplicado para licenciamento ambiental foi feita revisão bibliográfica das leis aplicadas a um projeto de recuperação energética. Através desta consolidação, foram apresentadas as etapas de licenciamento de um projeto deste gênero.

Por fim, foram estudados os processos aplicados para avaliação econômica de um projeto e aplicado em um estudo de caso. Além da viabilidade econômica, neste estudo de caso foi analisado a aplicação dos processos de escolha da tecnologia, regulamentação e licenciamento ambiental.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho propõe, conforme fluxograma apresentado na Figura 03, o desenvolvimento de pesquisa científica, para suportar decisões relativas à implantação de uma usina de recuperação energética de resíduos sólidos, em uma indústria no Brasil. No trabalho são estudados tecnologias, legislações, regulamentações e indicadores para análise de viabilidade financeira. Com as informações dos estudos consolidadas, são apresentados processos e guias para suportar decisões sobre a implantação de uma central de recuperação energética em uma indústria.

FIGURA 03 - ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO



Fonte: O autor (2022).

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A pesquisa utilizou método descritivo analítico, por meio de revisão bibliográfica, com consultas a publicações, legislações e regulamentações relacionadas ao tema em estudo.

### 2.1 PROCESSOS DE CONVERSÃO TÉRMICA DE RESÍDUOS

Desde o início do século 19, os resíduos sólidos são utilizados para a produção de calor e energia (Nogueira, 2015), sendo que várias soluções relacionadas às estratégias de gerenciamento de resíduos tratam-se de conversões térmicas (SINGH *et al.*, 2011). Existem principalmente quatro abordagens para produzir calor e/ou energia, a partir dos resíduos sólidos, nas quais, três estão na categoria de processamento térmico e uma (Digestão Anaeróbia) é da categoria bioquímica/biológica (LAVAEE, 2013). A Figura 04 ilustra os processos comuns de recuperação energética no setor de gerenciamento de resíduos.

FIGURA 04 - TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA



FONTE: LAVAEE (2013).

#### 2.1.1 Incineração

Segundo Tillman, Rossi e Vick (1989), incineração é a “destruição térmica de organismos através da combustão, ou seja, a oxidação a altas temperaturas”. A incineração é uma técnica comum para o tratamento de resíduos, pois pode reduzir a massa destes em 70% e o volume em até 90%, além da capacidade de fornecer

recuperação energética dos resíduos para produzir energia elétrica (SINGH *et al.*, 2011). A incineração é considerada também como um processo de reciclagem energética, onde a energia contida nos resíduos, liberada na queima, é um bem que é reaproveitado para outros processos (SANTOS, 2011).

O processo de recuperação energética deve ser realizado em três etapas: (i) incineração, (ii) recuperação energética e (iii) controle da poluição do ar (KALYANI; PANDEY, 2014).

A incineração é realizada em uma faixa de temperatura de 750 a 1000 °C e produz resíduos de cinza efetivamente estéreis (KALYANI; PANDEY, 2014). Para Singh *et al.* (2011), o desafio do processo de incineração é o controle de poluentes emitidos no ar, pois o processo gera poluentes como SO<sub>x</sub>, CO<sub>x</sub> e NO<sub>x</sub>, que podem proporcionar riscos à saúde da população em geral. Portanto, a incineração de resíduos sólidos pode resultar em poluição do ar, a menos que os incineradores estejam bem equipados com acessórios adequados de controle de poluentes.

A incineração de resíduos sólidos pode acontecer através da queima em massa ou pela queima de combustíveis derivados de resíduos (CDR). O processo de produção de CDR foi desenvolvido para evitar a queima imediata de resíduos e, em vez disso, transformá-los em um combustível que pudesse ser transportado e armazenado (SANTOS, 2013). Os CDR são constituídos essencialmente por materiais de natureza orgânica (têxteis, papel, plásticos, madeira, borracha, etc.), representando um recurso valioso em virtude de elevado poder calorífico (CHANG; CHEN; CHANG, 1998).

Conceitualmente, centrais de incineração de resíduos produzem energia elétrica através de caldeiras de recuperação de energia, que produzem vapor em alta pressão para movimentar uma turbina acoplada a um gerador para produção de energia elétrica.

### 2.1.2 Pirólise

A pirólise é um processo térmico que ocorre na ausência de oxigênio, este tratamento térmico acontece por uma fonte de calor externa que proporciona temperaturas superiores a 400 °C e geralmente inferiores a 800 °C, produzindo: gases, líquidos (óleo) e sólidos (carvão) – todos com características combustíveis (LOMBARDI; CARNEVALE; CORTI, 2015).

Segundo Kumar e Samadder (2017), a pirólise em temperaturas mais baixas, entre 500 e 550 °C produz o óleo de pirólise, a cera e o alcatrão; nas temperaturas mais altas, maiores que 700 °C, os gases de pirólise são os principais produtos.

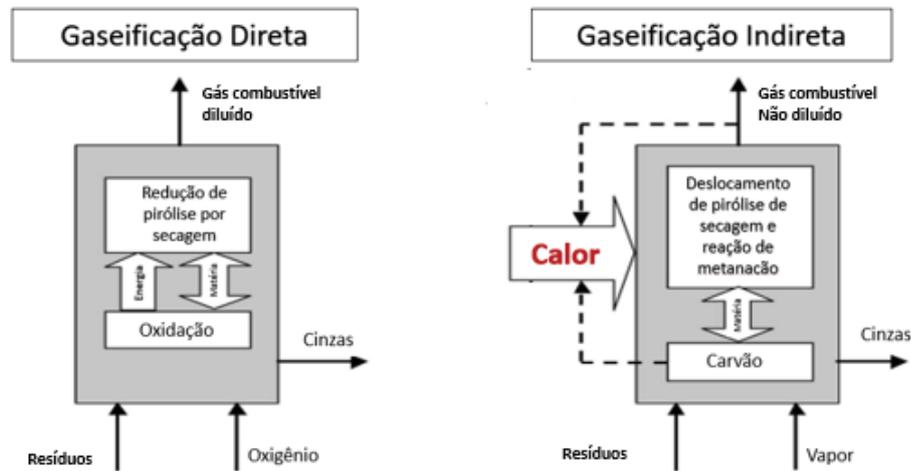
Lombardi, Carnevale; Corti (2015), citam que a pirólise recebeu atenção especial recentemente na reciclagem de pneus de sucata para recuperação de óleo, arame, negro de fumo e gás, ficando evidente seu bom desempenho no tratamento de resíduos. Os produtos obtidos possuem várias aplicações; dentre elas, está a combustão em fornos, caldeiras e motores a combustão (GONÇALVES, 2007).

Singh *et al.* (2011) listam as vantagens referentes ao processo de pirólise: (a) redução significativa no volume de resíduos (<50-90%); (b) produção de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos a partir de resíduos; (c) combustível ou produto químico armazenável; (d) redução de problemas ambientais; (e) processo de produção de energia é obtido de fontes renováveis, como resíduos sólidos urbanos ou lodo de esgoto; (f) o custo de capital pode ser comparativamente menor que o do processo de incineração; e (g) uma vez iniciado, o processo é autossustentável.

### 2.1.3 Gaseificação

Para Singh *et al.* (2011), a gaseificação pode ser definida como a conversão termoquímica de um material sólido ou líquido à base de carbono (matéria-prima) em um produto gasoso combustível (gás combustível), através do fornecimento de um agente de gaseificação (outro composto gasoso). Lombardi, Carnevale e Corti (2015) complementa, a gaseificação ocorre através da oxidação parcial de um combustível sólido na presença de um oxidante em uma quantidade inferior à exigida para a combustão estequiométrica, obtendo-se um produto denominado “gás de síntese” ou “syngas”. O processo que não ocorre com agente oxidante é reconhecido como gaseificação indireta e precisa de uma fonte de energia externa (Figura 06). O vapor é o agente de gaseificação indireta mais comum, porque é produzido facilmente e aumenta o teor de hidrogênio do gás combustível (BELGIORNO *et al.*, 2003).

FIGURA 06 - GASEIFICAÇÃO DIRETA E INDIRETA



FONTE: BELGIORNO *et al.* (2003).

De acordo com Singh *et al.* (2011), um sistema de gaseificação é composto de três elementos fundamentais: (1) o gaseificador, para produção do gás combustível; (2) o sistema de limpeza de gás, necessário para remover compostos nocivos do gás combustível; e (3) o sistema de recuperação energética. Ainda, o sistema de gaseificação deve ser complementado com subsistemas para controlar os impactos ambientais, como, por exemplo, a poluição do ar, produção de resíduos sólidos e águas residuais.

Para um processo eficiente, a gaseificação exige materiais à base de carbono suficientemente homogêneos, em caso contrário, será necessário um pré-tratamento dos insumos (SINGH *et al.*, 2011).

#### 2.1.4 Digestão Anaeróbia

A Digestão Anaeróbia (DA) é um processo em que ocorre a degradação de matéria orgânica por microrganismos sob condições anaeróbias (em um ambiente sem oxigênio livre), processo que leva à produção de biogás, o qual pode ser considerado uma fonte de energia renovável (KELLEHER *et al.*, 2002). Portanto, trata-se de processo para recuperação energética de resíduos com altos níveis de biodegradabilidade.

Em relação à maioria das outras tecnologias de recuperação energética, a digestão anaeróbia possui a vantagem de ser um processo de conversão microbiana que ocorre em um ambiente aquoso, o que significa que as fontes de biomassa

contendo altos níveis de água (contendo menos de 40% de matéria seca) podem ser processadas sem pré-tratamento de secagem (WARD *et al.*, 2008).

O biogás produzido pela digestão anaeróbia é uma composição de gases que podem ser convertidos em energia térmica e, conseqüentemente, em elétrica. O principal gás portador de energia desta composição é o gás metano ( $\text{CH}_4$ ), um gás inflamável que compõe de 50-75% do biogás, dependendo do tipo de matéria-prima e das condições de produção (MØLLER; SOMMER; AHRING, 2004).

## 2.2 PRIMEIRA E SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA

Neste estudo, a recuperação energética dos resíduos industriais acontece por meio da liberação da energia térmica presente nos resíduos e derivados que são utilizados como combustível do processo.

De acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, a energia nunca será criada ou destruída: ela pode ser apenas transferida ou armazenada, seja entre um sistema e outro ou dentro do mesmo sistema. Assim, em sistemas fechados ocorre somente a troca de energia, que pode ser transferida por meio da realização de trabalho e transferência de calor; já em um sistema aberto ocorre a troca de massa e de energia com a vizinhança (MORAN; SHAPIRO, 2006).

Por sua vez, um ciclo termodinâmico é uma sequência de processos que se repetem, mas começam e terminam no mesmo estado, ou seja, todas as propriedades acabam com os mesmos valores que tinham no início; por conseguinte, a energia de um ciclo termodinâmico também seguirá esse modelo (MORAN; SHAPIRO, 2006).

Já a Segunda Lei da Termodinâmica enuncia sobre o sentido dos processos, tendo, como exemplo, a transferência de calor entre corpos, que não pode se dar, naturalmente, do corpo mais frio para o mais quente. Esta lei, ademais, introduz os conceitos de entropia e de irreversibilidade, sendo que ambos são fundamentais para a comparação entre o desempenho teórico e o real, assim como para entender como tal desempenho pode ser aprimorado (MORAN; SHAPIRO, 2006).

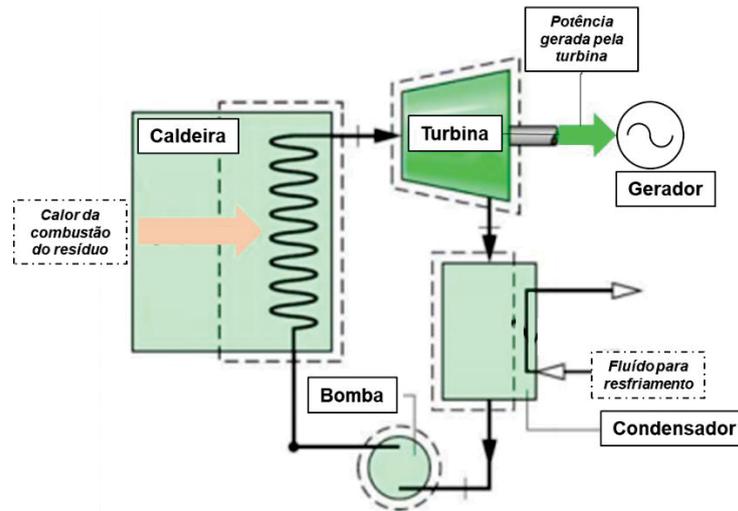
### 2.2.1 Ciclo de Rankine

Os ciclos termodinâmicos são a base do funcionamento de motores térmicos. Assim, o que representa de forma idealizada o funcionamento das máquinas a vapor é o ciclo Rankine, ou seja, de um motor que opera através da transformação de

energia térmica em energia mecânica. O processo baseia-se no fato de que um gás se contrai ao condensar e se expande quando evapora, com a finalidade de realizar trabalhos mecânicos.

O modelo mais simples do ciclo de Rankine está ilustrado na Figura 07.

FIGURA 07 - ADAPTAÇÃO DO ARRANJO DO CICLO DE RANKINE



FONTE: MORAN; SHAPIRO (2006).

Uma fonte externa aquece a caldeira, com a menor oscilação de pressão possível, e, assim, inicia o processo de convecção, que aquece o fluido de trabalho de forma que ele alcance o estado de vapor saturado. Depois disso, o vapor gerado naturalmente segue para a turbina a vapor, onde será gerada potência em decorrência da conversão da energia térmica resultante do calor do vapor. Na sequência, o vapor segue para o condensador, no qual será reduzida a temperatura por meio de um fluido para resfriamento, visto que a potência já foi gerada na etapa anterior. Assim, no condensador ocorre troca calor de forma indireta com o vapor, resfriando-o de tal maneira que ele atinja o estado de líquido saturado. Por fim, para que o ciclo se inicie novamente, o fluido de trabalho é conduzido até a bomba hidráulica, que fornece trabalho através do bombeamento do líquido em direção à caldeira (CENGEL; BOLES, 2011).

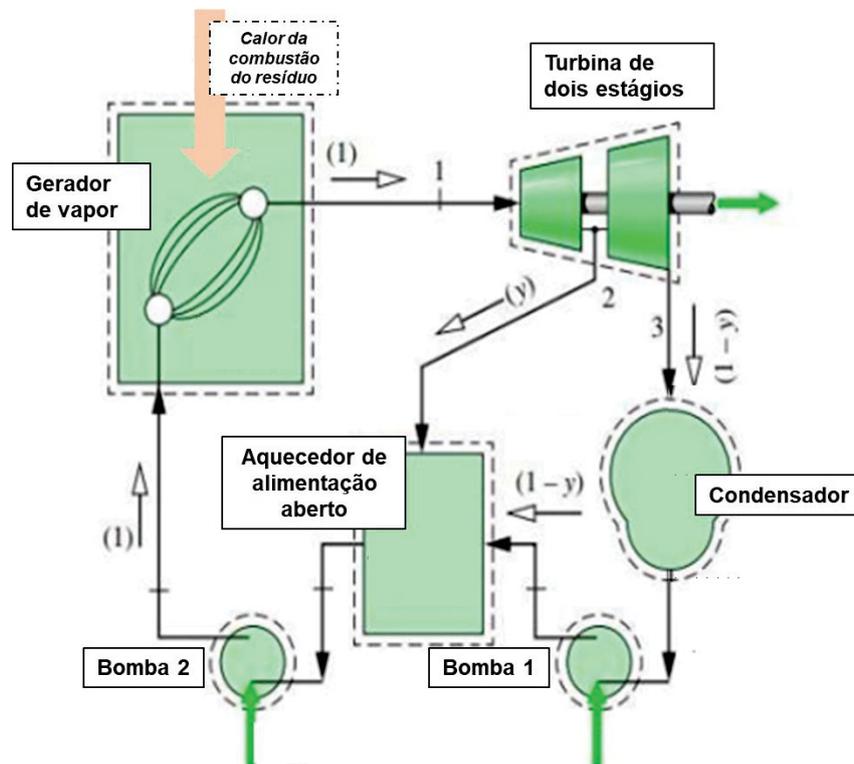
Cada etapa do processo tem necessidades específicas. Na bomba, por exemplo, se o vapor não atingir o estado de líquido saturado, conforme descrito anteriormente, irá contribuir para o mau funcionamento do equipamento, assim como a eficiência do ciclo ficará comprometida. O mesmo acontece na turbina: no caso de

o fluido não atingir o estado de vapor superaquecido, as gotículas ainda presentes podem danificá-la (MORAN; SHAPIRO, 2006).

### 2.2.2 Ciclo de Rankine Regenerativo Ideal com Aquecedores de Alimentação Aberto

O ciclo de Rankine regenerativo ideal com aquecedor de alimentação aberto tem como objetivo o aumento da eficiência térmica por meio da inserção da etapa de um aquecedor. O modelo construtivo deste ciclo pode ser observado na Figura 08.

FIGURA 08 - ADAPTAÇÃO DO ARRANJO DO CICLO DE RANKINE REGENERATIVO COM AQUECEDOR DE ALIMENTAÇÃO ABERTO



FONTE: MORAN; SHAPIRO (2006).

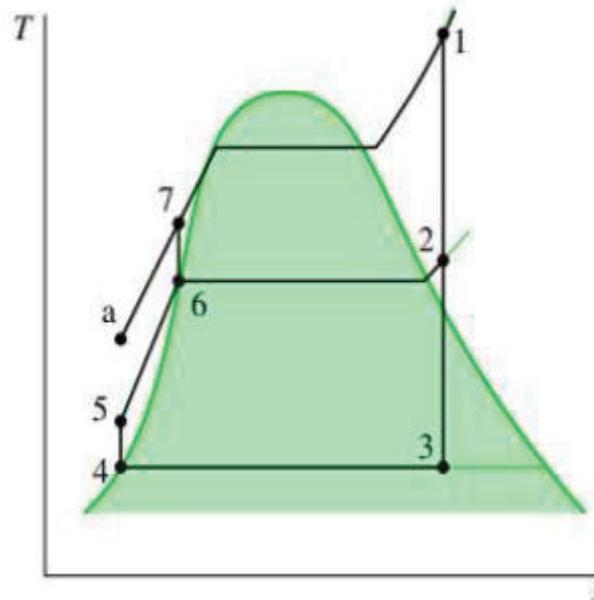
Cengel e Boles (2011) apresentam as etapas do mesmo conforme descrito neste parágrafo. Primeiramente, sob pressão constante, o fluido de trabalho é aquecido pelo gerador de vapor e na sequência o vapor de trabalho é dirigido para a turbina de primeiro estágio, expandindo-se isentropicamente até o estado 2. Nesse ponto será extraída uma parcela do escoamento total (y) para o aquecedor de alimentação aberto, o qual trabalha a uma pressão de extração. O restante principal

do vapor (1-y) expande-se até o segundo estágio da turbina e segue para o condensador para que o fluido seja condensado. Em seguida, o fluido de trabalho será bombeado pela Bomba 1 para o aquecedor de alimentação aberto apenas quando atingir a pressão de extração. Como existirão duas correntes mássicas dentro do aquecedor (y e 1-y), para que a corrente de saída seja única e tenha a mesma pressão de extração, o fluido é levado para a segunda bomba no estado de líquido saturado, sendo bombeado até que atinja esses parâmetros de pressão do gerador de vapor, para que, então, o ciclo tenha um recomeço.

A inserção da etapa do aquecedor no ciclo faz com que a água entre na caldeira já preaquecida, por isso a quantidade de energia que seria fornecida para vaporizar o fluido e aquecer o vapor acaba sendo reduzida; porém, somente uma parcela do escoamento total se expande através da turbina no segundo estágio, resultando na realização de menos trabalho (MORAN; SHAPIRO, 2006).

A Figura 09 representa o diagrama Temperatura *versus* Entropia (T-S) do ciclo regenerativo ideal. Vale destacar que o acréscimo de calor ocorreria do ponto 7 até o ponto 1, em vez de do ponto a até o 1, como no caso sem regeneração.

FIGURA 09 - DIAGRAMA T-S DO CICLO DE RANKINE REGENERATIVO IDEAL



FONTE: MORAN; SHAPIRO (2006).

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 GESTÃO DE RESÍDUOS

A gestão de resíduos é a composição de atividades técnicas, administrativas e financeiras, que tem como finalidade controlar os impactos negativos proporcionados pelos resíduos, assim como encontrar oportunidades de reutilizações benéficas dos mesmos (DEMIRBAS, 2011).

A recuperação energética de resíduos é uma alternativa ao descarte de resíduos em aterros, para isso, existem várias formas de tirar proveito do conteúdo energéticos dos resíduos, como os processos: incineração; digestão anaeróbia; gasificação, pirólise, entre outros.

Os Resíduos Sólidos Industriais (RSI), fonte de estudo deste trabalho, podem ser definidos como todo resíduo resultante das atividades industriais que se encontre no estado sólido (CONAMA, 2002b).

No Brasil, de acordo com a legislação nacional, os geradores de resíduos industriais estão sujeitos à elaboração de plano de gerenciamento de resíduos, o qual deve incluir, dentre outras informações, o método de controle e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos, as ações preventivas e corretivas relacionadas a acidentes e as medidas saneadoras de passivos ambientais (BRASIL, 2010b).

Os resíduos sólidos industriais podem ser classificados da seguinte maneira (ABNT, 2004):

- Perigosos: resíduos que, em função de suas propriedades físico-químicas e infectocontagiosas, podem apresentar risco à saúde pública e ao meio ambiente. Devem apresentar ao menos uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.
- Não Inertes: apresentam propriedades tais como: combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade em água.
- Inertes: resíduos que, submetidos a um contato estático ou dinâmico com água, não tenham nenhum de seus componentes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água

### 3.2 COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS (CDR)

O Combustível Derivado de Resíduos (CDR) é uma opção importante para a recuperação energética de resíduos e pode contribuir para a gestão sustentável dos recursos naturais e para segurança energética.

O termo CDR refere-se à fração segregada de alto poder calorífico de resíduos sólidos processados mecanicamente e, muitas vezes, por meio de processos biológicos (HERNANDEZ-ATONAL *et al.*, 2007). Desse modo, visando à recuperação energética, a fração combustível dos resíduos sólidos urbanos pode ser classificada mecanicamente e processada para melhorar as características físicas e químicas dos materiais rejeitados (YANG, 1996).

O CDR pode ser produzido através de Tratamento Mecânico-Biológico (TMB). O TMB, além de ser um processo mecânico para fracionamento de resíduos, é um processo de descontaminação dos rejeitos combustíveis, no qual é extraída a fração biológica inerte, conservando a energia que será utilizada para aquecimento em instalações de recuperação energética de resíduos (VELIS *et al.*, 2010).

Entre os diversos tipos de resíduos sólidos, os combustíveis derivados de resíduos constituem um bom insumo para os processos de pirólise e gaseificação, haja vista que possuem composição constante, possibilidades de transporte e armazenamento, além de ausência de deterioração (MUHLEN; WANZ; VAN HEEK, 1989).

### 3.3 INCINERAÇÃO

A geração de energia elétrica pela incineração dos resíduos sólidos é semelhante à das usinas térmicas convencionais, cuja capacidade de geração depende diretamente do poder calorífico do combustível incinerado.

Nas plantas de WTE que adotam a incineração como tecnologia de recuperação energética, os resíduos sólidos utilizados como combustível para seus fornos devem apresentar características específicas para um processo eficiente. Segundo Themelis e Kaufman (2004), esses resíduos devem atender os seguintes requisitos:

- poder calorífico inferior (PCI) superior ao valor mínimo;
- teor de umidade inferior ao limite pré-estabelecido;

- características físicas compatíveis com o sistema de combustão do utilizador final, e;
- garantir estabilidade biológica de modo a não produzir odores desagradáveis e não constituir perigo para a saúde dos intervenientes que intervêm no processo de queima.

O poder calorífico inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (JARA, 1989). De acordo com Themelis e Kaufman (2004), embora a classificação segundo o PCI não deva ser considerada definitiva para estabelecer a destinação dos resíduos sólidos, pode-se estabelecer que:

- para  $PCI < 1.675 \text{ kcal/kg}$ , a incineração não é tecnicamente viável;
- para  $1.675 \text{ kcal/kg} < PCI < 2.000 \text{ kcal/kg}$ , a viabilidade técnica da incineração ainda depende de algum tipo de pré-tratamento que eleve o poder calorífico;
- para  $PCI > 2.000 \text{ kcal/kg}$ , a queima bruta (“*mass burning*”) é tecnicamente viável.

O teor de umidade no resíduo combustível pode impactar negativamente no poder calorífico total do processo, pois quanto maior a umidade do material combustível maior será a energia calorífica necessária para vaporização (KOMILIS; KISSAS; SYMEONIDIS, 2014).

De acordo com a Confederação Nacional da Indústria – CNI (2019), as características físicas dos resíduos influenciam no processo de combustão, pois quanto menor o tamanho de partícula, maior o valor calorífico inferior e mais fácil é queimá-la completamente. Na incineração, no processo de queima dos resíduos combustíveis, os materiais não combustíveis dessa mistura de resíduos, como vidro e metais, não contribuem para o processo de valorização energética e acabam como escórias, nomeadas como cinzas de fundo (Margallo *et al.*, 2014), as quais permanecem no fundo da caldeira.

A composição química dos resíduos é relevante, haja vista que a incineração produz quantidades variadas de substâncias tóxicas, orgânicas ou inorgânicas, que são emitidas na atmosfera (GOUVEIA, 2010). São exemplos de substâncias perigosas emitidas pelos incineradores de resíduos sólidos: partículas, gases, metais pesados, compostos orgânicos, dioxinas e furanos (RUSHTON, 2003). Em consequência disso,

a recuperação energética demanda tecnologias adequadas de prevenção à poluição (como limpeza dos gases produzidos).

### 3.3.1 Poder Calorífico dos Resíduos

Fundamentalmente, a geração de energia através da incineração acontece pela utilização do poder calorífico dos resíduos, aproveitando a quantidade de energia por unidade de massa ou unidade de volume de matéria que pode ser liberada por estes insumos. O poder calorífico dos materiais combustíveis pode ser determinado utilizando-se uma bomba calorimétrica, que indica a capacidade potencial de um material de desprender determinada quantidade de calor.

Conforme as Equações 01 e 02, o poder calorífico inferior de uma porção de insumo combustível, normalmente expresso em kcal/kg, pode ser calculado através da soma dos produtos dos poderes caloríficos inferiores das respectivas frações de massa dos materiais combustíveis envolvidos presentes na amostra (ESCAMILLA-GARCÍA *et al.*, 2020).

$$PCI_i = (PCI) \cdot (W_i) \cdot (k_i) \quad (01)$$

$$PCI_{total} = \sum_{i=1}^n PCI_i \quad (02)$$

Onde:

- PCI: poder calorífico do material;
- $W_i$ : massa da amostra;
- $K_i$ : fração da matéria correspondente ao PCI;
- $PCI_{total}$ : poder calorífico de uma amostra com materiais diferentes.

De modo geral, o PCI de um material é obtido a partir de relações matemáticas, do poder calorífico superior (PCS), do teor de umidade e da fração mássica de hidrogênio. Por outro lado, o PCS é obtido experimentalmente com auxílio de um calorímetro, no entanto esse método requer mais tempo para obtenção do poder calorífico e apresenta custo elevado (SILVA; TONELI; PALACIOS-BERECHE, 2019). O Quadro 03 apresenta o poder calorífico de alguns resíduos sólidos comuns.

QUADRO 03 - PODER CALORÍFICO DE RESÍDUOS COMUNS

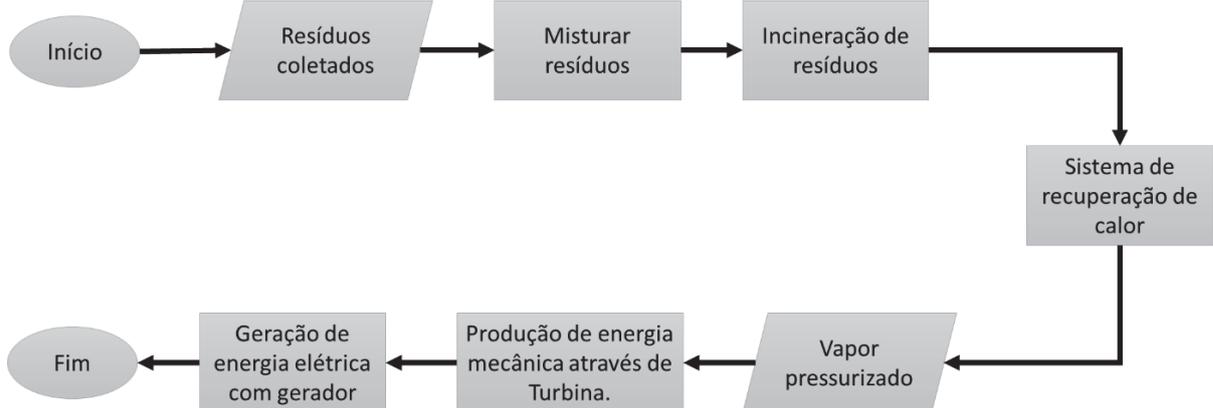
PODER CALORÍFICO DE RESÍDUOS (kcal/kg)	
Plásticos	6.301
Borracha	6.780
Couro	3.629
Têxteis	3.478
Madeira	2.520
Alimentos	1.311
Papel	4.033

FONTE: IVIG (2005).

### 3.3.2 Tecnologias Aplicadas para Recuperação Energética por Meio de Incineração

Os dispositivos de um projeto de uma planta de recuperação energética de resíduos por meio de incineração são similares aos dos projetos de plantas térmicas para geração energia, incluindo sistemas térmicos, abastecimento de água, sistema para manuseio de cinzas, etc. (CHEN, SUN; LIANG; 2013). A Figura 10 apresenta um fluxograma de um projeto de recuperação energética de resíduos através da incineração.

FIGURA 10 - FLUXOGRAMA DO PROJETO DE UMA PLANTA DE INCINERAÇÃO



FONTE: O autor

A geração de energia elétrica através de incineração é dividida em diversas etapas. Primeiramente, deve ser feita a remoção dos resíduos inertes e tóxicos, para que, na sequência, os resíduos combustíveis possam ser armazenados.

Sequencialmente, dispositivos misturam os resíduos e alimentam uniformemente o incinerador (XIN-GANG *et al.*, 2016).

O incinerador é dividido em três partes, sistema de recepção de resíduos, câmara secundária de combustão e dispositivo para extração de escórias. A energia térmica do gás produzido pela combustão dos resíduos será recuperada através do sistema de recuperação de calor. O sistema de recuperação de energia representa uma parte substancial do projeto, pois é responsável por recuperar a máxima quantidade de calor presente no gás de combustão de incineradores ou câmaras de combustão (KILKOVSKY *et al.*, 2014).

Esta energia é capaz de produzir vapor com uma determinada temperatura e pressão, que pode ser usado para produzir eletricidade através de um conjunto de turbina e gerador (LOMBARDI; CARNEVALE; CORTI, 2015).

No entanto, a tecnologia de incineração de resíduos produz diversos poluentes, que devem ser removidos e tratados. No local onde os resíduos são armazenados, visando, devem existir dispositivos de vedação para prevenir a emissão para a atmosfera de possíveis odores indesejados e sistemas de tratamento do lixiviado produzido (XIN-GANG *et al.*, 2016).

A incineração de resíduos produz escória com volume equivalente a cerca de 10 a 15% do volume de resíduos incinerados, as mesmas podem ser reutilizadas para produzir materiais de bloco de pavimentação ou tijolos após o processamento (XIN-GANG *et al.*, 2016). As cinzas volantes, emitidas pelo processo de incineração, representam cerca de 3% do volume de resíduos e devem ser tratadas antes de serem enviadas para o aterro (XIN-GANG *et al.*, 2016).

Atualmente, as tecnologias de incineração de resíduos mais maduras são: grelha mecânica e combustão em leito fluidizado (DUAN; ZHANG; ZHONG, 2013). O Quadro 04 mostra a comparação das duas tecnologias com base em seu *status* de desenvolvimento na China.

QUADRO 04 – COMPARAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DE TECNOLOGIAS PARA INCINERAÇÃO POR COMBUSTÃO

<b>Itens</b>	<b>Grelha-Mecânica</b>	<b>Leito fluidizado circulante.</b>
Requisito de valor calórico	Superior a 1.200 kcal/kg	Superior a 800 cal/kg
Combustível auxiliar	Óleo	Carvão
Maturidade técnica	Alta maturidade com muita utilização histórica	Baixa maturidade com pouca utilização histórica
Combustão	O lixo é colocado diretamente no forno, secando antes de queimar. O tempo médio de combustão é longo.	Resíduos devem ser desumidificados e triturados em temperatura de 600-700°C. O tempo médio de combustão é curto.
Custos do Investimento	Geralmente US\$ 0.6-1.0 bilhões em uma instalação com capacidade de escoamento de 1000 toneladas por dia	Geralmente US\$ 0.3-0.6 bilhões em uma instalação com capacidade de escoamento de 1000 toneladas por dia
Custo de Operação	US\$16.3-32.6 por tonelada	US\$9.78-19.56 por tonelada
Umidade do lixo	Aplicável	Não é adequado para resíduos de alto teor de umidade
Partícula do lixo	Não é necessário redução, exceto para enormes quantidades	Pré-tratamento necessário para reduzir as partículas para 20mm
Tratamento de gases de combustão	Controle fraco de dioxinas	Controle efetivo do dióxido de enxofre, dos óxidos de nitrogênio, das dioxinas, etc.
Cinzas volantes	2-3% de quantidade de descarte de resíduos	15-20% da quantidade de resíduos
Tratamento de Lixiviação	Tratamento separado e o líquido não pode ser pulverizado de volta para o forno para combustão.	O líquido pode ser pulverizado de volta para o forno, mas tem impacto na eficiência da combustão.
Vantagens	Tecnologia madura, alta estabilidade, longo tempo de vida útil, menor quantidade de cinzas volantes, sistema de limpeza estável, custo de operação menor, poucos requisitos de composição dos resíduos, pré-tratamento simplificado, controle de combustão simples.	Pequeno espaço para instalação e operação, realiza combustão completa, maior eficiência térmica, equipamentos de menor investimento e operação estável.
Desvantagens	Necessidade de amplo espaço, alta exigência para resistência ao calor do incinerador, combustão incompleta dos resíduos, operação complexa e altos custos de manutenção.	Necessidade de pré-tratamento de resíduos, grande quantidade de cinzas volantes, menor tempo de vida útil, maior de consumo de energia.

FONTE: DUAN; ZHANG; ZHONG (2013).

### 3.4 GASEIFICAÇÃO E PIRÓLISE

A pirólise e a gaseificação estão entre as das tecnologias mais importantes para a recuperação energética de resíduos. Existem similaridades entre os significados de pirólise e gaseificação, haja vista que, quando um insumo é pirolisado, formam-se três produtos nos estados: sólido, líquido e gasoso, sendo o gás produzido nesse processo, neste caso, fruto de uma gaseificação parcial (JONES, 2010).

#### 3.4.1 Pirólise

Define-se como pirólise o processo em que moléculas de cadeia longa são decompostas em moléculas menores e menos complexas, quando submetidas a um ambiente isento de oxigênio e a alta temperatura (400 a 800 °C) (HAUSCHILD *et al.*, 2021). A atenção dada à tecnologia de pirólise em novas aplicações, como a disposição de resíduos sólidos e para fins de recuperação de energia, tem crescido significativamente nos últimos anos (MOHSENI-BANDPEI *et al.*, 2019).

Através da pirólise de matéria biogênica são obtidos produtos orgânicos e biocombustíveis, como carvão e bio-óleo (MEIER *et al.*, 2013). Já a pirólise de polímeros sintéticos produz carvão e o óleo (AL-SALEM *et al.*, 2017). Na literatura são estudadas aplicações de pirólise no tratamento de vários tipos de resíduos, tais como:

- lodo (ZHOU *et al.*, 2019);
- resíduos plásticos (AL-SALEM *et al.*, 2017);
- resíduos de pneus (MARTÍNEZ *et al.*, 2014);
- e resíduos de biomassa (TRIPATHI; SAHU; GANESAN, 2016).

Os rendimentos e propriedades relativas dos produtos da pirólise dependem da tecnologia e das condições operacionais, principalmente da taxa de aquecimento, temperatura de processo, tempo de permanência no processo, composição da matéria-prima e tamanho das partículas da matéria-prima (KUMAR; SAMADDER, 2017).

##### 3.4.1.1 Recuperação Energética por Meio da Pirólise

A pirólise produz um líquido combustível capaz de produzir calor, para produção de vapor aplicado para produção de energia elétrica. Há benefícios na produção desse líquido combustível, quando os resíduos utilizados como recursos

estão distantes do local onde a energia é necessária, haja vista que o líquido pode ser armazenado e transportado (BRIDGWATER; PEACOCKE, 2000).

Os processos de pirólise podem ser classificados em função das condições de operação. Assim, de acordo com Demirbas (2007), classificam-se em: carbonização (pirólise muito lenta), pirólise convencional (lenta) e pirólise rápida.

A pirólise rápida ocorre a elevadas taxas de aquecimento e pequenos tempos de residência das fases gasosas e sólidas no reator, sendo considerada um processo avançado, no qual podem ser obtidas altas quantidades de líquidos combustíveis a partir do controle dos parâmetros de processo (BRIDGWATER; PEACOCKE, 2000).

Como exemplo, o Quadro 05 apresenta os principais processos de pirólise aplicados para resíduos de biomassa.

QUADRO 05 - PRINCIPAIS PROCESSOS DE PIRÓLISE DE BIOMASSA

<b>Processo de pirólise</b>	<b>Tempo de residência</b>	<b>Taxa de aquecimento</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Produtos obtidos</b>
Carbonização	dias	muito baixa	400 a 450	carvão vegetal
Lenta	5 a 30 minutos	baixa	até 600	bio-óleo, carvão e gás
Rápida	0,5 a 5 segundos	muito alta	550 a 650	bio-óleo
Flash-líquido	menos de 1 segundo	alta	inferior a 650	bio-óleo
Flash-Gás	menos de 1 segundo	alta	superior a 650	produtos químicos e gás combustível

FONTE: Adaptado de KIMURA (2009).

Os principais requisitos do processo de pirólise rápida são: altas taxas de aquecimento e de transferência de calor, biomassa moída, temperatura de reação controlada de aproximadamente, baixo tempo de residência dos vapores e resfriamento rápido dos vapores.

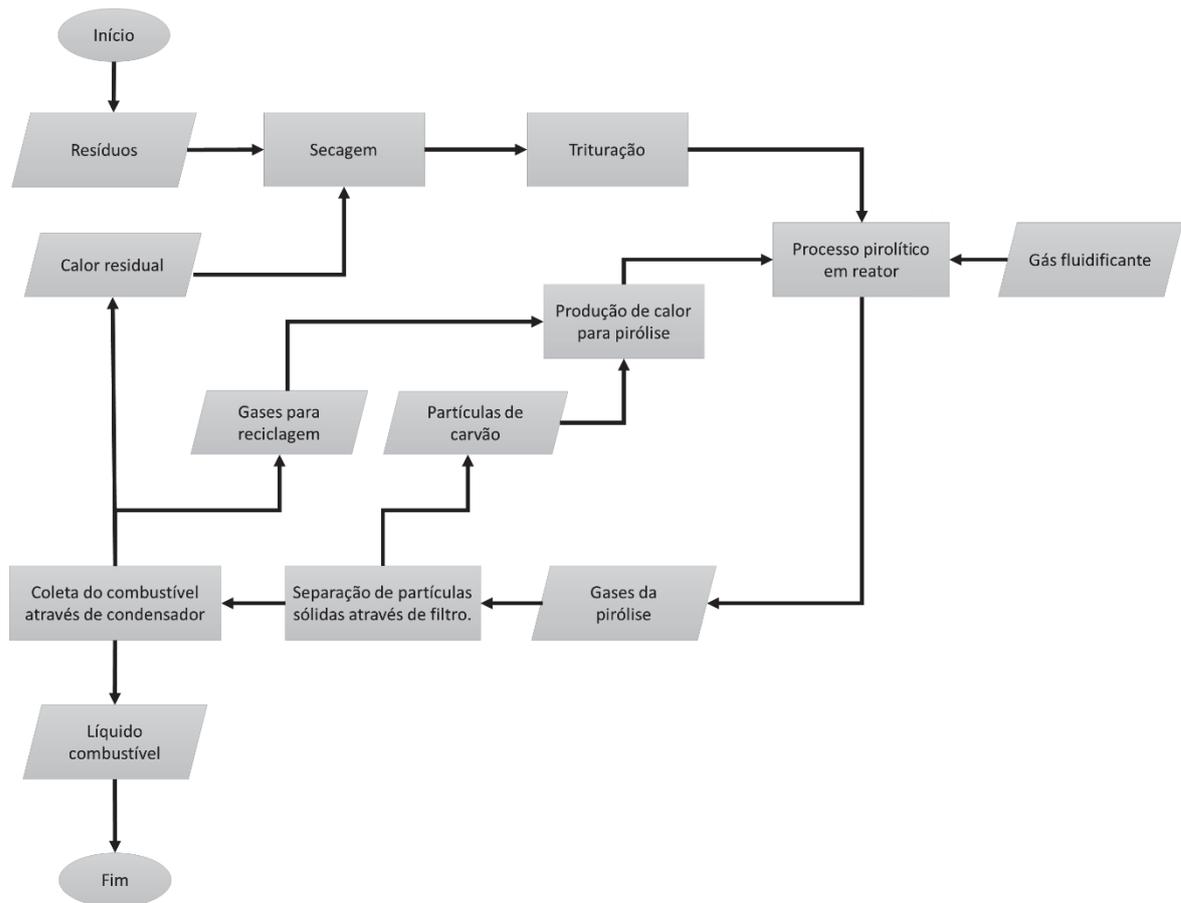
O produto principal, considerando como insumo no processo da biomassa, o bio-óleo, é obtido com rendimentos de até 80% em peso na alimentação seca junto com carvão e gás de subproduto que são usados dentro do processo (BRIDGWATER; PEACOCKE, 2000).

Os produtos da pirólise rápida, para biomassa, são castanho-escuros e fluidos, assemelhando-se a um óleo combustível médio em viscosidade, com poder

calorífico superior de aproximadamente 17 MJ/kg, em comparação com cerca de 42 MJ/kg para óleo combustível convencional (BRIDGWATER; PEACOCKE, 2000).

Um sistema conceitual de pirólise rápida em leito fluidizado aplicado para biomassa é exibido na Figura 11, indicando os principais componentes que são discutidos abaixo (BRIDGWATER; PEACOCKE, 2000).

FIGURA 11 - CONCEITO DE UM PROJETO DE PIRÓLISE RÁPIDA



FONTE: O autor

De acordo com Bridgwater e Peacocke (2000), a configuração de um sistema de pirólise rápida consiste de:

- 1) Dispositivos de recepção e armazenagem: em virtude da natureza dos resíduos utilizados como insumos.
- 2) Sistema de secagem dos insumos: para um processo eficiente, os resíduos do processo devem possuir umidade relativa adequada.
- 3) Dispositivos de esmerilhamento: para um aquecimento rápido, as partículas devem ter dimensões reduzidas e, portanto, pode ser

necessário um dispositivo para redução do tamanho das partículas dos resíduos.

- 4) Reator pirolítico: embora exista ampla diversidade de configurações de reatores de pirólise, as configurações mais comuns são de leitos fluidizados e leitos fluidizados circulantes, fato que se deve à sua facilidade de operação e escalonamento na produção.
- 5) Separador do carvão vegetal: a produção de carvão vegetal, como escória, durante a pirólise é inevitável, porém este carvão, em contato com os líquidos produzidos, pode gerar instabilidade, afetando a qualidade dos mesmos.
- 6) Dispositivos de resfriamento e coleta: a coleta de líquidos tem sido uma grande dificuldade na operação de processos de pirólise rápida, devido à natureza do produto que está, principalmente, na forma de aerossol. Este processo é realizado geralmente pelo resfriamento da fração volátil, etapa denominada como “*quenching*”.

### 3.4.2 Gaseificação

A gaseificação pode ser descrita como a conversão de uma matéria-prima qualquer em um produto gasoso com um poder calorífico aproveitável (HIGMAN; BURGT, 2003). A mistura, produzida pela gaseificação, do gás hidrogênio ( $H_2$ ) e do monóxido de carbono (CO) é chamada de gás de síntese (LORA *et al.*, 2012). Ainda, o gás de síntese pode ser utilizado, após tratamento, em conversores energéticos, como turbinas, caldeiras e motores de combustão interna (HIGMAN; BURGT, 2003).

Segundo Lora *et al.* (2012), os principais produtos obtidos no processo da gaseificação são:

- monóxido de carbono (CO), hidrogênio ( $H_2$ ) e metano ( $CH_4$ ) – produtos oriundos da oxidação incompleta;
- dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e água ( $H_2O$ ) – produtos típicos da combustão;
- cinzas obtidas no fundo do reator como resultado da combustão;
- gases poluentes.

O desempenho do processo da gaseificação é afetado por alguns aspectos, como: a razão de equivalência (comumente conhecida como fator de ar), o tipo de agente de gaseificação, o tempo de residência, as características do insumo em

termos físico-químicos e energéticos e a utilização ou não de catalisadores, sendo que características como a granulometria e a umidade da matéria-prima são determinantes no processo, visto que podem afetar a formação de espaço entre as partículas do leito e alterar a temperatura no interior do reator (LORA *et al.*, 2012).

Em virtude da heterogeneidade, diversos tipos de resíduos não podem ser aproveitados no processo de gaseificação e para certos tipos é necessário um extenso tratamento (produção de resíduos derivados de combustível), porém resíduos como: papel de resíduos de moinhos, resíduos plásticos mistos, resíduos da indústria florestal e resíduos agrícolas, podem ser aproveitados diretamente em seus processos de manufatura (BELGIORNO *et al.*, 2003).

#### 3.4.2.1 Tipos de Gaseificadores

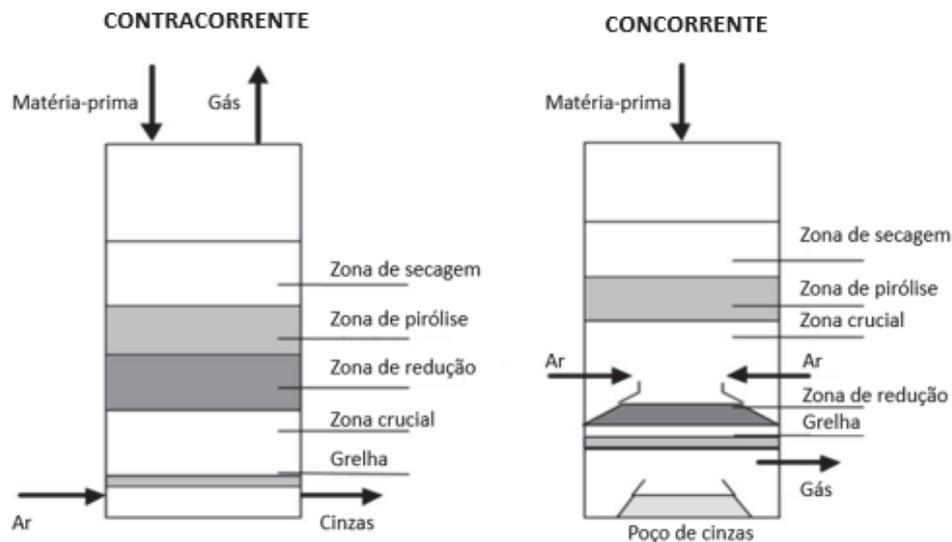
O gaseificador é o reator responsável pela conversão de uma matéria-prima em gás combustível. Basicamente, existem três tipos básicos de gaseificadores: (1) de leito fixo, (2) de leito fluidizado e (3) indireto.

De acordo com Belgiorno *et al.* (2003), um fator fundamental na avaliação do reator é a capacidade de produção de um gás com baixo teor de alcatrão, pois altas concentrações de alcatrão causam problemas em virtude de suas características corrosivas.

##### 3.4.2.1.1 Gaseificador de leito fixo

Os reatores de leito fixo podem ser o ser classificados de acordo com o fluxo do gás produzido, ou seja, contracorrente e concorrente (Figura 12).

FIGURA 12 - GASEIFICADORES DE LEITO FIXO



FONTE: BELGIORNO *et al.* (2003).

Em um gaseificador de fluxo contracorrente, a alimentação com o insumo para o processo é realizada na parte superior do reator, enquanto o ar é introduzido da parte inferior do reator, portanto o material sólido é convertido em gás combustível durante o fluxo de descida (BRIDGWATER,1994). A energia dos resíduos é recuperada através da seguinte sequência, iniciando no topo do gaseificador: secagem, pirólise, redução e combustão.

Já em um gaseificador com fluxo concorrente, os resíduos utilizados como insumos são inseridos pelo topo do reator, o ar é introduzido nas laterais acima da grelha enquanto o gás combustível é retirado próximo à grelha (BRIDGWATER, 1994).

As vantagens e desvantagens dos gaseificadores de leito fixo, contracorrente e concorrente, podem ser observados no Quadro 06.

QUADRO 06 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS GASEIFICADORES DE LEITO FIXO

Gaseificador	Vantagens	Desvantagens
	1. Simplicidade operacional e habilidade de gaseificar materiais com elevado teor de água e material inorgânico, como lodo residual do tratamento de esgoto;	1. O gás gerado normalmente contém de 10 a 20% do alcatrão produzido na pirólise do combustível, com uma concentração da ordem de 100 g/Nm <sup>3</sup> . Estes alcatrões, no entanto, queimam bem em processos de combustão direta;

Contracorrente	2. Potencial de operar com temperaturas muito elevadas na região da grelha (a menos que vapor d'água seja injetado na grelha) capaz de fundir metais e escória (gaseificação com cinza fundida).	2. No caso de aplicações em motores de combustão interna, turbinas ou para geração de gás de síntese, o alcatrão deverá ser removido;
		3. A grelha pode ser submetida a temperaturas muito elevadas, a não ser que vapor d'água ou CO <sub>2</sub> seja injetado com o ar ou oxigênio;
		4. A granulometria do combustível alimentado tem de ser uniforme para evitar perda de carga elevada no leito (no caso do gaseificador atmosférico) ou formação de canais preferenciais.
Concorrente	1. Consomem entre 99 a 99,9% do alcatrão. Desta forma o gás gerado pode ser transportado em tubulações e utilizado em motores com um mínimo de limpeza;	1. O combustível tem de apresentar baixa umidade (<20%) e granulometria uniforme;
	2. Os materiais inorgânicos ficam retidos na matriz de carvão e cinza retirada pelo fundo dos gaseificadores, reduzindo de forma acentuada a necessidade de ciclones de elevada eficiência e filtros a quente;	2. O gás sai do gaseificador a temperaturas elevadas (em geral 700°C); desta forma esta energia é perdida, a menos que haja algum aproveitamento (para preaquecimento do ar, secagem do combustível);
	3. O gaseificador concorrente é um sistema comprovado, com mais de um milhão de veículos utilizando este sistema durante a Segunda Guerra Mundial;	3. Tipicamente 4 a 7% do carbono do combustível não é convertido, saindo com as cinzas pelo fundo do gaseificador;
	4. O gás (quando limpo) pode ser utilizado em motores de linha, sem maiores modificações;	4. A potência de pico de motores com ignição a vela é reduzida de 30 a 40%, a menos que ele seja turbinado.
	5. Os gaseificadores de topo aberto apresentam poucos problemas em casos de explosão	

FONTE: HENRIQUES (2009, p. 60).

#### 3.4.2.1.2 Gaseificador de leito fluidizado

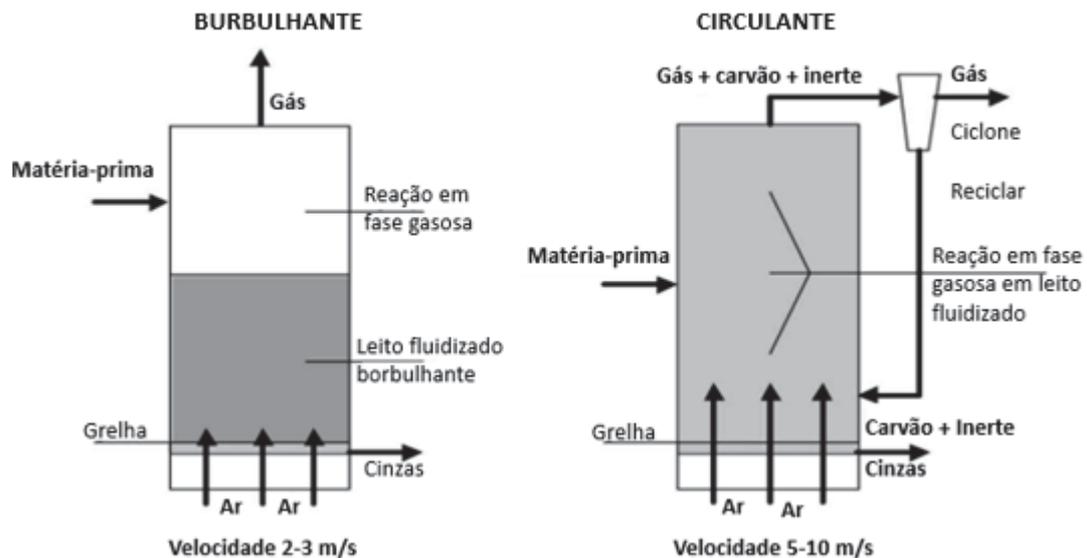
A fluidização é um processo cujo leito fixo, preenchido de sólidos finos, assume o aspecto de um líquido, fato que acontece através do contato das partículas dos sólidos com um fluido de fluxo ascendente, com velocidade suficiente para suportar as partículas dos sólidos (JUNIPER, 2000).

A gaseificação em leito fluidizado foi desenvolvida para aumentar a eficiência da gaseificação em leito fixo para matérias-primas com alto teor de cinzas (QUAAK; KNOEF; STASSEN, 1999). Os reatores de leito fluidizado não possuem diferentes

zonas de reação. Esse tipo de reator possui um leito isotérmico operando abaixo das temperaturas máximas dos gaseificadores de leito fixo (BELGIORNO *et al.*, 2003).

Na Figura 13 são apresentados os gaseificadores de leito fluidizado borbulhante e de leito fluidizado circulante.

FIGURA 13 - GASEIFICADORES DE LEITO FLUIDIZADO



FONTE: BELGIORNO *et al.* (2003).

Em um reator de leito fluidizado borbulhante, a velocidade do fluxo ascendente do agente de gaseificação (fluido responsável pela fluidização) realiza a expansão do leito inerte, porém esta acontece apenas na parte inferior do gaseificador. Nesse caso, a areia e os insumos não saem do reator em virtude da baixa velocidade do agente de gaseificação (BELGIORNO *et al.*, 2003).

Por outro lado, em um leito fluidizado circulante, a areia e os insumos presentes no processo ocupam todo o reator, permitindo que uma fração dos mesmos seja transportada do reator com a corrente de gás (DE FEO *et al.*, 2000). Tal fração é capturada e reciclada no reator por meio de um ciclone de ar que filtra o fluxo de gás (NIESSEN; MARKES; SOMMERLAD, 1996).

O Quadro 07 mostra a comparação entre gaseificadores de leito fixo e de leito fluidizado:

QUADRO 07 - COMPARAÇÃO ENTRE GASEIFICADORES DE LEITO FIXO E LEITO FLUIDIZADO

	Gaseificador de Leito Fixo	Gaseificador de Leito Fluidizado
--	----------------------------	----------------------------------

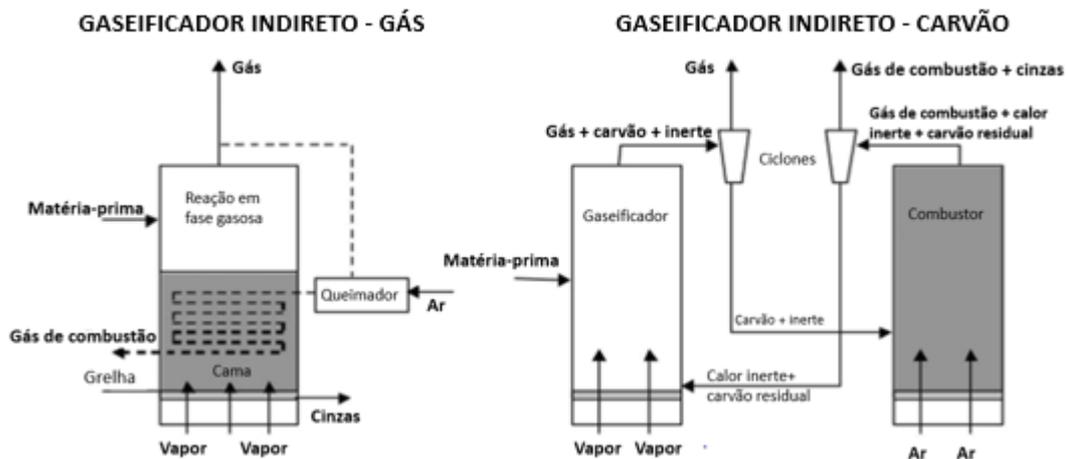
Porte	Pequeno porte (de 1kW a 1MW)	Grande porte (a partir de 1MW)
Alcatrão contido no gás gerado	100 g/Nm <sup>3</sup> no leito fixo contracorrente e 1 g/Nm <sup>3</sup> no leito concorrente	10 g/Nm <sup>3</sup>
Biomassa	Baixa umidade (menor de 20%) e granulometria uniforme (no máximo 6 cm)	Alta umidade (até 65%) e granulometria uniforme (5 a 10cm)
Uso do gás gerado	Motores de linha (combustão interna, ex. ciclo Otto).	Turbinas a gás

FONTE: HENRIQUES (2009, p. 66).

### 3.4.2.1.3 Gaseificação indireta

Os reatores aplicados para gaseificação indireta podem ser classificados como gaseificadores indiretos a gás e gaseificadores indiretos a carvão conforme Figura 14.

FIGURA 14 - GASEIFICADORES INDIRETOS



FONTE: BELGIORNO *et al.* (2003).

A gaseificação indireta a gás é constituída por um gaseificador de leito fluidizado a vapor com trocadores de calor, sendo que uma fração do gás combustível produzido alimenta um combustor e o produto da combustão proporciona calor para a gaseificação da matéria-prima (BELGIORNO *et al.*, 2003).

A gaseificação indireta por meio do carvão é constituída por dois reatores separados – ambos reatores de leito circulante, sendo que o primeiro converte os insumos em gás e o segundo queima o carvão residual para proporcionar o calor necessário à gaseificação dos resíduos. O leito arenoso circula entre os dois reatores para transferência de calor (BELGIORNO *et al.*, 2003).

A principal vantagem da gaseificação indireta é a alta qualidade do gás produzido em contraste com os maiores custos de investimento e manutenção do reator (BELGIORNO *et al.*, 2003).

### 3.5 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia envolve a degradação e estabilização de materiais orgânicos sob condições anaeróbias por organismos microbianos e leva à formação de biogás – uma mistura de dióxido de carbono e metano, uma fonte de energia renovável – e de biomassa microbiana (KELLEHER *et al.*, 2002).

O tratamento anaeróbio fornece um método de redução da poluição de operações agrícolas e industriais, ao mesmo tempo em que compensa o uso de combustíveis fósseis nas operações (CHEN; CHENG; CREAMER, 2008).

Como uma das tecnologias de tratamento de resíduos e águas residuais mais eficientes, a digestão anaeróbia tem sido amplamente utilizada para o tratamento de lodo municipal e aplicação limitada no tratamento de resíduos industriais orgânicos, incluindo resíduos de processamento de frutas e vegetais, resíduos de embalagens e resíduos agrícolas (PARKIN; MILLER, 1983).

#### 3.5.1 Insumos para Digestão Anaeróbia

A composição do resíduo afeta diretamente a capacidade volumétrica de produção de biogás, uma vez que esse volume está relacionado com a concentração de sólidos voláteis, os quais representam a quantidade de sólidos orgânicos presente e a disponibilidade de nitratos, fosfatos e sulfatos (SPETH *et al.*, 2016)

A produção de metano é proporcional à demanda química de oxigênio (DQO), sendo que a produção de gases a partir de um determinado resíduo depende do grau de biodegradabilidade da matéria orgânica contida nesse resíduo, sendo que os compostos orgânicos podem ser divididos em biodegradáveis e não biodegradáveis (SPETH *et al.*, 2016).

Alguns materiais orgânicos, especialmente os sintéticos, são também tóxicos para as bactérias. De um modo geral, os detergentes não biodegradáveis e aqueles à base de cloro são fortes inibidores do metabolismo bacteriano (BITTON, 2005).

Diversas substâncias apresentam efeitos tóxicos sobre o metabolismo microbiológico, os quais resultam na redução da velocidade do metabolismo

bacteriano e, conseqüentemente, na produção de biogás (BITTON, 2005). Dessa forma, pode-se concluir que, para a digestão anaeróbia, existe a necessidade de segregação de materiais recicláveis para destinação da matéria orgânica ao processo de aproveitamento energético.

### 3.5.2 Produção de Biogás

O emprego do biogás como recurso de recuperação energética deve-se fundamentalmente à presença do metano em sua composição. A qualidade do biogás produzido pela digestão anaeróbia é afetada pelos fatores: composição do substrato, tamanho da partícula, carga orgânica, pH, alcalinidade, umidade, balanceamento de macro e micronutrientes, temperatura, tempo de retenção hidráulica e frequência de agitação (SILVA, 2018). Conseqüentemente, para uma digestão anaeróbia eficiente, com redução da matéria orgânica e geração de metano adequadas, as variáveis citadas devem ser monitoradas e controladas.

O tempo de retenção hidráulica é um parâmetro significativo da digestão anaeróbia, pois corresponde ao tempo que a matéria orgânica necessita para ser digerida e estabilizada (MORIARTY, 2013). Portanto, o tempo ideal de retenção hidráulica é aquele que proporciona máxima remoção de sólidos e maior produção de gás no menor intervalo de tempo.

De acordo com Zank *et al.* (2020), o biogás é uma mistura gasosa incolor, composta predominantemente de metano (50-70%) e de gás carbônico (25-40%), além de porcentagens reduzidas de outros gases como: hidrogênio (H<sub>2</sub>) nitrogênio (N<sub>2</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>), gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), amoníaco (NH<sub>3</sub>), monóxido de carbono (CO) e água. As variáveis densidade e poder calorífico se alteram, de acordo com a proporção de metano, como representado na Tabela 02.

TABELA 02 - DENSIDADE E PODER CALORÍFICO DO BIOGÁS EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METANO

<b>Composição Química</b>	<b>Densidade</b>	<b>Poder calorífico (kcal/kg)</b>
10%CH <sub>4</sub> - 90%CO <sub>2</sub>	1,8393	465,43
40%CH <sub>4</sub> - 60%CO <sub>2</sub>	1,4600	2.333,85
60%CH <sub>4</sub> - 40%CO <sub>2</sub>	1,2143	4.229,98
65%CH <sub>4</sub> - 35%CO <sub>2</sub>	1,1518	4.831,14

75%CH <sub>4</sub> - 25%CO <sub>2</sub>	1,0268	6.253,01
95%CH <sub>4</sub> - 5%CO <sub>2</sub>	0,7768	10.469,60
99%CH <sub>4</sub> - 1%CO <sub>2</sub>	0,7268	11.661,02

FONTE: ZANK *et al.* (2020).

### 3.5.3 Dimensionamento de um Projeto de Digestão Anaeróbia

Visando o dimensionamento otimizado de um projeto de digestão anaeróbia em escala real é fundamental a determinação da cinética do processo. A cinética bioquímica consiste, sob condições preestabelecidas, no estudo de velocidades de crescimento dos microrganismos, velocidades de consumo de substratos e de formação de produtos (ZAIAT; FORESTI, 1997). Portanto, para o dimensionamento de um projeto de recuperação energética, devem ser ensaios laboratoriais e análises físico-químicas visando a determinação da cinética do processo.

### 3.5.4 Digestores Anaeróbios

A produção de biogás de maneira controlada é feita através de digestores anaeróbios. Os digestores anaeróbios são unidades de tratamento desenvolvidas com base nos princípios de bioquímica e microbiologia do processo de digestão anaeróbia (METCALF; EDDY, 2003).

Os digestores podem ser classificados em função das seguintes características (JORDÃO; PESSÔA, 2011):

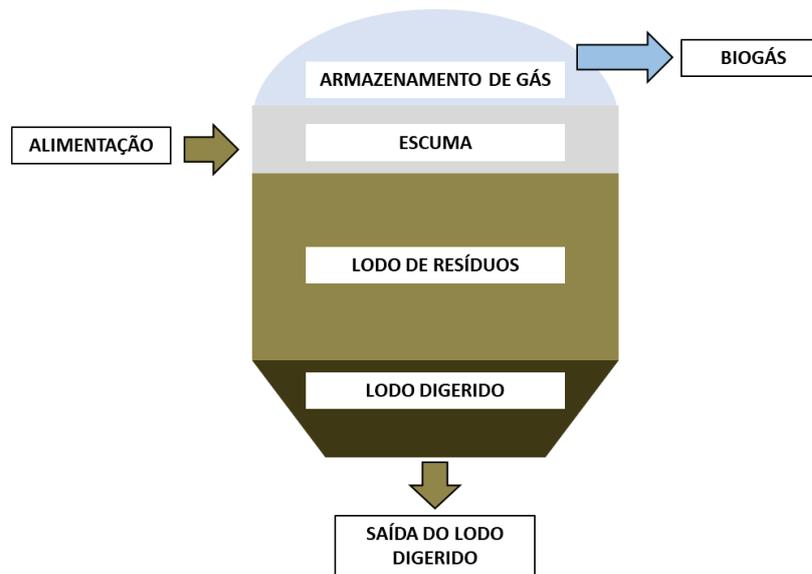
- Forma: cilíndricos, prismáticos de seção retangular e ovais;
- Cobertura: sem cobertura e com cobertura, com tampa fixa ou móvel;
- Homogeneização: com recirculação do substrato, com recirculação do gás e com agitadores;
- Estágios: estágio simples e múltiplo estágio;
- Carga de sólidos voláteis aplicada: baixa carga e alta carga.
- Alimentação: contínua ou por batelada.

A digestão anaeróbia pode ocorrer em estágio único ou em múltiplo estágio – sendo este geralmente realizado em duas unidades, através de um digestor primário e um digestor secundário (JORDÃO; PESSÔA, 2011).

Para Chernicharo (1997) as três principais configurações de digestores que têm sido aplicadas são: digestor anaeróbio de baixa carga, digestor anaeróbio de um estágio e alta carga e digestor anaeróbio de dois estágios e alta carga.

A Figura 15, mostra um digestor anaeróbio de baixa carga é geralmente aplicado em pequenas estações de tratamento, sem dispositivos de mistura e sendo usualmente constituído de um único tanque (CHERNICHARO, 1997).

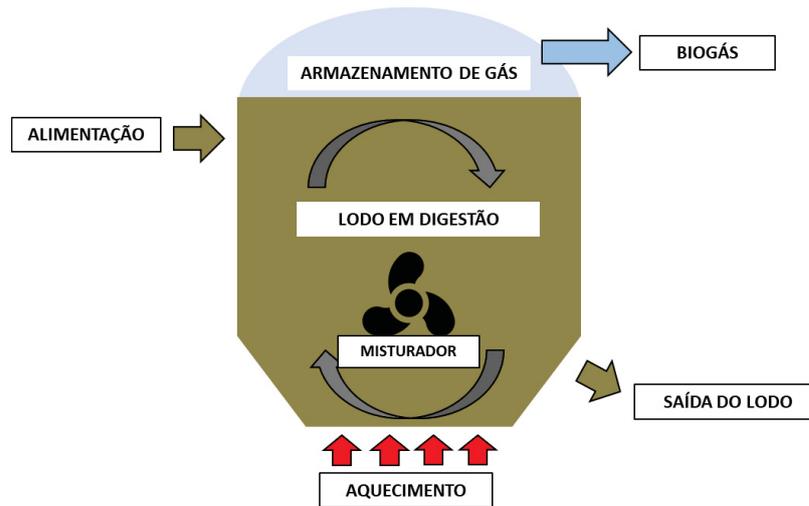
FIGURA 15 - DIGESTOR ANAERÓBIO DE BAIXA CARGA



FONTE: Adaptado de CHERNICHARO (1997).

O digestor anaeróbio de estágio único e alta carga, apresentado na Figura 16, possui mecanismos de aquecimento e mistura, o que proporciona mais estabilidade e eficiência no processo (CHERNICHARO, 1997).

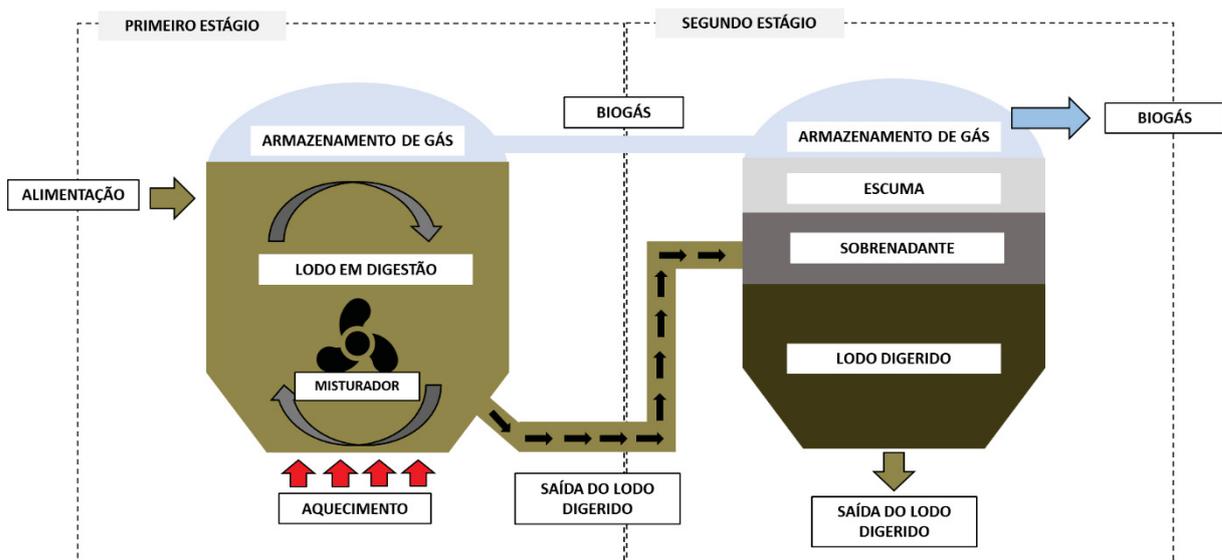
FIGURA 16 - DIGESTOR ANAERÓBIO DE ÚNICO ESTÁGIO



FONTE: Adaptado de METCALF; EDDY (2003).

Por fim, a Figura 17 apresenta a digestão em múltiplo estágio possui o digestor primário – responsável pelas principais etapas da digestão anaeróbia (acidificação, regressão ácida, gaseificação e liquefação) –, sendo sua finalidade principal a separação das fases líquido-sólido-gás, enquanto no digestor secundário ocorre principalmente o adensamento do lodo (JORDÃO; PESSÔA, 2011).

FIGURA 17 - DIGESTOR ANAERÓBIO DE DOIS ESTÁGIOS



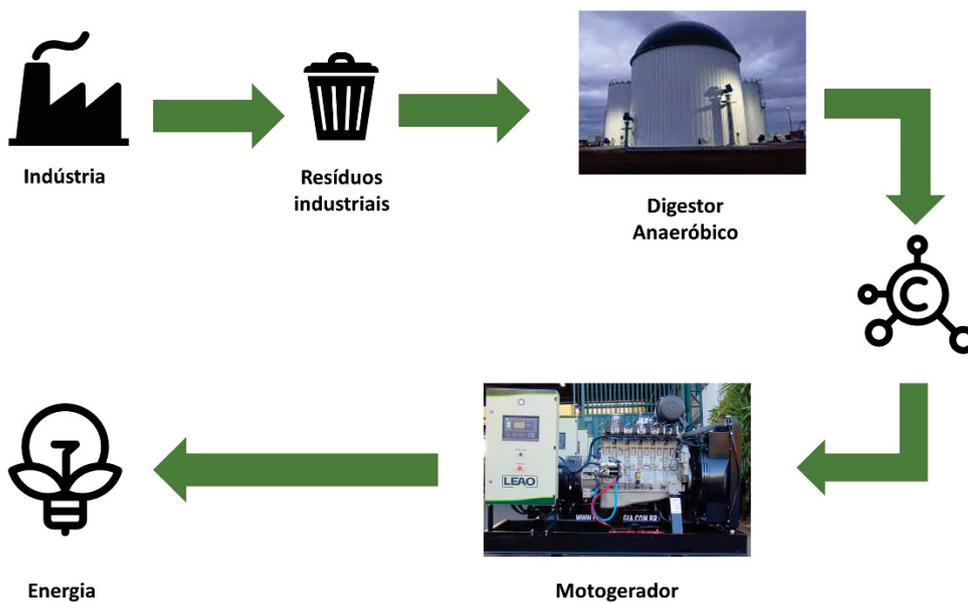
FONTE: Adaptado de METCALF; EDDY (2003).

A alimentação do digestor com matéria-prima pode ser feita por batelada ou de maneira contínua. Na alimentação por batelada, os resíduos são introduzidos no

reator que é selado durante o processo de digestão anaeróbia; na alimentação contínua (mais comum), os resíduos são adicionados com frequência durante o processo anaeróbio (MORIARTY, 2013).

No fluxograma demonstrado na Figura 18, mostra as etapas necessárias para geração de energia elétrica por meio da digestão anaeróbia podem ser observadas de maneira simplificada.

FIGURA 18 - FLUXOGRAMA DE PROJETO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE DIGESTÃO ANAERÓBIA



FONTE: O autor (2022).

### 3.6 ASPECTOS LEGAIS E REGULATÓRIOS

Atualmente, o Brasil conta com uma capacidade instalada de geração de energia elétrica superior a 174 mil MW e um sistema elétrico interligado com uma rede básica, a qual é composta apenas por linhas de transmissão com tensão superior a 230 kV, com mais de 145 mil quilômetros (ONS, 2022b). Estes fatos ilustram a complexidade do setor elétrico brasileiro e, por consequência, a necessidade de possuir políticas e diretrizes robustas para garantir a segurança do fornecimento de energia elétrica para todos os brasileiros. Portanto, é fundamental entender os papéis dos responsáveis por regulamentar, comercializar e coordenar a operação de energia elétrica no Brasil e, nesse sentido, destacam-se ANEEL, CCEE e ONS.

Pertence à ANEEL o papel de regulamentar as políticas e diretrizes para a utilização e exploração dos serviços de energia elétrica pelas partes envolvidas, como consumidores e produtores de energia. Além disso, cabe à Agência: definir padrões de qualidade de atendimento e de segurança compatíveis com as necessidades de cada região, com foco na viabilidade técnica, econômica e ambiental das ações e, por meio desses esforços, promover o uso eficaz e eficiente de energia elétrica; por fim, proporcionar condições para a livre competição no mercado de energia elétrica (ANEEL, 2017).

A viabilização da comercialização de energia elétrica no Brasil é de responsabilidade da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE, que é uma associação civil e privada, sem fins lucrativos (CCEE, 2022b).

Já a coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) e pelo planejamento da operação dos sistemas isolados do país, sob a fiscalização e regulação da ANEEL, é de responsabilidade do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2022c).

Desse modo, neste capítulo serão apresentados aspectos fundamentais relacionados à regulamentação para instalação e comercialização de energia de uma central de recuperação energética de resíduos no Brasil.

### 3.6.1 Autorização para Instalação de Central de Geração de Energia

Como a exploração de energia elétrica no Brasil é competência do governo federal, para qualquer empreendimento produzir energia elétrica, se faz necessária sua regulamentação através de autorização, concessão ou permissão do próprio governo (BRASIL, 1995). A legislação nacional estabelece, assim, normas para outorga de concessões e permissões de serviços públicos que possuam os requisitos para produção de energia elétrica.

A implantação de empreendimentos de geração de energia de fonte térmica com potência superior a 50.000 kW destinados ao serviço público, de acordo com a legislação nacional, excluindo as usinas nucleares, são objetos de concessão mediante licitação e com prazo contratual máximo de até 35 anos (BRASIL, 1995).

Por outro lado, a implantação de usinas termelétricas com potência superior a 5.000 kW e inferior a 50.000 kW, destinadas ao uso exclusivo do autoprodutor ou à

produção independente de energia, é objeto de autorização do governo, a qual tem com vigência de até 35 anos (ANEEL, 2020).

Por sua vez, assim como qualquer usina termoelétrica, a implantação de usinas de recuperação de energia de resíduos sólidos de potência igual ou inferior a 5.000 kW está dispensada de concessão ou autorização, devendo apenas apresentar um comunicado ao poder concedente (BRASIL, 1995).

Acrescenta-se que geradores com potencial de geração de energia inferior a 5.000 kW ainda podem ser classificados como microgeradores ou minigeradores. De acordo com a ANEEL (2016a), a microgeração distribuída refere-se a uma central geradora de energia elétrica com potência instalada inferior ou igual a 75 kW, enquanto que a minigeração distribuída diz respeito às centrais geradoras com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para a fonte hídrica, ou 5 MW para as demais fontes. Em 2022, a Lei nº 14.300 (BRASIL, 2022) instituiu o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, atribuindo-lhes a seguinte descrição:

- **Microgeração:** Central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, ou fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
- **Minigeração distribuída:** central geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada que não se classifica como microgeração distribuída e que possua potência instalada, em corrente alternada, maior que 75 kW, menor ou igual a 5 MW para as fontes despacháveis e menor ou igual a 3 MW para as fontes não despacháveis, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição de energia elétrica por meio de instalações de unidades consumidoras.

Para obtenção de outorga, o empreendimento de geração de energia deve comprovar aspectos técnicos que definam a capacidade de geração e as condições de operação, como: disponibilidade de recurso combustível, capacidade instalada e o acesso às instalações de distribuição e de transmissão energia elétrica (MME, 2022).

O processo de outorga de central geradora observará o registro da potência instalada e da potência líquida da central geradora, conforme valores declarados pelo

agente outorgado em relatório técnico à ANEEL. Para uma unidade de geração termelétrica, esse relatório é composto por informações necessárias para determinação das potências instalada e líquida, como: características dos equipamentos, diagrama do conjunto motor gerador, PCI do combustível e disponibilidade do combustível (MME, 2022).

Entretanto, de acordo com a ANEEL (2013), a potência instalada de unidades de geração de energia do tipo térmica com potência de até 5.000 kW será determinada com base no menor valor entre a potência nominal do equipamento motriz (kW) e a do gerador elétrico (kW) – essa definida pelo produto da potência elétrica aparente (kVA) e pelo fator de potência nominal (F.P.), ambos tomados diretamente da placa aprovada pelo fabricante para operação em regime contínuo.

#### *3.6.1.1 Diferença entre Concessão e Autorização*

Por um lado, salienta-se que a autorização não possui restrições e não prevê indenização no caso de sua extinção. Por outro lado, a concessão é regulada por contrato, prevendo indenização e as condições de sua anulação. Do ponto de vista da aplicação, a autorização tem como vantagens a flexibilidade e maior agilidade em relação à concessão. Por sua vez, a concessão, visando prover melhores garantias para as partes, se caracteriza por possuir um número maior de obrigações, tornando o processo mais limitado e moroso.

#### *3.6.1.2 Sistema de Compensação de Energia Elétrica para Microgeração e Minigeração Distribuída*

Como definido na Lei nº 14.300 (BRASIL, 2022), o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) trata-se de um sistema no qual a energia elétrica injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída, na rede da distribuidora local onde está instalada, é cedida a título de empréstimo gratuito e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ou, ainda, contabilizada como crédito de energia de unidades consumidoras participantes do mesmo sistema de geração.

O crédito contabilizado para consumo posterior, conhecido como excedente de energia elétrica, é a diferença positiva entre a energia elétrica injetada e a energia

elétrica consumida por unidade consumidora com microgeração ou minigeração, contabilizada em um ciclo de faturamento para utilização futura (BRASIL, 2022).

A aplicação do sistema de compensação pode acontecer na modalidade local, no qual o excedente de energia elétrica gerado por unidade consumidora é compensado ou creditado pela mesma unidade consumidora, ou na modalidade remota, caracterizada por unidades consumidoras de titularidade que possuam unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída, com atendimento de todas as unidades consumidoras pela mesma distribuidora (BRASIL, 2022).

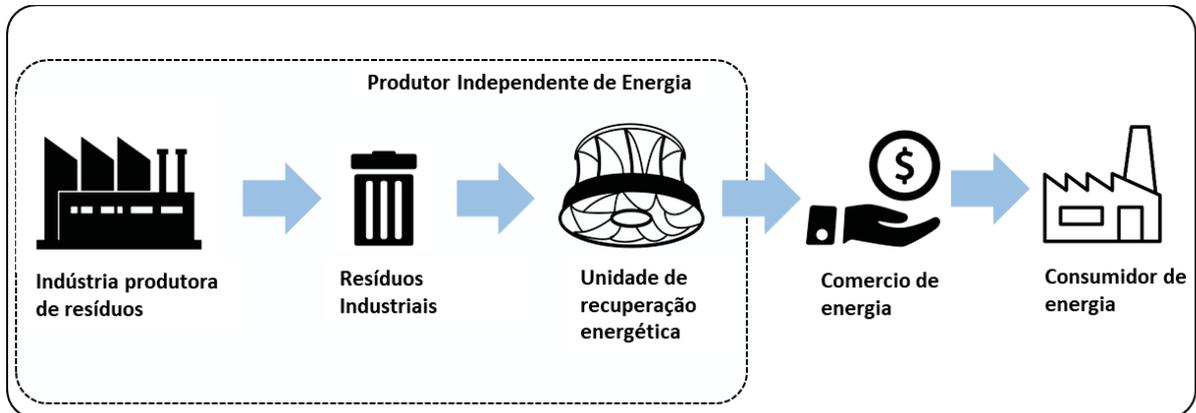
### 3.6.2 Classificação de Produtores de Energia

No Brasil, a empresa ou consórcio de empresas, além das concessionárias de serviço público de geração, que sejam detentores de concessão ou autorização para produzir energia elétrica, são classificados como “agentes de geração, sendo qualificados como: produtores independentes de energia ou autoprodutores” (ANEEL, 2015a).

Os produtores independentes de energia elétrica são pessoas jurídicas ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco (BRASIL, 2004). Assim, a produção independente permite a participação de investidores com autonomia para realização de contratos de compra e venda de energia, de maneira competitiva e flexível.

Dessa forma, uma indústria que comercializar a energia produzida por meio dos resíduos industriais será classificada como produtor independente de energia (Figura 19).

FIGURA 19 – FLUXOGRAMA PRIMÁRIO DE UMA PLANTA DE RECUPERAÇÃO PARA PRODUÇÃO INDEPENDENTE DE ENERGIA



FONTE: O autor (2022).

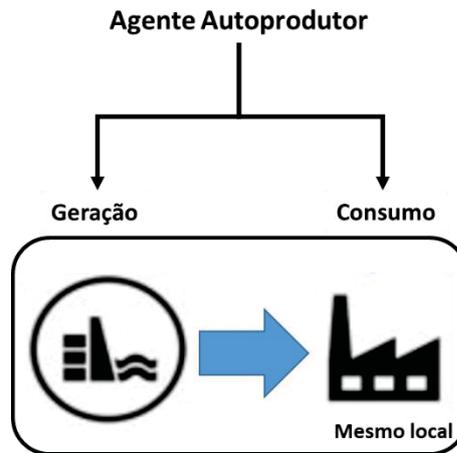
Por outro lado, os autoprodutores de energia elétrica são pessoas físicas ou jurídicas ou empresas reunidas em consórcio que recebem concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo (ANEEL, 2015a).

De modo prático, o autoprodutor é o consumidor que investe na geração da sua própria energia elétrica, adquirindo ou construindo usinas de energia elétrica. Conseqüentemente, esse consumidor estará apto para consumir a energia gerada para suprir parcialmente ou totalmente sua demanda energética.

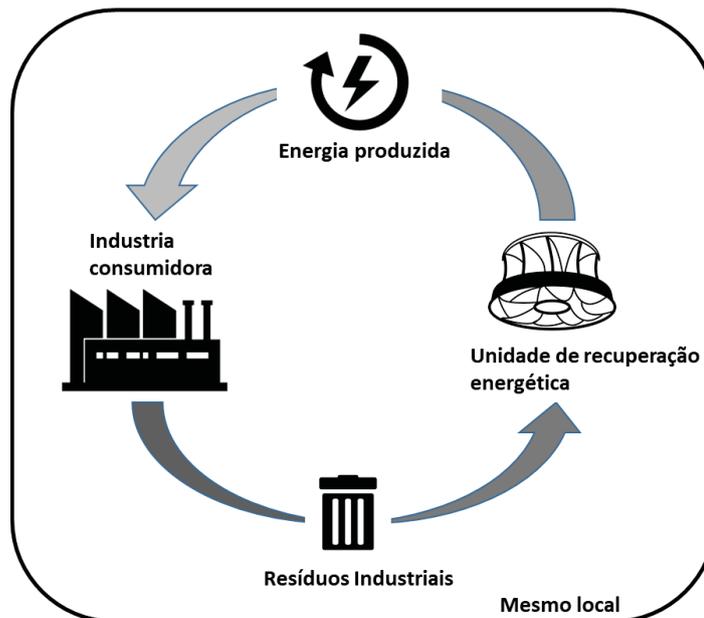
As indústrias que possuem grande demanda de energia elétrica são sensíveis a tal insumo; logo, investem na produção de energia elétrica visando assumir riscos, com o propósito de garantir a competitividade da atividade industrial como meio de proteção ao risco de preço e de garantir o suprimento energético (ABIAPE, 2020).

De acordo com a ABIAPE (2020), a autoprodução pode ser obtida através de dois arranjos:

- **Autoprodução *in situ*:** é o arranjo de quando a geração e o consumo ocorrem no mesmo local. O caso é frequente em sistemas isolados e/ou que visam aproveitar os subprodutos de processos industriais para fins de produção de energia. As FIGURAS 20 e 21 demonstram como é configurada a autoprodução *in situ*.

FIGURA 20 - CONFIGURAÇÃO PARA AUTOPRODUÇÃO *IN SITU*

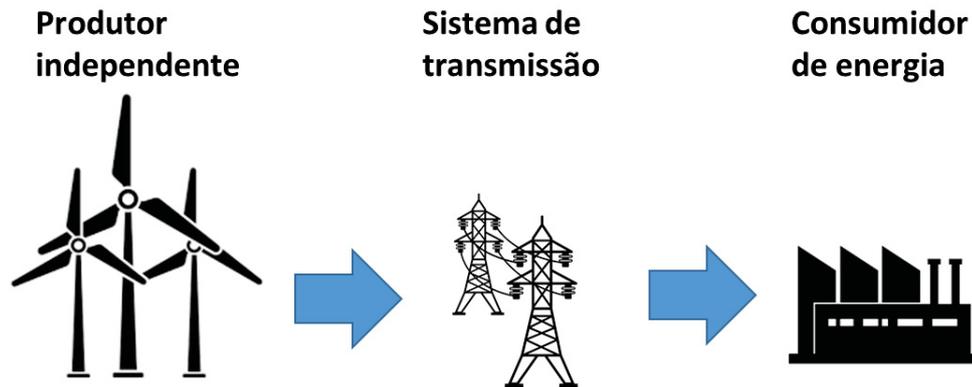
FONTE: ABIAPE (2020).

FIGURA 21 - CONFIGURAÇÃO PARA AUTOPRODUÇÃO COM UNIDADE DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA *IN SITU*

FONTE: O autor (2022).

- **Autoprodução distante do consumo:** como se observa na FIGURA 22, a geração e o consumo ocorrem em locais distintos, tornando-se necessário o uso oneroso de redes de transmissão/distribuição. As fontes hidráulica, termelétrica e eólica estão entre os maiores empreendimentos em autoprodução nesse tipo de arranjo.

FIGURA 22 - AUTOPRODUÇÃO DISTANTE DO CONSUMO



FONTE: O autor (2022).

### 3.6.3 Mercado de Comercialização de Energia Elétrica

O mercado de energia elétrica possui um complexo sistema regulatório, sendo que os segmentos que o compõem são: geração, transmissão, distribuição e comercialização. Tais segmentos estão inseridos em dois ambientes distintos: o “ambiente regulado” e o “ambiente livre”.

O ambiente regulado foi desenvolvido com regras que garantam proteção aos consumidores de menor porte através de tarifas reguladas, de forma que esses consumidores não fiquem expostos à volatilidade do preço de energia por incapacidade de dominar as regras e de administrar adequadamente relações contratuais de comercialização de energia (REGO, 2012).

Os consumidores de maior porte, que não se sintam seguros em administrar e negociar seus contratos e preços de energia, apesar de estarem aptos a comprar sua energia a preço livremente negociado, enquanto não façam a opção formal por serem consumidores livres, também devem participar de um ambiente de tarifas reguladas pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL com condições contratuais definidas por contratos de adesão aplicáveis aos consumidores denominados cativos (REGO, 2012).

De acordo com Amaral (2016), a comercialização (compra e venda) de energia no ambiente regulado é formalizada através de contratos celebrados entre os geradores e os distribuidores que participam dos leilões de compra e venda de energia, de forma que os contratos desse ambiente possuam regulação específica

para aspectos como o preço da energia, não passíveis de alterações bilaterais pelos agentes.

Por outro lado, o ambiente de comercialização livre, corresponde ao segmento de mercado no qual as operações de compra e venda de energia elétrica são negociadas livremente por meio de contratos bilaterais, dentro de regras e políticas de estabelecidos (REGO, 2012). Nesse mercado, grandes consumidores podem escolher seu próprio fornecedor de energia elétrica, discutir preços e condições contratuais e, conseqüentemente, obter as vantagens oferecidas pela livre competição.

De acordo com a Lei nº 10.848 (BRASIL, 2004), que dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, os ambientes de comercialização de energia podem ser definidos como:

- Ambiente de Contratação Regulada - ACR: segmento do mercado no qual se realizam as operações de compra e venda de energia elétrica entre agentes vendedores e agentes de distribuição, precedidas de licitação, ressalvados os casos previstos em lei, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos;
- Ambiente de Contratação Livre - ACL: segmento do mercado no qual se realizam as operações de compra e venda de energia elétrica, objeto de contratos bilaterais livremente negociados, conforme regras e procedimentos de comercialização específicos.

A diferença entre os dois ambientes está representada no Quadro 08.

QUADRO 08 - CARACTERÍSTICAS DOS AMBIENTES DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA

	<b>Ambiente Livre</b>	<b>Ambiente Regulado</b>
<b>Participantes</b>	Geradoras, comercializadoras, consumidores livres e especiais	Geradoras, distribuidoras e comercializadoras. As comercializadoras podem negociar energia somente nos leilões de energia.
<b>Contratação</b>	Livre negociação entre compradores e vendedores	Realizada por meio de leilões de energia promovidos pela CCEE sob delegação da ANEEL.
<b>Tipo de contrato</b>	Acordo livremente estabelecido entre as partes	Regulado pela ANEEL, denominado Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado.

FONTE: Adaptado de CCEE (2022a).

### 3.6.4 Consumidores de Energia

O consumidor participante do ambiente de contratação regulada, deve comprar energia da distribuidora detentora da concessão ou permissão, na área onde se localizam as instalações responsáveis pelo acesso e é atendido sob condições reguladas (ANEEL, 2015b).

No ambiente de contratação livre, por outro lado, os consumidores podem optar por dois modelos de contratação. O primeiro modelo caracteriza o consumidor livre, o qual, com carga igual ou superior a: 1.000 kW em 2022 ou 500 kW após janeiro de 2023, atendido em qualquer tensão, pode optar pela compra de energia elétrica de qualquer concessionário, permissionário ou autorizado de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (ANEEL, 2021; MME, 2018). O segundo modelo se aplica ao consumidor especial, identificado como o consumidor livre ou conjunto de consumidores livres reunidos por comunhão de interesses de fato ou de direito, cuja carga é igual ou superior a 500 kW, que tenha energia fornecida exclusivamente a partir de fontes incentivadas, como pequenas centrais hidrelétricas e usinas solares, eólicas ou de biomassa (ANEEL, 2015b).

### 3.6.6 Sistemas Elétricos e Modelos Operacionais de Geração no Brasil

O Brasil possui um sistema elétrico que interliga todas as suas regiões, formado pelas redes de transmissão e de distribuição de energia elétrica, conectando geradores de energia aos consumidores (ABRACEEL, 2019). Dessa forma, de acordo com a localização do ponto de conexão da central de geração de energia, existem duas possibilidades de sistemas para se efetuar o acesso da central de geração de energia:

- **Sistemas Isolados:** os sistemas elétricos de serviço público de distribuição de energia elétrica que, em sua configuração normal, não estejam eletricamente conectados ao Sistema Interligado Nacional - SIN (BRASIL, 2010a).
- **Sistema Interligado Nacional - SIN:** conjunto de instalações e de equipamentos que possibilitam o suprimento de energia elétrica nas regiões do país interligadas eletricamente (ANEEL, 2014).

Dentro de cada um dos sistemas descritos, a operação e o despacho da central de recuperação energética de resíduos, assim como qualquer outro tipo de central de geração de energia, se classificam sob três formas, dependendo do ponto de conexão e do porte da central (BARJA, 2006):

- I. Operação isolada: a central opera desconectada de qualquer sistema externo. Em geral, esse tipo de configuração encontra-se em centrais dimensionadas para atender a demanda elétrica de consumidores localizados nas suas proximidades. Para instalações de demanda de energia variável, essa opção torna o investimento menos atrativo, uma vez que os excedentes de eletricidade não poderão ser exportados e comercializados. Além disso, a planta deve ser dimensionada para o atendimento à carga de ponta, o que torna o investimento inicial maior.
- II. Operação interligada: de modo geral, essa operação acontece quando a central de geração de energia opera conectada ao SIN. Entretanto, esse tipo de operação também pode ocorrer quando a operação da central acontece em sincronia com qualquer sistema elétrico de transmissão ou distribuição local.
- III. Operação integrada: ocorre quando um empreendimento de geração, conectado ao SIN, é despachado de forma centralizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico. O ONS considera, para o despacho integrado, as centrais geradoras com disponibilidade mínima de 30 MW ao Sistema Interligado Nacional.

### 3.6.7 Licenciamento Ambiental

O início das discussões sobre a regulamentação da exploração do meio ambiente no Brasil se notabilizou com a instituição da Lei Federal nº 6.938 (Brasil, 1981), que tornou o Licenciamento Ambiental um procedimento obrigatório para atividades com potencial para causar impactos negativos ao meio ambiente. O objetivo principal do licenciamento ambiental é promover análises referentes à viabilidade ambiental das atividades econômicas, visando garantir que novos empreendimentos sejam instalados em locais ambientalmente adequados e com tecnologias que reduzam os possíveis impactos negativos sobre o ambiente.

A Lei nº 6.938 (Brasil, 1981) também estabeleceu a Política Nacional de Meio Ambiente - PNMA, que define Meio Ambiente como o conjunto de condições, leis, influências e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas. A PNMA estabelece, entre outras coisas, os critérios e as diretrizes para avaliação do impacto ao meio ambiente dos projetos em análise (CONAMA, 1986).

Relativamente ao processo de licenciamento ambiental, a PNMA adotou as seguintes definições (CONAMA, 1997):

- I. Licenciamento Ambiental: procedimento administrativo pelo qual o órgão ambiental competente licencia a localização, a instalação, a ampliação e a operação de empreendimentos e de atividades utilizadoras de recursos ambientais, consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras, ou daquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental, considerando as disposições legais e regulamentares e as normas técnicas aplicáveis ao caso.
- II. Licença Ambiental: ato administrativo pelo qual o órgão ambiental competente estabelece as condições, restrições e medidas de controle ambiental que deverão ser obedecidas pelo empreendedor, pessoa física ou jurídica, para localizar, instalar, ampliar e operar empreendimentos ou atividades utilizadoras dos recursos ambientais consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou aquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental.
- III. Estudos Ambientais: são todos e quaisquer estudos relativos aos aspectos ambientais relacionados à localização, instalação, operação e ampliação de uma atividade ou empreendimento, apresentados como subsídio para a análise da licença requerida, tais como: relatório ambiental, plano e projeto de controle ambiental, relatório ambiental preliminar, diagnóstico ambiental, plano de manejo, plano de recuperação de área degradada e análise preliminar de risco.

O processo administrativo de licenciamento, visando a operação de um projeto, contempla a expedição de três tipos de licenças ambientais que devem ser expedidas pelo poder público (BRASIL, 2012; CONAMA, 1997):

- I. Licença Prévia (LP) – concedida na fase preliminar do planejamento do empreendimento ou atividade aprovando sua localização e concepção, atestando a viabilidade ambiental e estabelecendo os requisitos básicos e condicionantes a serem atendidos nas próximas fases de sua implementação;
- II. Licença de Instalação (LI) – autoriza a instalação do empreendimento ou atividade, de acordo com as especificações constantes dos planos, programas e projetos aprovados, incluindo as medidas de controle ambiental e demais condicionantes, da qual constituem motivo determinante;
- III. Licença de Operação (LO) – autoriza a operação da atividade ou empreendimento, após a verificação do efetivo cumprimento do que consta das licenças anteriores, com as medidas de controle ambiental e condicionantes determinados para a operação.

#### *3.6.7.1 Estudo de Impacto Ambiental e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA)*

De acordo com a Resolução nº 1 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (1986), o licenciamento ambiental depende da elaboração de Estudo de Impacto Ambiental - EIA e seu respectivo relatório de impacto ambiental – RIMA. Estes documentos são instrumentos legais de gestão ambiental, que abordam as prováveis alterações nas características socioeconômicas e biofísicas do meio ambiente resultantes de um projeto proposto (MILARÉ; BENJAMIN, 1993).

O estudo de impacto ambiental, além de atender à legislação, em especial os princípios e objetivos expressos na Política Nacional do Meio Ambiente, deve satisfazer às seguintes diretrizes (CONAMA, 1986):

- I. Contemplar todas as alternativas tecnológicas e de localização do projeto, confrontando-as com a hipótese de não execução do projeto;
- II. Identificar e avaliar sistematicamente os impactos ambientais gerados nas fases de implantação e operação da atividade;
- III. Definir os limites da área geográfica a ser direta ou indiretamente afetada pelos impactos, denominada área de influência do projeto, considerando, em todos os casos, a bacia hidrográfica na qual se localiza;

- IV. Considerar os planos e programas governamentais, propostos e em implantação na área de influência do projeto, e sua compatibilidade.

As seguintes atividades são requisitos para o desenvolvimento do estudo de impacto ambiental (CONAMA, 1986):

- I. Diagnóstico ambiental da área de influência do projeto, com completa descrição e análise dos recursos ambientais e suas interações, tal como existem, de modo a caracterizar a situação ambiental da área, antes da implantação do projeto;
- II. Análise dos impactos ambientais do projeto e de suas alternativas, através de identificação, previsão da magnitude e interpretação da importância dos prováveis impactos relevantes, discriminando: os impactos positivos e negativos (benéficos e adversos), diretos e indiretos, imediatos e em médio e longo prazos, temporários e permanentes; seu grau de reversibilidade; suas propriedades cumulativas e sinérgicas; a distribuição dos ônus e benefícios sociais;
- III. Definição das medidas mitigadoras dos impactos negativos, entre elas: os equipamentos de controle e sistemas de tratamento de despejos, avaliando a eficiência de cada uma delas.
- IV. Elaboração do programa de acompanhamento e monitoramento dos impactos positivos e negativos, indicando os fatores e parâmetros a serem considerados.

O relatório de impacto ambiental, além de apresentado de forma objetiva e adequada a sua compreensão, refletindo as conclusões do estudo de impacto ambiental, deve conter (CONAMA, 1986):

- I. Os objetivos e justificativas do projeto, sua relação e compatibilidade com as políticas setoriais, planos e programas governamentais;
- II. A descrição do projeto e suas alternativas tecnológicas e locacionais, especificando, para cada um deles, nas fases de construção e operação a área de influência, as matérias-primas e mão de obra, as fontes de energia, os processos e técnicas operacionais, os prováveis efluentes, emissões, resíduos e perdas de energia, os empregos diretos e indiretos a serem gerados;

- III. A síntese dos resultados dos estudos de diagnóstico ambiental da área de influência do projeto;
- IV. A descrição dos prováveis impactos ambientais da implantação e operação da atividade, considerando o projeto, suas alternativas, os horizontes de tempo de incidência dos impactos e indicando os métodos, técnicas e critérios adotados para sua identificação, quantificação e interpretação;
- V. A caracterização da qualidade ambiental futura da área de influência, comparando as diferentes situações da adoção do projeto e suas alternativas, bem como com a hipótese de sua não realização;
- VI. A descrição do efeito esperado das medidas mitigadoras previstas em relação aos impactos negativos, mencionando aqueles que não puderem ser evitados, e o grau de alteração esperado;
- VII. O programa de acompanhamento e monitoramento dos impactos;
- VIII. Recomendação quanto à alternativa mais favorável (conclusões e comentários de ordem geral).

#### 3.6.7.2 Relatório Ambiental Simplificado (RAS)

Em virtude da necessidade de estabelecer procedimento simplificado para o licenciamento ambiental dos empreendimentos com impacto ambiental de pequeno porte, o CONAMA regulamentou a aplicação do Relatório Ambiental Simplificado (RAS). Assim, de acordo com a Resolução do CONAMA n° 279 de 2001, esse relatório deve apresentar:

[...] os estudos relativos aos aspectos ambientais relacionados à localização, instalação, operação e ampliação de uma atividade ou empreendimento, apresentados como subsídio para a concessão da licença prévia requerida, que conterá, as informações relativas ao diagnóstico ambiental da região de inserção do empreendimento, sua caracterização, a identificação dos impactos ambientais e das medidas de controle, de mitigação e de compensação. (CONAMA, 2001).

O licenciamento ambiental simplificado é aplicado em empreendimentos elétricos com pequeno potencial de impacto ambiental, como (CONAMA; 2001):

- usinas hidrelétricas e sistemas associados;
- usinas termelétricas e sistemas associados;
- sistemas de transmissão de energia elétrica (linhas de transmissão e subestações).

- usinas eólicas e outras fontes alternativas de energia.

### 3.6.7.3 *Regulamentação Aplicada para o Tratamento Térmico de Resíduos*

No ano de 2002, o Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA normatizou os procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, através da Resolução CONAMA nº 316 (CONAMA, 2002a). A resolução considera como tratamento térmico os processos cuja operação de tratamento de resíduos seja realizada acima da temperatura mínima de 800 °C. Além disso, dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, considerando que o princípio da precaução é um fundamento para o desenvolvimento sustentável e salientando que sistemas de tratamento térmico de resíduos são fontes potenciais de risco ambiental e de emissão de poluentes perigosos, podendo constituir agressão à saúde e ao meio ambiente se não forem corretamente instalados, operados e mantidos (CONAMA, 2002a).

Assim, por meio dessa resolução são regularizados os processos de tratamento térmico de resíduos, estabelecendo-se procedimentos operacionais, limites de emissão e critérios de desempenho, controle, tratamento e disposição final de efluentes para os mesmos (CONAMA, 2002a). Portanto, a escolha de sistemas de tratamentos térmicos de resíduos deve ser antecedida de um estudo de análise de alternativas tecnológicas. Esse estudo deve, então, comprovar que a tecnologia selecionada está em estágio mais eficaz e avançado de desenvolvimento que as diversas tecnologias de tratamento anteriores, de forma a garantir que a operação do sistema proporcione à produção emissões iguais ou inferiores aos limites descritos nessa resolução (CONAMA, 2002a).

O processo de licenciamento das unidades de tratamento térmico de resíduos será fundamentado com base em estudos, composto por (CONAMA, 2002a):

- I. Projeto Básico e de Detalhamento;
- II. Estudo e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA) ou outro estudo, definido pelo órgão ambiental competente;
- III. Análise de Risco;
- IV. Plano do Teste de Queima;
- V. Plano de Contingência;
- VI. Plano de Emergência.

### 3.7 INDICADORES PARA AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROJETO

O desenvolvimento de um estudo de viabilidade financeira para um projeto de usina de recuperação energética de resíduos sólidos tem o papel de justificar um investimento financeiramente. Geralmente, a análise de viabilidade financeira de um projeto é composta pela análise dos indicadores financeiros: taxa do retorno do investimento (TIR), valor presente líquido (VPL) e tempo de retorno do investimento (payback)

#### 3.7.1 Despesas de capital

O custo de capital fixo consiste no valor do ativo imobilizado que não será consumido durante sua utilização (NÁSNER, 2015). Por exemplo, os custos de aquisição de equipamentos, os materiais utilizados e mão de obra do projeto podem ser considerados custo de capital fixo.

#### 3.7.2 Despesas operacionais

Despesas operacionais referem-se aos investimentos relacionados às despesas de manutenção e gastos recorrentes com o projeto, por exemplo, o pagamento do trabalho de empregados na operação e na manutenção da planta.

#### 3.7.3 Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

A Taxa Mínima de Atratividade (TMA), conhecida como taxa de juros comparativa ou de desconto, trata-se do percentual mínimo de retorno que o investidor aceita obter como rendimento para seu investimento (PEREIRA; ALMEIDA, 2015).

#### 3.7.4 Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL providencia informações a respeito de um valor presente de pagamentos futuros, descontando a taxa de custo de capital, ou seja, trata-se do cálculo de quanto valeriam hoje os futuros fluxos de investimentos, somados a um custo de partida. Desse modo, o VPL é um indicador usado para estudar a viabilidade de um projeto utilizando o fluxo financeiro projetado para o futuro (SILVA; FONTES, 2005). Se o indicador for positivo, significa que gerará um saldo positivo para o

investidor; se for negativo, significa que o investidor perderá dinheiro ao investir no projeto estudado.

O VPL calcula para o presente o fluxo de caixa esperado, descontando a taxa de juros “i” (TMA). Na Equação (04) é possível perceber que esse indicador consiste na diferença entre o valor presente dos fluxos de caixa referentes a cada período do planejamento ( $FC_k$ ), considerando os juros  $i$ , e o investimento inicial ( $FC_0$ ), sendo  $k$  os períodos do planejamento que vão de 1 até  $n$  (SILVA; FONTES, 2005).

$$VPL = -FC_0 + \sum_{k=1}^N \frac{FC_k}{(1+i)^k} \quad (04)$$

### 3.7.5 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa necessária para coincidir o valor atual das entradas ao valor das saídas projetadas no fluxo de caixa, vide Equação (05). A TIR é uma taxa de desconto que torna o VPL de um projeto igual a zero (PEREIRA; ALMEIDA, 2015). Se a taxa mínima de atratividade (TMA) for superior à TIR, o projeto deveria ser rejeitado, haja vista que um investimento com o mínimo de retorno já definido estaria superando a expectativa de retorno do projeto em estudo. Por outro lado, se a TMA for inferior à TIR, esse investimento deveria ser aceito, visto que proporciona retorno superior ao investimento com o mínimo de retorno definido.

Onde:

- $FC_0$  é o investimento inicial
- $FC_k$  são os fluxos de caixa referentes a cada ano.
- $k$  vai de 1 até  $n$  períodos analisados

$$0 = -FC_0 + \sum_{k=1}^N \frac{FC_k}{(1+i)^k} \quad (05)$$

### 3.7.6 Tempo de Retorno (*Payback*)

*Payback* é o tempo decorrido para que, através de fluxos financeiros positivos, o investimento inicial seja recuperado. O *payback* será nominal quando calculado com base no fluxo de caixa com valores nominais; ou presente líquido, no caso de ser calculado com base no fluxo de caixa com valores trazidos ao valor presente líquido.

O *payback* é tratado como critério de aceitação de investidores, porque se trata do período necessário projetado para reaver o investimento (LIMA *et al.*, 2013).

### 3.7.7 Custo Nivelado de Energia (LCOE)

O Custo Nivelado de Energia (no idioma inglês, *Levelized Cost of Electricity* - LCOE) é um indicador comum para comparar tecnologias de geração de energia. Essa métrica explana o custo da energia elétrica para construção e operação do projeto de energia ao longo de seu ciclo de vida (EIA, 2021).

Seu cálculo é obtido pela Equação (06):

$$LCOE = \sum_{t=0}^m \frac{\left[ \frac{C_n}{(1+i)^n} \right]}{\left[ \frac{E_n}{(1+i)^n} \right]} \quad (06)$$

Onde:

- **E<sub>n</sub>**: a energia produzida durante o ano;
- **i**: a taxa de desconto;
- **m**: a quantidade de anos do projeto;
- **C<sub>n</sub>** : custos de capital e o custo de operação de manutenção;

## 3.8 CRÉDITOS DE CARBONO

De acordo com dados divulgados pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC, as ações decorrentes das atividades econômicas e industriais têm causado modificações na biosfera, ocasionando uma concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, suficientemente para proporcionar danos à camada de ozônio do planeta e, conseqüentemente, proporcionar um aumento na temperatura média da superfície terrestre (IPCC, 2001).

Visando tratar do problema do efeito estufa e suas conseqüências, foi realizada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Essa convenção estabeleceu que os países desenvolvidos deveriam liderar o combate ao aquecimento global e, para isso, deveriam reduzir suas emissões antrópicas de gases de efeito estufa aos patamares anteriores aos de 1990 (UNFCCC, 2001).

Entretanto, no ano de 1995, em conferência com os países membros da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, que aconteceu em

Berlim na Alemanha, concluiu-se que os compromissos estabelecidos para os países desenvolvidos deveriam ser revistos, tornando as obrigações para os mesmos mais severas. Esse processo de revisão findou-se, em 1997, na terceira Conferência das Partes, realizada em Quioto no Japão, com a decisão de adoção do Protocolo de Quioto (UNFCCC, 2001).

Nessa convenção de Quioto, no Japão, foi estabelecido um acordo no qual foram definidas metas de redução da emissão de gases do efeito estufa para os países desenvolvidos. No evento foi estabelecido o compromisso de redução das emissões de gases do efeito estufa em cerca de 5,2% abaixo dos níveis observados em 1990 entre 2008-2012, além de critérios e diretrizes para a utilização dos mecanismos de mercado (UNFCCC, 2001).

### 3.8.1 Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

No Brasil, a utilização dos mecanismos de mercado de crédito de carbono pode acontecer através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), haja vista que este é o único mecanismo do Protocolo de Quioto que admite a participação voluntária de países em desenvolvimento (BRASIL, 2021). Por meio do MDL, um país desenvolvido pode comprar “créditos de carbono”, denominados “reduções certificadas de emissões” (RCEs), resultantes de atividades de projeto desenvolvidas em qualquer país em desenvolvimento que tenha ratificado o Protocolo, visando o atendimento de metas de limitação ou de redução de emissões (VERDUM, 2019).

Sobre o MDL, Rocha (2003, p. 9) ressalta que:

A proposta do MDL consiste em que cada tonelada de CO<sub>2</sub> deixada de ser emitida ou retirada da atmosfera por um país em desenvolvimento poderá ser negociada no mercado mundial, criando um novo atrativo para redução das emissões globais. Os países do Anexo I estabelecerão em seus territórios metas para redução de CO<sub>2</sub> junto aos principais emissores. As empresas que não conseguirem (ou não desejarem) reduzir suas emissões poderão comprar Certificados de Emissões Reduzidas (CER) em países em desenvolvimento e usá-los para cumprir suas obrigações.

Para aplicar o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, o desenvolvedor do projeto deve elaborar documento com a concepção do projeto utilizando metodologia aprovada pelo Comitê Executivo do MDL para definição de linha de base das atividades do projeto e a metodologia de monitoramento de suas emissões (VERDUM, 2019). De acordo com Frondizi (2009), a linha de base de uma atividade de projeto do

MDL é o cenário que representa, de forma razoável, as emissões antrópicas de gases do efeito estufa que ocorreriam na ausência da atividade de projeto proposta.

Após as etapas de validação e aprovação, os projetos são submetidos ao Conselho Executivo da UNFCCC para registro. Com isso, inicia-se o monitoramento e a verificação das reduções de emissões do gás de efeito estufa referentes ao projeto, para, finalmente, serem emitidas as Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) (VERDUM, 2019).

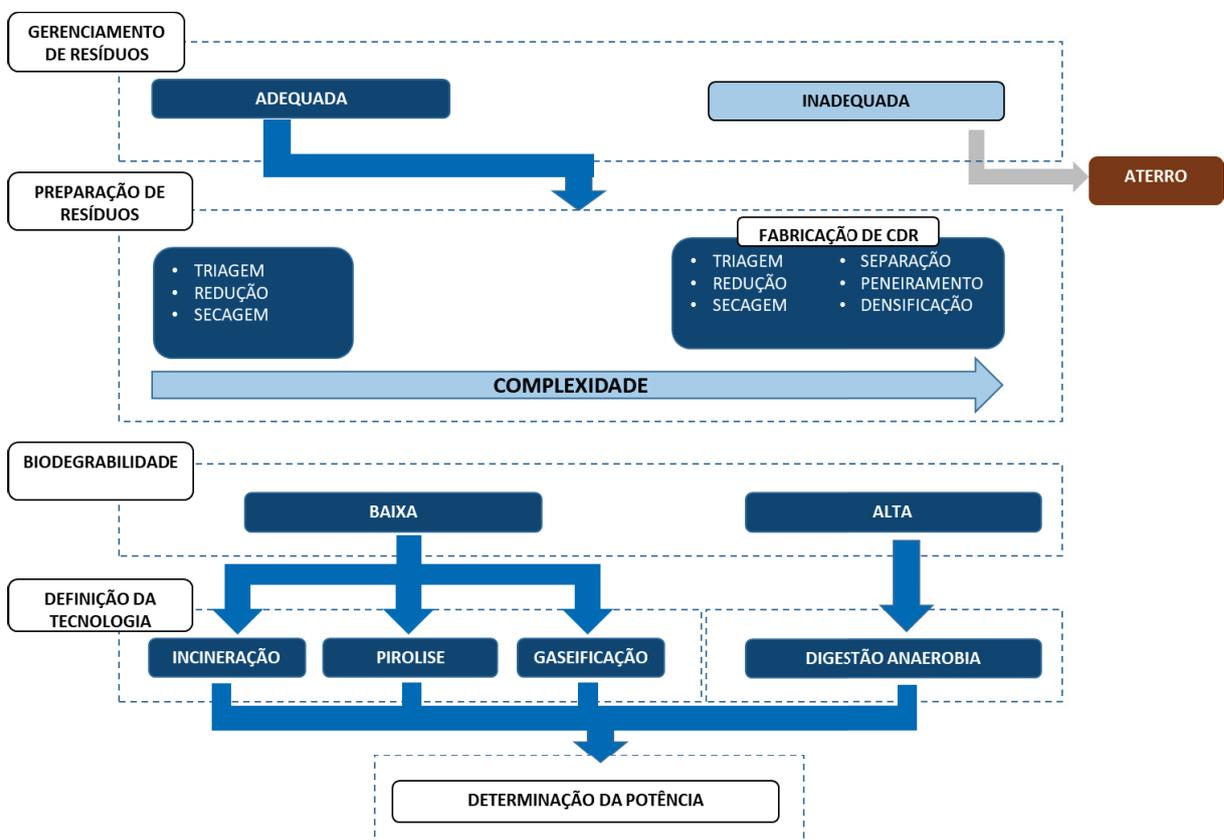
## 4 DISCUSSÕES E RESULTADOS

A seleção da tecnologia de recuperação energética para resíduos industriais de uma fábrica no Brasil é um processo complexo que necessita de avaliações técnicas, legais (elétrica e ambiental) e financeiras. O conteúdo apresentado nesta seção visa: suportar a definição da tecnologia de recuperação entre as estudadas nesta dissertação, orientar os interessados sobre os aspectos regulatórios e ambientais que devem ser considerados para um projeto deste tipo e, por fim, instruir como analisar a viabilidade do projeto através de indicadores financeiros. Para cumprir estes objetivos foram construídas processos e guias apresentados abaixo.

### 4.1 PROCESSO PARA DEFINIÇÃO DA TECNOLOGIA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

O fluxograma apresentado na Figura 23, sintetizam os principais fatores que devem ser conhecidos e analisados para escolha da tecnologia de recuperação energética a ser aplicada nos resíduos produzidos por uma indústria no Brasil.

FIGURA 23 - FLUXOGRAMA PARA DEFINIÇÃO DE TECNOLOGIA



FONTE: O autor (2022).

#### 4.1.1 Gestão de Resíduos

A existência de um sistema de gestão de resíduos capaz de separar, transportar e armazenar os resíduos gerados, de acordo com suas composições químicas, características físicas e funcionalidades, é um requisito para operação de uma central de recuperação energética. Portanto, a ausência de um sistema de gerenciamento de resíduos é um problema para recuperar energia de resíduos sólidos industriais de maneira eficiente. No caso da ausência de processos de gestão de resíduos eficazes, recomenda-se que os resíduos sejam destinados para aterros controlados.

#### 4.1.2 Preparação de Resíduos

Em uma central de recuperação energética, os resíduos devem passar por um processo de preparação, que compreende etapas sucessivas, não necessariamente nesta ordem ou totalidade, como: triagem, redução de tamanho, separação, peneiramento, secagem e densificação. Sendo que a produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) normalmente compreende todas as etapas citadas (HERNANDEZ-ATONAL *et al.*, 2007). Portanto, a preparação dos resíduos para conversão térmica ou biológica pode compreender apenas as etapas de triagem, separação e secagem, até um processo com maior complexidade como a fabricação de CDR.

Segue abaixo a descrição das principais etapas da preparação de matéria-prima para recuperação energética (VELIS *et al.* ;2010):

- **Triagem:** trata-se da separação de resíduos através de suas características físico-químicas, pois a qualidade da segregação dos resíduos está relacionada diretamente aos seus respectivos valores energéticos agregados. Nessa etapa também são segregados os resíduos perigosos que devem ser destinados para processamentos específicos.
- **Redução de tamanho:** geralmente por meio da trituração, os insumos devem ser reduzidos ao tamanho adequado para os próximos processos de preparação e transformação energética.
- **Separação:** deve ser feita extração de materiais que não contribuem energeticamente para os processos. Por exemplo, os materiais ferrosos,

considerados inertes, podem ser extraídos por separadores eletromagnéticos.

- **Peneiramento:** essa etapa tem a função de classificar os insumos triturados de acordo com suas dimensões mecânicas.
- **Secagem:** etapa com a finalidade de eliminar um líquido volátil contido no resíduo, através de evaporação. Esta etapa não aplicada para resíduos com alta biodegradabilidade.
- **Densificação:** trata-se da aplicação de tecnologias para compactação das partículas de resíduos, visando: o aumento da concentração energética, a uniformidade de tamanho e de formato dos produtos e a otimização do armazenamento.

#### 4.1.3 Biodegradabilidade

Para resíduos orgânicos com alto poder de biodegradabilidade, como esterco e restos animais, a tecnologia de recuperação energética indicada é a digestão anaeróbia, uma vez que o poder calorífico deste tipo de resíduo se encontra na produção de gás metano (APPELS *et al.*, 2011). Por outro lado, resíduos orgânicos e inorgânicos com alto poder de queima direta, como restos de madeira e pneus inutilizáveis, são indicados para as tecnologias de transformação térmica.

#### 4.1.4 Determinação da Tecnologia de Recuperação Energética

A determinação da tecnologia está relacionada principalmente às características físico-químicas dos resíduos e ao processo de preparação da matéria-prima. Seguem os principais aspectos que devem ser considerados nesta definição:

- **Poder calorífico disponível:** trata-se da taxa de energia calorífica disponível para o aproveitamento energético. Este fator, diretamente ligado ao PCI e ao volume dos resíduos produzidos e preparados, informações que determinam a potência da planta de recuperação energética.
- **Composição dos Resíduos:** as tecnologias de gaseificação e pirólise necessitam de insumos com composição físico-química constante, pois tratam-se de processos que necessitam alto grau de controle (BELGIORNO

*et al.*, 2003). Portanto, para resíduos com composições heterogêneas é recomendada a tecnologia de incineração.

- **Disponibilidade de resíduos:** a garantia de geração energética em uma central de recuperação energética tem relação com a disponibilidade contínua de insumos. Problemas de disponibilidade causam paradas e, por consequência, redução da eficiência da central.
- **Logística:** as tecnologias de pirólise e gaseificação proporcionam as vantagens de produzirem produtos passíveis de armazenamento e transporte. Logo, estas tecnologias podem realizar a conversão energética distante do ponto de conversão.

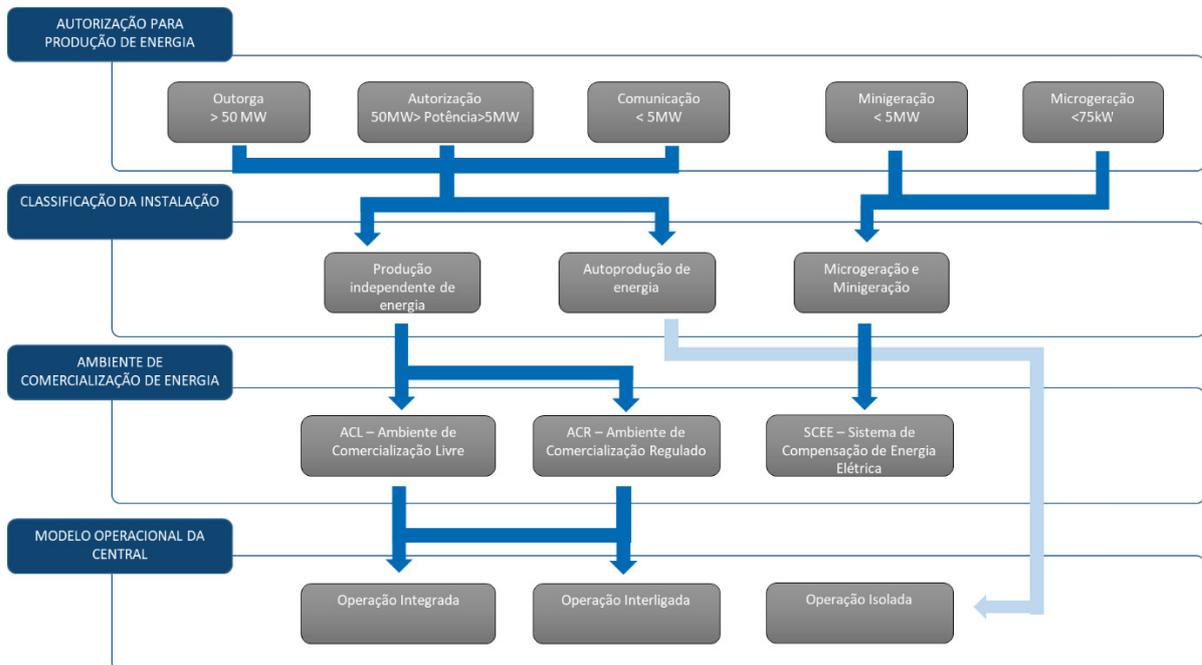
#### 4.1.5 Determinação da Potência

A determinação da potência da planta de recuperação energética de resíduos, geralmente, é feita através de modelagem em softwares de simulação. Esta modelagem considera a tecnologia de conversão selecionada e as características dos insumos (PCI, disponibilidade, humidade, entre outros).

## 4.2 PROCESSO PARA ORIENTAÇÃO SOBRE PROCESSOS REGULATÓRIOS

Considerando os aspectos regulatórios para instalação, comercialização de energia e operacionais, aplicados a uma central de recuperação energética de resíduos sólidos, o fluxograma de trabalho da Figura 24, juntamente com as orientações e esclarecimentos, visam suportar as decisões dos interessados em implantar uma central deste tipo. Esse fluxograma apresenta as áreas de interesse fundamentais para implantação de uma central.

FIGURA 24 - FLUXOGRAMA REGULATÓRIO



FONTE: O autor (2022).

#### 4.2.1 Autorização para Produção de Energia Elétrica

A capacidade energética da central é fato determinante para definição do tipo de autorização governamental necessário para produção de energia no Brasil. Seguem descrições dos tipos de autorização que o empreendimento deve obter de acordo com sua capacidade de geração:

- **Capacidade superior a 50 MW:** são objetos de concessão mediante a licitação com prazo máximo de 35 anos. (BRASIL, 1995).
- **Capacidade entre 5 MW e 50 MW:** este tipo de central é objeto de autorização do governo federal. Salientasse que a obtenção da autorização é mais flexível do que de uma concessão. (ANEEL, 2020).
- **Capacidade igual ou inferior a 5.000 kW e superior a 75 kW:** devem apresentar um comunicado ao poder concedente. Nesta faixa de potência, a central pode enquadrar-se como uma central de minigeração distribuída (BRASIL, 2022).
- **Capacidade igual ou inferior 75 kW:** centrais com esta capacidade devem apenas apresentar um comunicado e enquadram-se como microgeração distribuída. (BRASIL, 2022).

#### 4.2.2 Classificação da Instalação da Unidade

Os objetivos do negócio suportam a decisão como qual tipo de agente será classificada a unidade de geração:

- **Produtores independentes de energia elétrica:** produtor que pretende comercializar a energia elétrica que produz ou parte dela. (BRASIL, 2004).
- **Autoprodutor de energia elétrica:** trata-se do consumidor que investe na geração da sua própria energia elétrica, atividade não relacionada ao seu negócio. (ANEEL, 2015a).
- **Minigeração e microgeração distribuída:** produtor que pretende utilizar a energia elétrica produzida para compensar a energia elétrica consumida, utilizando o mesmo sistema elétrico aplicado para o consumo de energia. (BRASIL, 2022).

#### 4.2.3 Ambientes de Comercialização de Energia

Os produtores independentes de energia podem comercializar a energia produzida pela central de recuperação energética no Ambiente de Comercialização Livre (ACL) ou no Ambiente de Comercialização Regulado (ACR). Por outro lado, as centrais que se enquadram como minigeração e microgeração distribuída estão sujeitas ao Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Esses enquadramentos suportam a definição das receitas atreladas aos riscos que cada tipo de mercado apresenta, conforme esclarecido abaixo:

- **Ambiente de Comercialização Regulado:** nesse ambiente os geradores comercializam a energia em leilões geridos pelo governo federal, ou seja, não permite negociação entre o vendedor e comprador de energia. (BRASIL, 2004).
- **Ambiente de Comercialização Livre:** nesse ambiente, vendedores de energia podem comercializar energia diretamente com grandes consumidores (BRASIL, 2004).
- **Sistema de Compensação de Energia Elétrica:** esse sistema é aplicado na minigeração e microgeração distribuída, no qual, a energia elétrica produzida é injetada na rede da distribuidora onde está instalada e cedida

a título de empréstimo gratuito, sendo, futuramente, compensada com o consumo de energia elétrica (BRASIL, 2022).

#### 4.2.4 Modelo Operacional da Central

A produção de energia pode ser coordenada pela própria central ou pelo governo federal através do ONS. Segue resumo dos modelos operacionais possíveis para uma usina de recuperação energética de resíduos (BARJA, 2006):

- **Operação isolada:** a central opera desconectada de qualquer sistema externo. Esse tipo de operação acontece quando o gerador pretende produzir a energia para próprio consumo.
- **Operação interligada:** a central de geração de energia opera conectada ao Sistema Interligado Nacional, mas o despacho, ou a coordenação de produção, é feito pela própria central.
- **Operação integrada:** ocorre quando um empreendimento de geração é conectado ao SIN e o ONS define a programação de geração. O ONS considera, para o despacho integrado, as centrais geradoras com disponibilidade mínima de 30 MW.

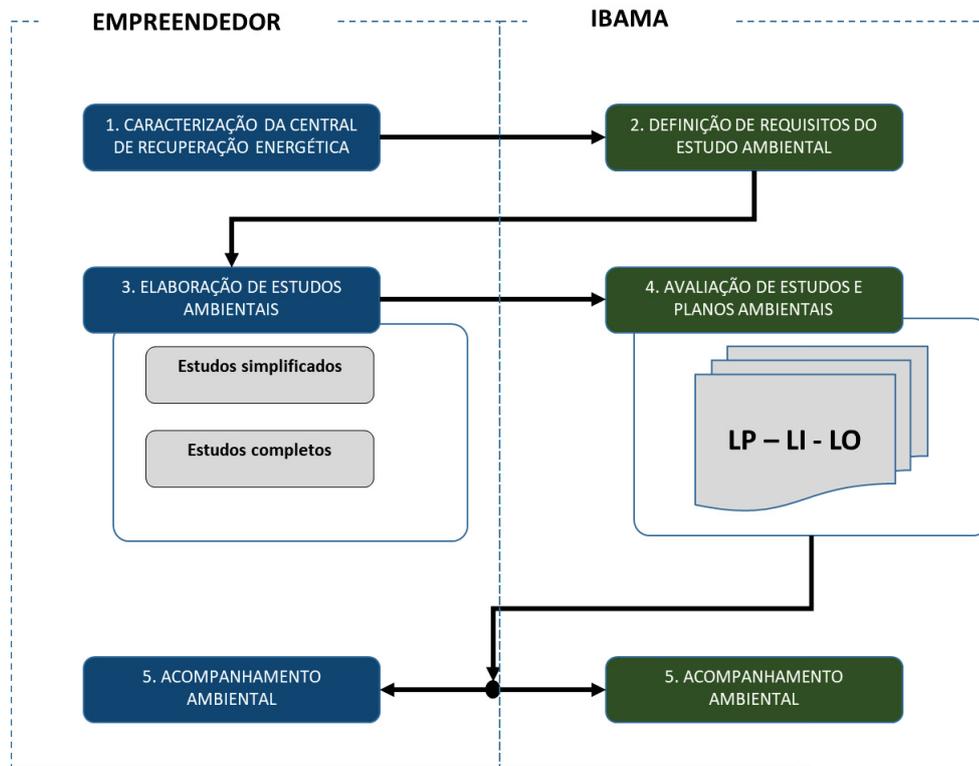
#### 4.3 GUIA PARA LICENCIAMENTO AMBIENTAL DE UMA CENTRAL DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS

O objetivo do licenciamento ambiental no Brasil, sob responsabilidade do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, é compatibilizar o desenvolvimento econômico-social com um meio ambiente ecologicamente equilibrado (IBAMA, 2021). Portanto, a construção, instalação, ampliação e o funcionamento de uma central de recuperação energética de resíduos sólidos, sendo um empreendimento potencialmente poluidor ou capaz, sob alguma forma, de causar degradação ambiental, dependerá de prévio licenciamento. Tal licenciamento é de responsabilidade do IBAMA, mas pode ser delegado a instituições estaduais, fato que promove diversidade entre os processos de licenciamentos em cada um dos estados brasileiros.

Dessa forma, é fundamental conhecer as etapas para obtenção das licenças aplicáveis ao tipo de empreendimento de estudo. Para isso, o fluxograma ambiental,

apresentado na Figura 25, demonstra a sequência das etapas e suas respectivas descrições (IBAMA, 2022).

FIGURA 25 - FLUXOGRAMA AMBIENTAL



FONTE: O autor (2022).

#### 4.3.1 Caracterização da Central de Recuperação Energética

O processo de licenciamento para cada fase de implementação de um central de recuperação energética inicia-se através da caracterização de suas atividades. Tal caracterização é de responsabilidade do empreendedor e possui informações como: tipo da central, localização, impactos no meio biótico e impactos no meio socioeconômico.

O licenciamento completo para implantação e operação de uma central de recuperação energética contempla: Licença Prévia (LP), Licença de Instalação (LI) e Licença de Operação (LO), seguem abaixo as definições de cada tipo de licença para o projeto (CONAMA, 1997):

- I. Licença Prévia (LP) – concedida na fase planejamento da central de recuperação energética, aprovando sua localização e concepção,

atestando a viabilidade ambiental e estabelecendo os requisitos básicos e condicionantes a serem atendidos nas próximas fases de sua implementação;

- II. Licença de Instalação (LI) – autoriza a instalação da central de recuperação energética, de acordo com as especificações constantes dos planos, programas e projetos aprovados, incluindo as medidas de controle ambiental e demais condicionantes;
- III. Licença de Operação (LO) – autoriza a operação da central, após a verificação do efetivo cumprimento do que consta das licenças anteriores, com as medidas de controle ambiental e condicionantes determinados para a operação.

#### 4.3.2 Definição dos Requisitos dos Estudos Ambientais

As informações que compõem a caracterização da central de recuperação energética subsidiam o IBAMA na definição do escopo dos estudos ambientais. Dessa forma, o IBAMA realiza o enquadramento da central quanto ao seu potencial de causar degradação ambiental, com base em critérios técnicos, legais e ambientais, bem como seu nível de risco associado para fins de definição do procedimento a ser adotado. Através da identificação dos potenciais impactos ambientais da central e os principais aspectos ambientais associados aos mesmos, os critérios e o conteúdo mínimo para a elaboração do estudo ambiental são definidos. (IBAMA, 2022).

#### 4.3.3 Elaboração dos Estudos Ambientais

O estudo ambiental tem o objetivo de apresentar a avaliação de impacto ambiental do projeto para tomadores de decisão, órgãos envolvidos e para comunidade em geral. Este documento deve fornecer para o governo uma declaração dos impactos potenciais das atividades relacionadas à instalação e operação da central, assim como, as medidas necessárias para evitar, reduzir, compensar os impactos negativos e potencializar os impactos positivos. Existem dois tipos de estudos ambientais que podem ser aplicados a centrais de recuperação energética, de acordo com o IBAMA (2022):

- I. **Estudos completos:** esse tipo de estudo é aplicado para tratamento de resíduos em temperaturas acima de 800 °C, contemplando a elaboração

de Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e seu respectivo relatório de impacto ambiental (RIMA), que abordam as prováveis alterações nas características socioeconômicas e biofísicas do meio ambiente resultantes do projeto (CONAMA, 1986).

- II. **Estudos simplificados:** esse tipo de estudo é aplicado para centrais de recuperação energética com impacto ambiental de pequeno porte; devido a menor complexidade, é classificado como Relatório Ambiental Simplificado (RAS). (CONAMA, 2001)

#### 4.3.4 Avaliação dos Estudos Ambientais

Nesta etapa, o IBAMA avalia os estudos ambientais e os demais documentos do requerimento da licença. Também podem ser analisados os resultados de vistorias técnicas e de eventuais consultas públicas, cujas conclusões subsidiam a decisão final sobre o pedido de licença da central. Com estas informações, o IBAMA delibera sobre a aprovação dos pedidos de licença. Ainda, durante essa fase do licenciamento podem ser solicitadas novas informações para subsidiar uma decisão definitiva, incluindo a complementação e revisão dos estudos ambientais ou adequação da conformidade ambiental do projeto licenciado. (IBAMA, 2022).

#### 4.3.5 Acompanhamento Ambiental

O acompanhamento ambiental acontece desde o início da instalação da central de recuperação energética para verificar o desempenho ambiental do projeto licenciado. Nessa etapa, o IBAMA realiza auditorias da implementação dos termos e condições ambientais para a instalação e operação da central de recuperação energética, monitorando os impactos ambientais do projeto e a avaliação da efetividade das medidas de mitigação, adotando-se as ações corretivas para o tratamento de não conformidades identificadas. (IBAMA, 2022).

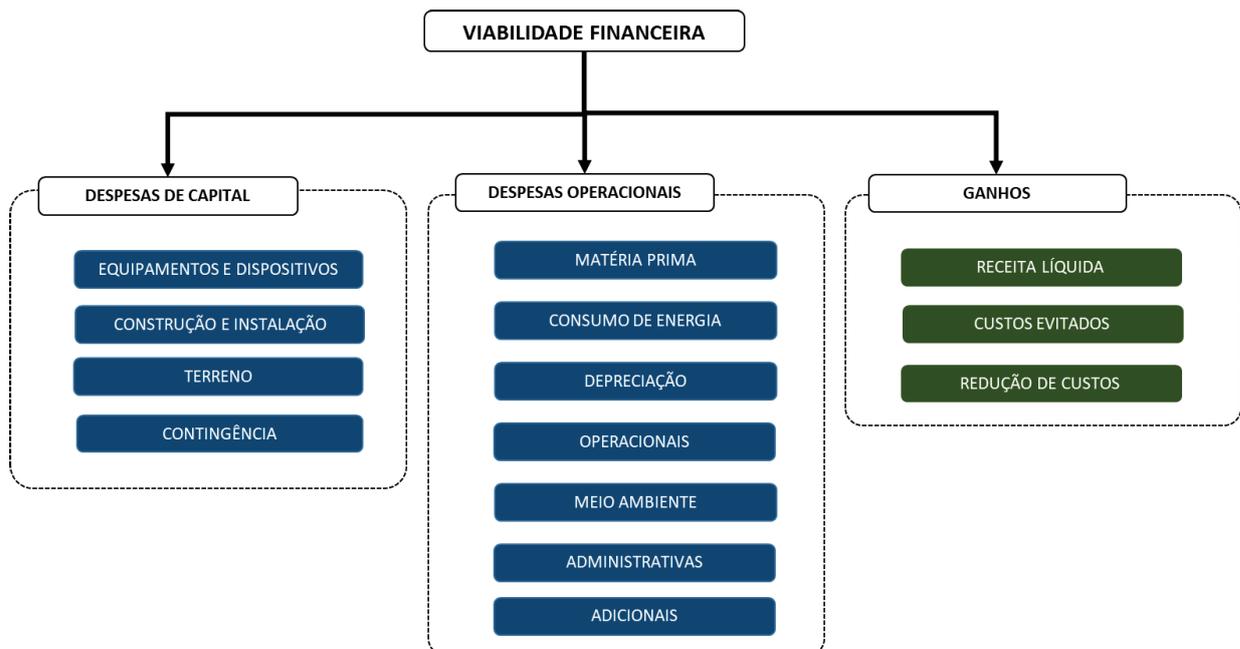
Por outro lado, o empreendedor da central deve implementar as ações estabelecidas nas licenças ambientais e, conforme a periodicidade definida pelo IBAMA, encaminhar os documentos que comprovam o atendimento dos condicionantes ambientais.

#### 4.4 GUIA PARA AVALIAÇÃO ECONÔMICA DO PROJETO

O desenvolvimento de um estudo de viabilidade financeira para um projeto de usina de recuperação energética de resíduos sólidos tem o papel de justificar o investimento financeiramente. Geralmente, a análise de viabilidade financeira de um projeto é composta pela análise dos indicadores financeiros: taxa do retorno do investimento (TIR), valor presente líquido (VPL) e tempo de retorno do investimento (*payback*).

Para o cálculo destes indicadores devem ser conhecidos, principalmente, as despesas de capital, as despesas operacionais e os ganhos financeiros do projeto (FIGURA 26).

FIGURA 26 - COMPOSIÇÃO DA VIABILIDADE FINANCEIRA



FONTE: O autor (2022).

##### 4.4.1 Despesas de Capital

As despesas de capital são os investimentos realizados em equipamentos e instalações no projeto da central de recuperação energética para produção de receitas financeiras, sendo que as mais relevantes são:

- Equipamentos e dispositivos: turbinas, sistema de recuperação energética, gerador, sistema de abastecimento, painéis elétricos e sistemas para tratamento do gás produzido.
- Construção e instalação: construção de bases e fundações, construção de armazéns, instalação de máquinas e equipamentos e instalação de linhas de transmissão.
- Terreno: aquisição da área onde será instalada a usina de recuperação energética de resíduos.
- Contingência: valor reservado para investimentos não previstos no planejamento do projeto.

#### 4.4.2 Despesas Operacionais

Despesas operacionais referem-se aos investimentos relacionados às despesas de manutenção e gastos recorrentes para operação da central de recuperação energética. Segue exemplos de despesas operacionais:

- Custos com pessoas;
- Consumo de energia elétrica;
- Depreciação;
- Despesas administrativas;
- Despesas com manutenções recorrentes.

#### 4.4.3 Ganhos

Os ganhos financeiros de um projeto de energia estão associados, principalmente, às receitas de comercialização de energia. Outros ganhos possíveis nesse tipo de projeto são: venda de créditos de carbono; redução do consumo de energia; redução dos custos com gerenciamento de resíduos e redução de novos investimentos

### 4.5 VALIDAÇÃO DOS PROCESSOS E GUIAS EM UM ESTUDO DE CASO

Com a finalidade de validar as ferramentas e os guias deste trabalho, os aplicaremos em um estudo de caso de uma indústria de fabricação de pneus de carros de passeio localizada no Brasil e com capacidade produtiva de 30 mil pneus por dia.

#### 4.5.1 Análise da Indústria de Estudo para Definição da Tecnologia

Considerando estas características, efetuaram-se análises para definição da tecnologia de recuperação energética e, posteriormente, o cálculo da capacidade energética da central. Segue abaixo as etapas de análise aplicando o processo desenvolvido neste trabalho no estudo de caso:

- I. **Gestão de resíduos:** a fábrica está apta para instalar um sistema de recuperação de energia de resíduos, haja vista que já realiza triagem dos resíduos produzidos em cada processo de manufatura e os armazena em espaços distintos para reduzir risco contaminação com os insumos da fábrica.
- II. **Preparação de resíduos:** para esta fábrica, é requisito um sistema de preparação composto por: triturador e sistema de separação magnético, pois os resíduos gerados possuem grande diversidade de propriedades mecânicas e, parte deles, possuem uma porção de materiais ferrosos. Como vantagem, salientasse que as instalações de manufatura de pneus possuem sistemas de condicionamento de ar para garantir baixa umidade na fábrica.
- III. **Biodegradabilidade:** a fábrica produz apenas resíduos de baixo grau de biodegradabilidade.
- IV. **Definição da tecnologia:** considerando os aspectos supracitados e que esta indústria não pretende investir em sistemas complexos de preparação para os insumos, fator que impossibilita a fabricação de insumos com propriedades físico-químicas constantes, a tecnologia indicada para esta fábrica é a incineração.

#### 4.5.2 Definição da Potência da Usina de Recuperação Energética

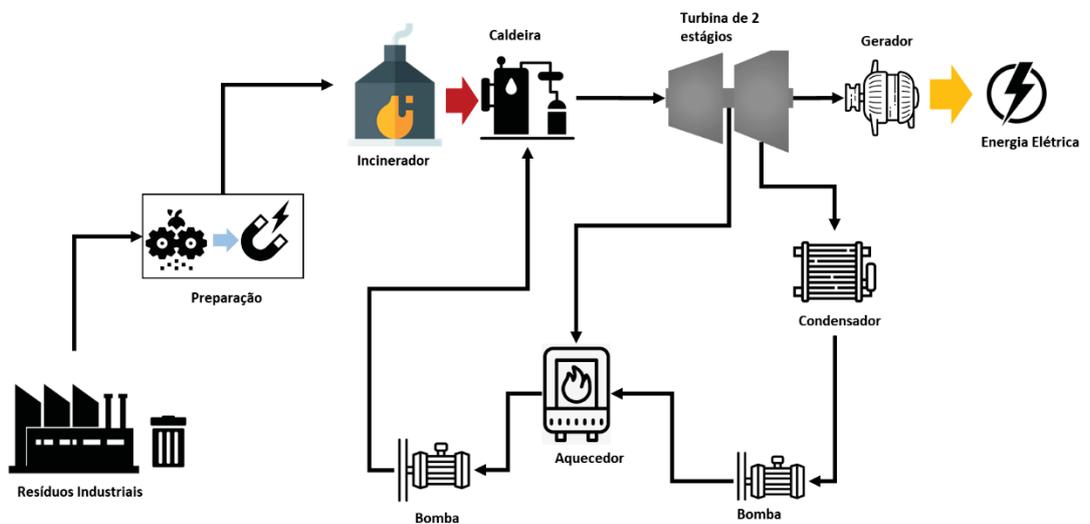
A definição da potência foi feita através modelamento de uma usina de incineração que recupera energia através de um ciclo de Rankine regenerativo (Figura 27), para isso, foi utilizado o software *Engineering Equation Solver* (EES).

No caso de estudo, primeiramente, foi levantado o volume diário de resíduos produzidos pela fábrica, com isso foi calculada uma taxa horaria de massa disponível para conversão térmica. A fábrica estudada produz cerca de 128 toneladas de resíduos por mês, este valor é equivalente a menos de 2% da massa total de 900 mil pneus fabricados por mês. Deste total de resíduos, 92% podem ser aproveitados, pois

os outros 8% são resíduos ferrosos e sem poder calorífico significativo que devem ser separados no processo. Portanto, considerando que a geração de energia acontecerá ininterruptamente, obtém-se uma taxa de resíduos disponíveis para recuperação energética igual a 164 quilogramas por hora.

Portanto, no processo do EES foi considerado a taxa de alimentação com resíduos de 0,046 kg por segundo um PCI médio igual a 33.000 kJ/kg. A potência resultante da usina é igual 371 kW.

FIGURA 27 – DIAGRAMA SIMPLIFICADO DA CENTRAL DE RECUPERAÇÃO POR INCINERAÇÃO



FONTE: O autor (2022).

Seguem outros parâmetros da simulação:

- Potência do conjunto turbina e gerador: 400 kW
- Capacidade da caldeira: 1100 kW

#### 4.5.3 Definição de Enquadramento Regulatório da Central

De acordo com o processo para enquadramento regulatório, a potência de 371kW, por ser inferior a 5MW, permite que a central seja autorizada a produzir energia através de um comunicado para ANEEL. Centrais com esta potência podem ser classificadas como minigeradores distribuídos ou como autoprodutores de energia, o primeiro destes beneficia-se do sistema de distribuição pelo qual consome energia para compensação através de créditos pela energia produzida, já o segundo,

trabalha de maneira isolada e desconectado do sistema elétrico disponível, gerando energia para cargas que desejar.

Em virtude do consumo de energia da fábrica ser muito superior a capacidade de geração da central, impossibilitando a geração de créditos de energia, será feita a opção de consumir a energia em seus processos internos, como autoprodutor, conseqüentemente, ela coletará o benefício de uma redução em seu próprio consumo de energia. Desta forma, a central não fará opção de entrar em ambientes de comercialização e terá sua operação isolada (independente do sistema elétrico nacional).

#### 4.5.4 Licenciamento Ambiental do Projeto

A geração de energia elétrica não é uma atividade relacionada ao negócio da fábrica de pneus, portanto esta atividade necessita de um processo de licenciamento completo para cada etapa do projeto (licença prévia, licença de instalação e licença de operação).

Conforme descrito neste trabalho, o licenciamento inicia-se na caracterização das atividades da central, posteriormente, devem ser elaborados estudos ambientais esclarecendo riscos e contramedidas que necessitam ser adotadas, os quais devem ser submetidos para aprovação do IBAMA. Após deliberação das licenças pelo Ibama, em caso de aprovação, os interessados devem prover o acompanhamento ambiental por auditorias e relatórios periódicos.

#### 4.5.5 Avaliação da Viabilidade Financeira do Projeto

A análise de viabilidade financeira do projeto deve ser feita através da determinação de indicadores financeiros. Para o cálculo destes indicadores deve ser projetado o fluxo financeiro do projeto, considerando investimentos, custos, ganhos e impostos, para através destes calcular: o Valor Presente Líquido (VPL); a Taxa Interna de Retorno (TIR); e o tempo de retorno do capital (*payback*).

##### 4.5.5.1 Cálculo das Despesas de Investimento

Visando simplificar o dimensionamento deste investimento, foi aplicada a Equação (07) desenvolvido por Xin-Gang *et al.* (2016).

$$I_{CAPEX\_USD} = 15.979 \cdot E^{0,82} \quad (07)$$

Onde:

- **I<sub>CAPEX\_USD</sub>**: é o investimento em dólares (US\$);
- **E**: trata-se da capacidade energética da central de incineração em MW.

Foi considerado que cada 1 dólar equivale a R\$5,15, conforme Equação (08):

$$I_{CAPEX\_BRL} = (5,15) \cdot I_{CAPEX\_USD} \quad (08)$$

Na qual:

- **I<sub>CAPEX\_BRL</sub>**: é o investimento em reais (R\$). Resultando em R\$10.500.000,00.

#### 4.5.5.2 Cálculo das Despesas Operacionais

As despesas operacionais anuais são estimadas no valor de 4% do valor do capital investido, conforme Equação (09):

$$C_{OP} = (4\%) \cdot I_{CAPEX\_BRL} \quad (09)$$

Onde:

**C<sub>OP</sub>**: são os custos operacionais totais anuais da planta (mão de obra, manutenção, custos administrativos, etc.). Resultando em R\$417.000 por ano.

#### 4.5.5.3 Cálculo dos Ganhos do Projeto

Os custos evitados com a redução no consumo de energia elétrica e a redução dos gastos com gerenciamento de resíduos podem ser considerados como ganhos do projeto.

Para calcular a energia elétrica produzida pela central de recuperação energética se aplica a EQUAÇÃO (10):

$$P_{MWh\_ANO} = E \cdot K_{DISP} \cdot 8760 \quad (10)$$

Onde:

- **P<sub>MWh\_ANO</sub>**: é o volume da energia produzida pela central em um ano. Resultando em cerca de 31MWh por ano;
- **8760**: número de horas no ano;
- **K<sub>DISP</sub>**: é o fator de capacidade da central. Considerada 95%.
- **E**: trata-se da capacidade energética da central de incineração em MW.

Portanto, o ganho financeiro da economia na aquisição de energia é o produto do volume da energia produzida e o preço do horário da energia, conforme a EQUAÇÃO (11). Neste estudo será considerado o preço de R\$ 253 por kWh.

$$G_{R\$\_ANO} = P_{MWh\_ANO} \cdot 253 \quad (11)$$

Onde:

- **G<sub>R\$\_ANO</sub>**: ganho anual com a redução de consumo de energia. Resultando 781 mil reais anuais;
- **253**: preço em reais do MWh, determinado pelo autor.

A redução de custos com gestão de resíduos é estimada em cerca de R\$ 1,2 milhão de reais anuais. Valor definido em contrato pago para empresa especialista em destinar os resíduos de maneira ambientalmente correta.

#### 4.5.5.4 Fluxo Financeiro do Projeto e Cálculo dos Indicadores

Por fim, o cálculo dos indicadores financeiros do projeto, é elaborado através da projeção do fluxo financeiro do projeto (Tabela 03), considerando os investimentos, ganhos e custos estimados para central.

TABELA 03 - FLUXO FINANCEIRO DO PROJETO (VALORES EM MIL REAIS).

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	...	Ano 20
<b>(-) Aquisições</b>	<b>(10.426)</b>							
<b>(+) Ganhos</b>	-	<b>1.981</b>						
(+) <i>Energia Elétrica</i>	-	781	781	781	781	781	781	781
(+) <i>Gerenciamento de resíduos</i>	-	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200	1.200
<b>(-) Custos do Projeto</b>	-	<b>(417)</b>						
<b>Ganhos - Custos</b>	-	<b>3.545</b>						
(-) <i>Depreciação</i>	-	(521)	(521)	(521)	(521)	(521)	(521)	(521)
(-) <i>IR</i>	-	(355)	(355)	(355)	(355)	(355)	(355)	(355)
<b>Fluxo de Caixa Operacional</b>	-	<b>1.210</b>						
<b>Fluxo de Caixa de Investimentos</b>	<b>(10.426)</b>	-	-	-	-	-	-	-
<b>Fluxo de Caixa Livre</b>	<b>(10.426)</b>	<b>1.210</b>						

FONTE: O autor (2022).

Outras premissas devem ser adotadas para cálculo dos indicadores financeiros do projeto, como:

- Vida útil igual a 20 anos. Através desta informação foi calculada a depreciação do projeto e foi determinado o tempo de estudo do fluxo financeiro.
- Imposto de renda (IR) igual a uma taxa de 34% das receitas menos os custos e depreciações do projeto.
- Taxa mínima de atratividade igual a 10%.

Através a projeção alcança-se os seguintes resultados:

- TIR: 10%
- VPL: - R\$300.000,00 (negativo)
- Payback: igual a 8 anos (sem considerar desvalorização monetária no tempo).

Através destes resultados, pode-se concluir que investir em um projeto de recuperação energética em uma indústria de pneus com as características apresentadas, é financeiramente inviável por apresentar um VPL negativo.

## 5 CONCLUSÃO

Esta dissertação teve como objetivo a apresentação de processos e guias, para compreensão das principais tecnologias de conversão resíduos sólidos industriais em energia elétrica, abrangendo as implicações legais e aspectos financeiros, relacionados à implantação de um projeto deste gênero no Brasil. Visando atender este propósito, o trabalho foi dividido de acordo com seus objetivos específicos, descritos a seguir com suas respectivas conclusões.

O primeiro objetivo específico foi apresentado um processo para suportar a seleção da tecnologia de recuperação energética para resíduos de uma indústria. Este alvo foi alcançado na sessão 4.1, deste trabalho, através da construção de um fluxograma com as descrições dos aspectos que o compõem. Tal processo, compreende os requisitos para recuperação energética de resíduos, assim como, as exigências tecnológicas específicas das tecnologias de incineração, pirólise gaseificação e digestão anaeróbia. O processo parte da análise de compreensão de como a indústria interessada gerencia os resíduos gerados em sua manufatura. Posteriormente, apresentam os processos de preparação dos resíduos, para que, finalmente, com análises das propriedades físicas e químicas dos resíduos e dos objetivos do negócio, seja definida a melhor tecnologia de recuperação energética.

O próximo objetivo específico foi a apresentação de um processo para suportar a regulamentação da instalação, comercialização e operação de uma usina de recuperação energética. Objetivo atingido na sessão 4.2 desta dissertação, por intermédio de fluxograma com descrições que considera os requisitos regulatórios nacionais para implantação, operação e comercialização de energia elétrica.

O terceiro objetivo específico, trata-se do desenvolvimento de guias para suporte no processo de licenciamento ambiental e análise viabilidade financeira, o qual foi realizado nas sessões 4.3 e 4.4 da dissertação. O processo de licenciamento, necessário em vista de uma usina de conversão de resíduos possuir atividades potencialmente poluidoras, inicia, conforme apresentado no guia, na etapa de caracterização do projeto e conclui na etapa de acompanhamento, o qual acontece durante toda operação do projeto. Já a viabilidade financeira, para cálculo dos indicadores de viabilidade (TIR, VPL e PAYBACK), conforme mostra o guia, necessita fundamentalmente, do levantamento das despesas de capital, despesas operacionais e ganhos do projeto.

Por fim, o último objetivo específico, realizado na sessão 4.5, foi aplicar os processos e guias desenvolvidos em um estudo de caso de uma indústria no Brasil. Para isso, foram coletadas informações relativas aos resíduos produzidos por uma fábrica de pneus de carro de passeio no Brasil. Através das aplicações dos processos e guias foram feitas as seguintes definições: tecnologia de incineração foi selecionada para recuperar energia dos resíduos produzidos; central de recuperação energética seria enquadrada como autoprodutora de energia; o processo de licenciamento seria necessário e; o projeto seria financeiramente inviável, pois resultaria em um VPL negativo.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Visando à continuidade de estudos da recuperação energética de resíduos industriais no Brasil, são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Aplicação dos processos e guias desenvolvidos neste trabalho em diversas indústrias para revisar os mesmos através de base de dados;
- Aplicação dos processos e guias desenvolvidos, em um grupo de indústrias, visando verificar a viabilidade de um projeto com maior capacidade energética;
- Desenvolver estudo das soluções para limpeza das emissões produzidas por projetos de recuperação energética de resíduos.
- Desenvolver análises de sensibilidade financeira para cada tecnologia de recuperação energética visando identificar quais os requisitos financeiros para desenvolvimento de um projeto deste tipo.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Caderno ANEEL 5:** acesso e uso dos sistemas de transmissão e de distribuição. Brasília: ANEEL, 2005. (Cadernos Temáticos ANEEL). Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br>. Acesso em: 01 maio 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Manual de Controle Patrimonial do Setor Elétrico – MCPSE.** Revisão 2. Aprovada pela Resolução Normativa nº 674/2015, de 11 de agosto de 2015a. Disponível em: [https://git.aneel.gov.br/publico/centralconteudo/-/raw/main/manuaisinstrucoes/infoecofinanc/20220204\\_MCPSE\\_texto\\_definitivo\\_resol\\_674\\_2015.pdf](https://git.aneel.gov.br/publico/centralconteudo/-/raw/main/manuaisinstrucoes/infoecofinanc/20220204_MCPSE_texto_definitivo_resol_674_2015.pdf). Acesso em: 01 maio 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Micro e minigeração distribuída:** sistema de compensação de energia elétrica. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2016a. (Cadernos Temáticos ANEEL). Disponível em: <https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/08/Caderno-tematico-Micro-e-Minigeracao-Distribuida-2-edicao.pdf>. Acesso em: 01 maio de 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.** Módulo 1 - Introdução. Revisão 9. Aprovada pela Resolução Normativa nº 687/2015b. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2015687\\_prodist\\_modulo\\_1\\_v9.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2015687_prodist_modulo_1_v9.pdf). Acesso em: 01 maio 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST.** Módulo 3 - Acesso ao Sistema de Distribuição. Revisão 7. Aprovada pela Resolução Normativa nº 724/2016b. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2016724\\_prodist\\_modulo\\_3\\_v7.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2016724_prodist_modulo_3_v7.pdf). Acesso em: 01 maio 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Regras dos Serviços de Transmissão de Energia Elétrica.** Módulo 1 - Glossário. Revisão 1. Aprovada pela Resolução Normativa nº 1.005/2022. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren20221005\\_2.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren20221005_2.pdf). Acesso em: 01 maio. 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Regulação do Setor Elétrico.** 22 fev. 2017. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/web/guest/regulacao-do-setor-eletrico>. Acesso em: 01 maio 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Regulação dos Serviços de Distribuição.** 06 set. 2018. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/regulacao-da-distribuicao>. Acesso em: 01 maio 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 67, de 8 de junho de 2004. Estabelece critérios para a composição da Rede Básica do Sistema Interligado Nacional, e dá outras providências. **Diário Oficial da União,**

Brasília, DF, 11 jun. 2004. Seção 1, p. 82. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2004067.pdf>. Acesso em: 01 maio 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 583, de 22 de outubro de 2013. Estabelece os procedimentos e condições para obtenção e manutenção da situação operacional e definição de potência instalada e líquida de empreendimento de geração de energia elétrica. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 05 nov. 2013. Seção 1, p. 57. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2013583.pdf>. Acesso em: 01 maio 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 622, de 19 de agosto de 2014. Dispõe sobre as garantias financeiras e a efetivação de registros de contratos de compra e venda de energia elétrica, associados à comercialização no âmbito da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica; altera as Resoluções Normativas ANEEL 453, de 18.10.2011, e 109, de 26.10.2004; e revoga as Resoluções Normativas ANEEL 437, 24.05.2011, e 531, de 21.12.2012. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 ago. 2014. Seção 1, p. 65. Disponível em: <https://biblioteca.aneel.gov.br/acervo/detalhe/157881>. Acesso em: 01 maio 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 876, de 10 de março de 2020. Estabelece os requisitos e procedimentos necessários à obtenção de outorga de autorização para exploração e à alteração da capacidade instalada de centrais geradoras Eólicas, Fotovoltaicas, Termelétricas e outras fontes alternativas e à comunicação de implantação de centrais geradoras com capacidade instalada reduzida. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 13 mar. 2020. Seção 1, p. 46. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-normativa-n-876-de-10-de-marco-de-2020-247799577>. Acesso em: 01 maio 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica; revoga as Resoluções Normativas ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010; nº 470, de 13 de dezembro de 2011; nº 901, de 8 de dezembro de 2020 e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 20 dez. 2021. Seção 1, p. 206. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-normativa-aneel-n-1.000-de-7-de-dezembro-de-2021-368359651>. Acesso em: 10 jan. 2022.

ALI, G.; NITIVATTANANON, V.; MOLLA, N. A. *et al.* Selection of appropriate technology for solid waste management: A case of Thammasat hospital, Thailand. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 64, p. 251-254, Apr. 2010.

AL-SALEM, S. M.; ANTELAVA, A.; CONSTANTINOU, A.; MANOS, G.; DUTTA, A. A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). **Journal of Environmental Management**, v. 197, n. 1408, p. 177-198, 2017.

AMARAL, L. O mercado e a sociedade. **Relações Internacionais (R:I)**, n. 49, p. 123-127, 2016.

APPELS, L.; LAUWERSA, J.; DEGRÈVEA, J.; HELSENB, L.; LIEVENSC, B.; WILLEMSC, K.; VAN IMPEA, J.; DEWIL, R. Anaerobic digestion in global bio-energy

production: Potential and research challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, 2011, p. 4295-4301.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. 2021**. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021>. Acesso em: 01 fev. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10.004**: resíduos sólidos – classificação. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS COMERCIALIZADORES DE ENERGIA (ABRACEEL). **Saiba agora o que é SIN e ONS**. 7 out. 2019. Disponível em: <https://abraceel.com.br/blog/2019/10/saiba-agora-o-que-e-sin-e-ons>. Acesso em: 01 maio 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS INVESTIDORES EM AUTOPRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (ABIAPE). **História da autoprodução no Brasil**. 2. ed. Brasília: ABIAPE, 2020. Disponível em: <http://abiape.com.br/a-autoproducao>. Acesso em: 01 abr. 2021.

BARJA, G. de J. A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. 2006. 171 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Mecânicas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

BELGIORNO, V.; DE FEO, G. DE; DELLA ROCCA, C.; NAPOLI, R. M. A. Energy from gasification of solid wastes. **Waste Management**, v. 23, n. 1, p. 1-15, Feb. 2003.

BITTON, G. **Wastewater microbiology**. 3 ed. New York: Wiley-Liss Publishing, 2005. 746 p.

BRASIL. Decreto Nº 7.246, de 28 de julho de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.111, de 9 de dezembro de 2009, que dispõe sobre o serviço de energia elétrica dos sistemas isolados, as instalações de transmissão de interligações internacionais no sistema interligado nacional - SIN, e dá outras providências. **Portal da Legislação**, Brasília, DF, 28 jul. 2010a. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/decreto/D7246.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/D7246.htm). Acesso em: 01 maio 2022.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Portal da Legislação**, Brasília, DF, 28 maio 2012. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm). Acesso em: 01 maio 2022.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS); altera as Leis nºs 10.848, de 15 de março de 2004, e 9.427, de 26 de dezembro de 1996; e dá outras providências. **Portal**

**da Legislação**, Brasília, DF, 7 jan. 2022. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/L14300.htm). Acesso em: 01 maio 2022.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Portal da Legislação**, Brasília, DF, 02 set. 1981. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l6938.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm). Acesso em: 01 maio 2022.

BRASIL. Lei nº. 10.848, de 15 de março de 2004. Dispõe sobre a comercialização de energia elétrica, altera as Leis nºs 5.655, de 20 de maio de 1971, 8.631, de 4 de março de 1993, 9.074, de 7 de julho de 1995, 9.427, de 26 de dezembro de 1996, 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.648, de 27 de maio de 1998, 9.991, de 24 de julho de 2000, 10.438, de 26 de abril de 2002, e dá outras providências. **Portal da Legislação**, Brasília, DF, 16 mar. 2004. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/lei/l10.848.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/l10.848.htm). Acesso em: 01 maio 2022.

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. **Portal da Legislação**, Brasília, DF, 03 ago. 2010b. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 01 maio 2022.

BRASIL. Lei nº. 9.074, de 07 de julho de 1995. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. **Portal da Legislação**, Brasília, DF, 08 jul. 1995. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l9074cons.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9074cons.htm). Acesso em: 01 maio 2022.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. Secretaria de Pesquisa e Formação Científica. **Quarta comunicação nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2021. [https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/Comunicacao\\_Nacional/Comunicacao\\_Nacional.html](https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/Comunicacao_Nacional/Comunicacao_Nacional.html)

BRIDGWATER, A. V. Catalysis in thermal biomass conversion. **Applied Catalysis A: General**, v. 116, p. 5-47, 1994.

BRIDGWATER, A. V.; PEACOCKE, G. V. C. Fast pyrolysis processes for biomass. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 4, n. 1, p. 1-73, 2000.

BRUNNER, P. H.; RECHBERGER, H. Waste to energy: key element for sustainable waste management. **Waste Management**, v. 37, p. 3-12, March 2015.

BUEKENS, A. G.; SCHOETERS, J. G. European experience in the pyrolysis and gasification of solid wastes. **Conserv. Recycl**, v. 9, p. 253-269, 1986.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). **Adesão**. 2022a. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/mercado/adesao>. Acesso em: 01 mar. 2022.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). **Primeiros passos**: guia prático para novos agentes da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE. 2022b. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/documents/80415/919472/Folder%20primeiros%20passos%20-%20novos%20agentes%20web%20-%20sem%20linhas%2020200901.pdf/d7683ae2-cf69-a93f-45eb-b9ed7547e69e#:~:text=Atribui%C3%A7%C3%B5es%20%2D%20Entre%20as%20atribui%C3%A7%C3%B5es%20da,compra%20e%20venda%20de%20energia>. Acesso em: 01 mar. 2022.

CENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Thermodynamics**: an engineering approach. 6<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill Companies, 2011.

CHANG, Y. H.; CHEN, W. C.; CHANG, N. B. Comparative evaluation of RDF and MSW incineration. **Journal of Hazardous Materials**, v. 58, n. 1-3, p. 33-45, 1998.

CHEN, F.; SUN, H.; LIANG, X. Initial analysis on main points of generation projects by municipal wastes in feasibility study. **Renew Energy Resour**, v. 31, n. 4, p.123-128, 2013.

CHEN, Y.; CHENG, J. J.; CREAMER, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 10, p. 4044-4064, 2008.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 5. ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1997. v.5. 245 p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Recuperação energética de resíduos sólidos**: um guia para tomadores de decisão. 2019. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br>. Acesso em: 01 maio 2022.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 1, de 23 de janeiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 17 fev. 1986. Seção 1, p. 2548-2549. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=745](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=745). Acesso em: 01 maio 2022.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 237, de 22 de dezembro de 1997. Regulamenta os aspectos de licenciamento ambiental estabelecidos na Política Nacional do Meio Ambiente. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 dez. 1997. Seção 1, p. 30841-30843. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=237](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=237). Acesso em: 01 maio 2022.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 279, de 27 de junho de 2001. Estabelece procedimentos para o licenciamento ambiental simplificado de empreendimentos elétricos com pequeno potencial de impacto ambiental. **Diário Oficial da União**, 29 jun. 2001. Seção 1, p. 165-166. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=277](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=277). Acesso em: 01 maio 2022.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 313, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre o Inventário Nacional de Resíduos Sólidos Industriais. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 out. 2002b. Seção 1, p. 85-91. Disponível em:

[http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=331](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=331). Acesso em: 01 maio 2022.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 316, de 29 de outubro de 2002. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 20 out. 2002a. Seção 1, p. 92-95. Disponível em:

[http://conama.mma.gov.br/?option=com\\_sisconama&task=arquivo.download&id=334](http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=334). Acesso em: 01 maio 2022.

DE FEO, G.; BELGIORNO, V.; NAPOLI, R. M. A.; PAPALE, U. Solid Wastes Gasification. *In*: SIDISA International Symposium on Sanitary and Environmental Engineering, Trento, Italy. 2000.

DEMIRBAS, A. Biorefineries: Current activities and future developments. **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 11, p. 2782-2801, Nov. 2009.

DEMIRBAS, A. Producing bio-oil from olive cake by fast pyrolysis. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v. 30, n. 1, p. 38-44, Feb. 2008.

DEMIRBAS, A. The influence of temperature on the yields of compounds existing in bio-oils obtained from biomass samples via pyrolysis. **Fuel Processing Technology**, v. 88, n. 6, p. 591-597, 2007.

DEMIRBAS, A. Waste management, waste resource facilities and waste conversion processes. **Energy Conversion & Management**, v. 52, n. 2, p.1280-1287, 2011.

DUAN, P.; ZHANG, C.; ZHONG, H. The application and development of waste incineration-power generation technology. **Guangdong Chem Ind**, v. 7, p.111-112, 2013.

ESCAMILLA-GARCÍA, P. E.; CAMARILLO-LÓPEZ, R. H.; CARRASCO-HERNÁNDEZ, R.; FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, E.; LEGAL-HERNÁNDEZ, J. M. Technical and economic analysis of energy generation from waste incineration in Mexico. **Energy Strategy Reviews**, v. 31, 2020.

FANG, Y.-Y.; ZHOU, S.-H.; YAN, L.-J. Municipal domestic waste incineration technology and application. **Energy Conserv Technol**, v. 28, p.76-80, 2010.

FRONDIZI, I. O mecanismo de desenvolvimento limpo. **Nucleus Animalium**, v. 1, n. 2, p. 1-136, 2009.

GARG, A.; SMITH, R.; HILL, D.; SIMMS, N.; POLLARD, S. Wastes as cofuels: The policy framework for solid recovered fuel (SRF) in Europe, with UK implications. **Environmental Science & Technology**, v. 41, n. 14, p. 4868-4874, 2007.

GODSWILL, A. C.; SOMTOCHUKWU, I. V. Industrial Waste Management: Brief Survey And Advice To Cottage, Small And Medium Scale Industries In Uganda. **International Journal of Advanced Academic Research**, v. 3, n. 1, Jan. 2017.

GONÇALVES, C. K. **Pirólise e combustão de resíduos plásticos**. 2007. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

GOUVEIA, N. Análise espacial dos riscos à saúde associados à incineração de resíduos sólidos: avaliação preliminar. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v. 13, n. 1, p. 3-10, 2010.

HAUSCHILD, T.; BASEGIO, T. M.; BENDER, F. L.; BERGMANN, C. P. *et al.* Produção de óleo por meio de pirólise catalítica. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS CONEPETRO - CONEPETRO - EDIÇÃO DIGITAL, 4., 2021,

HENRIQUES, R. M. **Potencial para geração de energia elétrica no Brasil com resíduos de biomassa através da gaseificação**. 2009. 207 p. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

HERNANDEZ-ATONAL, F. D.; RYU, C.; SHARIFI, V. N.; SWITHENBANK, J. Combustion of refuse-derived fuel in a fluidised bed. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 1-2, p. 627-635, 2007.

HIGMAN, C.; BURGT, M. van der. **Gasification**. USA: Elsevier, 2003. ISBN 0–7506–707–4.2003.

HOGNON, C.; DUPONT, C.; GRATEAU, M.; DELRUE, F. Comparison of steam gasification reactivity of algal and lignocellulosic biomass: Influence of inorganic elements. **Bioresource Technology**, v. 164, p. 347-353, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Etapas do Licenciamento Ambiental Federal**. 03 mar. 2022. <http://www.ibama.gov.br/laf/procedimentos-servicos/etapas-do-licenciamento-ambiental-federal>. Acesso em: 01 maio 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Sobre o Licenciamento Ambiental Federal**. 10 mar. 2021. <http://www.ibama.gov.br/laf/sobre-o-licenciamento-ambiental-federal#quais-empreendimentos-atividades>. Acesso em: 01 maio 2022.

INSTITUTO VIRTUAL INTERNACIONAL DE MUDANÇAS GLOBAIS - IVIG. Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia da UFRJ - COPPE. **Rotas tecnológicas para aproveitamento energético dos RSU**. Rio de Janeiro: COPPE, 2005. 237 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability**. MCCARTHY, J. J.; CANZIANI, O. F.;

LEARY, N. A.; DOKKEN, D. J.; WHITE, K. S. (Ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

JARA, E. R. P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 1989. Comunicação Técnica 1797.

JONES, J. C. **Thermal processing of waste**. [S.l.]: Jones & Ventus Publishing ApS, 2010. ISBN 978-87-7681-590-5.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 6. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011. 1050 p. ISBN 978-85-7022-169-8.

JOUHARA, H.; CZAJCZYŃSKA, D.; GHAZAL, H. *et al.* Municipal waste management systems for domestic use. **Energy**, v. 139, p. 485-506, 2017.

JUNIPER. **Pyrolysis & Gasification of Waste**. Worldwide Technology & Business Review. Juniper Consultancy Services Ltd. 2000.

KALYANI, K. A.; PANDEY, K. K. Waste to energy status in India: a short review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 113-120, March 2014.

KATYAL, S. Effect of carbonization temperature on combustion reactivity of bagasse char. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects**, v. 29, n. 16, p. 1477-1485, Oct. 2007.

KAZA, S.; YAO, L. C.; BHADA-TATA, P.; VAN WOERDEN, F. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington, DC: World Bank, 2018.

KELLEHER, B. P.; LEAHY, J. J.; HENIHAN, A. M. *et al.* Advances in poultry litter disposal technology - A review. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 1, p. 27-36, 2002.

KILKOVSKY, B.; STEHLIK, P.; JEGLA, Z.; TOVAZHNYANSKY, L. L.; ARSENYEVA, O.; KAPUSTENKO, P. O. Heat exchangers for energy recovery in waste and biomass to energy technologies-I. Energy recovery from flue gas. **Appl Therm Eng**, v. 64, p. 213-223, 2014.

KIMURA, L. M. **Uma contribuição à pirólise de biomassa**: avaliação de alguns resíduos da agroindústria como fonte de energia alternativa. 2009. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

KOMILIS, D.; KISSAS, K.; SYMEONIDIS, A. Effect of organic matter and moisture on the calorific value of solid wastes: An update of the Tanner diagram. **Waste Management**, v. 34, n. 2, p. 249-255, 2014.

KOTHARI, R.; TYAGI, V. V.; PATHAK, A. Waste-to-energy: a way from renewable energy sources to sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 3164-3170, 2010

KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste. **Waste Management**, v. 69, p. 407-422, Nov. 2017.

LAVAE, M. S. **Waste to Energy (WTE):** conventional and plasma-assisted gasification experimental and modeling studies. 2013. 134 f. Thesis (Master of Applied Science in Mechanical Engineering) - University of Waterloo, Canada, 2013.

LIMA, J. D.; SCHEITT, L. C.; BOSCHI, T. de F.; SILVA, N. J. da; MEIRA, A. A. de; DIAS, G. H. Propostas de ajuste no cálculo do *payback* de projetos de investimentos financiados. **Custos e @gronegocio**. v. 9, n. 4, 2013.

LIU, J. I.; PAODE, R. D.; HOLSEN, T. M. Modeling the Energy Content of Municipal Solid Waste Using Multiple Regression Analysis. **Journal of the Air and Waste Management Association**, v. 46, n. 7, p. 650-656, 1996.

LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; CORTI, A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. **Waste Manag**, v. 37, p. 26-44, 2015.

LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.; ÁNGEL, J. D. M.; LEITE, M. A. H.; ROCHA, M. H.; SALES, C. A. V. B.; MENDOZA, M. A. G.; CORAL, D. S. O. Gaseificação e pirólise para conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. *In*: LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. (Ed.). **Biocombustíveis**. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. v. 1, cap. 6, p. 411-498.

MARGALLO, M.; ALDACO, R.; IRABIEN, A. *et al.* Life cycle assessment modelling of waste-to-energy incineration in Spain and Portugal. **Waste Management and Research**, v. 32, n. 6, p. 492-499, 2014.

MARTÍNEZ, J. D.; VESES, A.; MASTRAL, A. M. *et al.* Co-pyrolysis of biomass with waste tyres: Upgrading of liquid bio-fuel. **Fuel Processing Technology**, v. 119, p. 263-271, 2014.

MEIER, D.; BELD, B. van de; BRIDGWATER, A. V. *et al.* State-of-the-art of fast pyrolysis in IEA bioenergy member countries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 20, p. 619-641, 2013.

METCALF, E.; EDDY, M. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003. 1.820 p.

METCALFE, J. S.; FOSTER, J. Introduction and overview. *In*: METCALFE, J. S.; FOSTER, J. (Ed.). **Evolution and economic complexity**. Cheltenham, UK; Northampton, MA, USA: Edward Elgar Publishing, 2004. p. ix-xix.

MILARÉ, É.; BENJAMIN, A. H. V. **Estudo prévio de impacto ambiental: teoria, prática e legislação**. São Paulo: Editora dos Tribunais, 1993.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Agenda Nacional de Energia Elétrica. **Central Geradora Termelétrica (UTE)**. 05 abr. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/manuais-modelos-e>

instrucoes/geracao/registro-autorizacao-e-concessao-de-empresendimentos-de-geracao/ute. Acesso em: 01 maio 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Balço Energético Nacional 2021**: ano base 2020. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 01 maio 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Portaria nº 514, de 27 de dezembro de 2018. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 28 dez. 2018. Seção 1, p. 443. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-514-de-27-de-dezembro-de-2018-57218754>. Acesso em: 01 maio 2022.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Plano Nacional de Resíduos Sólidos: Planares** [recurso eletrônico]. Brasília, DF: MMA, 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano\\_nacional\\_de\\_residuos\\_solidos-1.pdf](https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos-1.pdf). Acesso em: 01 maio 2022.

MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. **Energy and Fuels**, v. 20, n. 3, p. 848-889, May 2006.

MOHSENI-BANDPEI, A.; MAJLESI, M.; RAFIEE, M. *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) formation during the fast pyrolysis of hazardous health-care waste. **Chemosphere**, v. 227, p. 277-288, 2019.

MØLLER, H. B.; SOMMER, S. G.; AHRING, B. K. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. **Biomass and Bioenergy**, v. 26, n. 5, p. 485-495, 2004.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. 5<sup>th</sup> ed. San Francisco, CA: John Wiley & Sons, 2006.

MORIARTY, K. **Feasibility Study of Anaerobic Digestion of Food Waste in St. Bernard, Louisiana**: A Study Prepared in Partnership with the Environmental Protection Agency for the RE-Powering America's Land Initiative: Siting Renewable Energy on Potentially Contaminated Land and Mine Sites. NREL, Jan. 2013.

MUHLEN, H. J.; WANZL, W.; VAN HEEK, K. H. Characterization of carbon containing materials with respect to pyrolysis and gasification. *In*: EEC Conference on Pyrolysis and Gasification. **Proceedings**. London: Ferrero *et al.*; Elsevier: 1989.

MUTZ, D.; HENGEVOSS, D.; HUGI, C. *et al.* **Waste-to-Energy options in municipal solid waste management**: a guide for decision makers in developing and emerging countries. Bonn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2017.

NÁSNER, A. M. L. **Modelagem de uma planta piloto de gaseificação de Combustível Derivado de Resíduos (CDR) em um sistema integrado a motor ciclo Otto, utilizando o software Aspen Plus™**. 2015. 140 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia de Energia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá - Unifei, Itajubá, 2015.

NIESSEN, W. R.; MARKES, C. H.; SOMMERLAD, R. E. **Evaluation of Gasification and Novel Thermal Processes for the Treatment of Municipal Solid Waste**. NREL, Aug. 1996. Report NREL/TP-430-21612. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/fy96/21612.pdf>. Acesso em: 01 maio 2022.

NOGUEIRA, Y. C. T. de. **Viabilidade técnica e econômica de usinas Waste-to-Energy**. 2015. 85 f. Projeto (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Glossário**. © ONS 2022a. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/conhecimento/glossario>. Acesso em: 01 maio 2022.

PARKIN, G. F.; MILLER, S. W. Response of methane fermentation to continuous addition of selected industrial toxicants. *In: Purdue Industrial Waste Conference, West Lafayette, Proceedings. Ind.*, 37., 1983.

PEREIRA, W. A.; ALMEIDA, L. da S. **Método manual para cálculo da taxa interna de retorno**. 2015. Disponível em <https://home.ufam.edu.br/andersonlfc/Macrol/MetodoManualTIR.pdf>. Acesso em: 01 maio 2022.

QAZI, W. A.; ABUSHAMMALA, M. F. M.; AZAM, M.-H. *et al.* Waste-to-energy technologies: a literature review. **Journal of Solid Waste Technology and Management**, v. 44, n. 4, p. 387-409, Nov. 2018.

QUAAK, P.; KNOEF, H.; STASSEN, H. **Energy from biomass**: A review of combustion and gasification technologies. March 1999. World Bank technical paper no. 422. Energy series.

REGO, E. E. **Proposta de aperfeiçoamento da metodologia dos leilões de comercialização de energia elétrica no ambiente regulado**: aspectos conceituais, metodológicos e suas aplicações. 2012. 248 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

ROCHA, M. T. **Aquecimento global e o mercado de carbono**: uma aplicação do modelo CERT. 2003. 196 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

RUSHTON, L. Health hazards and waste management. **British Medical Bulletin**, v. 68, p. 183-197, 2003.

SANTOS, D. Valorização energética de resíduos sólidos urbanos: Materiais para caldeiras de centrais de incineração. **Ciência e Tecnologia dos Materiais**, v. 25, n. 2, p. 98-120, Dec. 2013.

SANTOS, G. G. D. dos. **Análise e perspectivas de alternativas de destinação dos resíduos sólidos urbanos**: o caso da incineração e da disposição em aterros.

2011. 193 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SIENGCHUM, T.; ISENBERG, M.; CHUANG, S. S. C. Fast pyrolysis of coconut biomass - An FTIR study. **Fuel**, v. 105, p. 559-565, 2013.

SILVA, E. R. da; TONELI, J. T. de C. L.; PALACIOS-BERECHE, R. Estimativa do potencial de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos usando modelos matemáticos de biodigestão anaeróbia e incineração. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 24, n. 2, p. 347-357, mar.-abr. 2019.

SILVA, H. W. Produção de biogás utilizando dejetos de vacas leiteiras: uma alternativa viável para redução de impactos ambientais. **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**, p. 1-16, 2018.

SILVA, M. L. da; FONTES, A. A. Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (VPL), valor anual equivalente (VAE) e valor esperado da terra. **Rev. Árvore**, v. 29, n. 6, dez. 2005.

SINGH, J.; GU, S. Biomass conversion to energy in India: a critique. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 5, p. 1367-1378, June 2010.

SINGH, R. P.; TYAGI, V. V.; ALLEN, T. *et al.* An overview for exploring the possibilities of energy generation from municipal solid waste (MSW) in Indian scenario. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4797-4808, Dec. 2011.

SPETH, K.; MURER, M.; VON RAVEN, R.; SPLIETHOFF, H. Influence of Stoichiometry and Mixing on NO<sub>x</sub> Reduction in Waste-to-Energy Plants. **Energy Fuels**, v. 30, n. 12, p. 10893–10899, Nov. 2016.

SZEWCZYK, K. W.; BUKOWSKI, J. Modelling of a batch anaerobic digestion. **Polish Journal of Chemical Technology**, v. 10, n. 1, p. 45-48, 2008.

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. **Handbook of Solid Waste Management**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 2002.

THEMELIS, N. J.; KAUFMAN, S. M. Waste in a land of plenty. **Waste Management World**, p. 23-28, Sept.-Oct. 2004.

TILLMAN, D. A.; ROSSI, A. J.; VICK, K. M. Fundamentals of municipal solid waste combustion. *In*: TILLMAN, D. A.; ROSSI, A. J.; VICK, K. M. **Incineration of municipal and hazardous solid wastes**. New York: Academic Press, 1989. p. 19-158.

TRIPATHI, M.; SAHU, J. N.; GANESAN, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 467-481, 2016.

U. S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). **International Energy Outlook 2021**. Oct. 6, 2021. Disponível em:

<https://www.eia.gov/outlooks/ieo/introduction/sub-topic-01.php>. Acesso em: 10 dez. 2021.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Convenção sobre Mudança do Clima**. 2. ed. Brasília: MCT, 2001.

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs. **2018 Revision of world urbanization prospects**. Disponível em: <https://population.un.org/wup>. Acesso em: 01 maio 2022.

VELIS, C. A. *et al.* Production and quality assurance of solid recovered fuels using mechanical-biological treatment (MBT) of waste: a comprehensive assessment. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 40, n. 12, p. 979-1105, 2010.

VERDUM, R. Meio Ambiente. *In*: IBGE. **Brasil em Números**. IBGE: 2019. v. 27, p. 455-478.

VISVANATHAN, C. Hazardous waste disposal. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 16, n. 1-4, p. 201-212, 1996.

WAGNER, L. **Waste-to-Energy (WtE) technology**. Mora Associates, July 2007. Research report. Disponível em: <http://www.moraassociates.com/reports/0707%20Waste%20to%20Energy.pdf>. Acesso em: 01 maio 2022.

WARD, A. J.; HOBBS, P. J.; HOLLIMAN, P. J.; JONES, D. L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 17, p. 7928-7940, 2008.

WENDER, I. Reactions of synthesis gas. **Fuel Processing Technology**, v. 48, p. 189-297, 1996.

WEN-LONG, X.; JING-HAO, L. Status and development prospect on municipal solid waste incineration technology in China. **Environ Prot Ind**, v.11, p. 24-29, 2007.

WEYSSENHOFF, A.; OPALA, M.; KOZIAK, S.; MELNIK, R. Characteristics and investigation of selected manufacturing defects of passenger car tires. **Transportation Research Procedia**, v. 40, p. 119-126, 2019.

XIN-GANG, Z.; GUI-WU, J.; ANG, L.; YUN, L. Technology, cost, a performance of waste-to-energy incineration industry in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 115-130, 2016.

YANG, G. C. C. Analysis of a municipal recyclable material recycling program, **Resour. Conserv. Recycl.**, v. 17, p. 47-56, 1996.

ZAIAT, M.; FORESTI, E. Method for estimating the kinetics of substrate degradation in horizontal-flow anaerobic immobilized sludge reactors. **Biotechnology Techniques**, v. 11, n. 5, p. 315-318, 1997.

ZANK, J. C. C.; BRANDT, L. S.; BEZERRA, R. C.; PEREIRA, E. N. The characteristics of biogas and evaluation of fuel substitution. **Exacta**, v. 18, n. 3, p. 502-516, 2020.

ZHANG, E. Research on waste incineration technology and its application. **Sci Technol Vis**, v. 18, p. 263-264, 2014.

ZHOU, Y.; LIU, Y.; JIANG, W. *et al.* Effects of pyrolysis temperature and addition proportions of corncob on the distribution of products and potential energy recovery during the preparation of sludge activated carbon. **Chemosphere**, v. 221, p. 175-183, 2019.