



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

FLÁVIO LEÔNCIO GUEDES

**ANÁLISES DO CICLO DE VIDA E EMISSÕES DE GASES NA PRODUÇÃO E USO
DE COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM
PAULISTA-PE, BRASIL**

Recife

2022

FLÁVIO LEÔCIO GUEDES

**ANÁLISES DO CICLO DE VIDA E EMISSÕES DE GASES NA PRODUÇÃO E USO
DE COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM
PAULISTA-PE, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá

Coorientadora: Prof^a. Dra. Soraya Giovanetti El-Deir

Recife

2022

Catálogo na fonte:

Bibliotecário Josias Machado, CRB-4 / 1690

G924a Guedes, Flávio Leôncio.
Análises do ciclo de vida e emissões de gases na produção e uso de combustível derivado de resíduos sólidos urbanos em Paulista-PE, Brasil / Flávio Leôncio Guedes. – 2022.

113 f.: il., figs., tabs., abrev. e sigl.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

Coorientadora: Prof.^a Dra. Soraya Giovanetti El-Deir.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2022.

Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia civil. 2. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. 3. Combustível derivado de resíduos. 4. Avaliação de ciclo de vida. 5. Energia de resíduos. I. Jucá, José Fernando Thomé (orientador). II. El-Deir, Soraya Giovanetti (coorientadora). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-55

FLÁVIO LEÔNCIO GUEDES

**ANÁLISES DO CICLO DE VIDA E EMISSÕES DE GASES NA PRODUÇÃO E USO
DE COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM
PAULISTA-PE, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 23/02/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá
(Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dra. Soraya Giovanetti El-Deir
(Coorientadora)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof^a. Dra. Maria de Los Angeles Perez Fernandez Palha
(Examinadora Interna)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Sergio Peres Ramos da Silva
(Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus,
por ser essencial em minha vida, autor de meu destino,
meu guia, em todas as horas e a minha família.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me conferiu força e saúde para não desistir da minha vontade de ser Mestre em Engenharia Civil.

À minha família e a minha noiva, por ser meu porto seguro, pelo incentivo, carinho e compreensão.

Aos meus orientadores o Professor Dr. José Fernando Thomé Jucá e a Professora Dra. Soraya Giovanetti El-Deir, pela orientação, por todos os trabalhos realizados, pelo conhecimento compartilhado, pela dedicação, amizade, pela confiança em mim depositada e por acreditar em meu potencial.

À Coordenação e Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, por todo incentivo, apoio, pela busca em melhoria dos cursos e pelas parcerias nas organizações dos eventos.

Aos Professores e colegas da Geotecnia por todo conhecimento adquirido e compartilhado durante todo período da Pós-graduação.

À prefeitura do município do Paulista, juntamente com seu secretário de Obras e Serviços Públicos, por disponibilizar informações para engrandecer minha pesquisa.

Ao Ecoparque Pernambuco (CTR-PE), pelas informações disponibilizadas e visitas técnica às instalações para coleta de dados.

Aos amigos do Grupo de Resíduos Sólidos (GRS) e Grupo de Gestão Ambiental em Pernambuco (GAMPE), pelo apoio, publicações, pesquisas e parcerias durante o período da pós-graduação.

À banca examinadora, pelo tempo dedicado e contribuições para o engrandecimento do meu trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que eu pudesse finalizar mais uma fase da minha vida, meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

Com o aumento da urbanização, a proteção ao meio ambiente contra os impactos antrópicos causados pelo aumento da geração de resíduos se tornou um desafio para todos os municípios brasileiros. Este fato vem sendo debatido através de Setor da Engenharia Civil, através conhecimentos multidisciplinares. Esta pesquisa tem o objetivo estabelecer recomendação para o aproveitamento energético de Resíduos Sólidos Urbanos, através de análise de potencial energético, e de emissão de gases de efeito estufa para atmosfera durante a produção do Combustível Derivado de Resíduos (CDR). Os dados obtidos foram referentes aos Resíduos gerados no Município do Paulista, em Pernambuco, e valorizados para a produção de combustível na Central de Tratamento de Resíduos, no Município de Igarassu, em Pernambuco e comercializado para alimentar fornos das indústrias de cimento. Os resultados mostram que o aproveitamento energético de resíduos como combustível se encontra em evidência, sendo objeto de estudo de pesquisadores devido à possibilidade de descobertas científicas que contribuam para aplicação da tecnologia. É que o processo de produção se destaca por apresentar os maiores impactos positivos na categoria relacionada às mudanças climáticas devido às emissões evitadas na substituição do combustível fóssil e à redução da exploração de petróleo para fabricação de resinas plásticas e fibras dos principais componentes. A comparação analítica do combustível oriundo de resíduos com o coque de petróleo, combustível fóssil mais utilizado na indústria de cimento, realizada pelo método internacionalmente padronizado de Avaliação de Ciclo de Vida apontou uma redução de 1.781,46 tCO₂-eq/ano. Os resultados encontrados na aplicação do método multicritério para avaliar as tecnologias de tratamento mostraram-se consistentes e podem ser utilizados para que municípios no auxílio à tomada de decisões uma ordem de importância para aspecto econômico em primeiro lugar com 55,6%, seguido do ambiental com 20,0%, o técnico com 19,5% e por último o critério social 4,8%. Já o potencial energético, de acordo com as características técnicas, socioambientais e econômicas, mostrou-se viável em todos os aspectos analisados.

Palavras chave: gerenciamento de resíduos sólidos urbanos; combustível derivado de resíduos; avaliação de ciclo de vida; energia de resíduos.

ABSTRACT

With the increase on urbanization, the protection of the environment against human impacts caused by the increase in waste generation has become a challenge for all Brazilian municipalities. This fact has been debated in the Civil Engineering Sector, through multidisciplinary knowledge. This research aims to establish a recommendation for the energy use of solid urban waste, through the analysis of energy potential, and the emission of greenhouse gases into the atmosphere during the production of refused derived fuel (RDF). The data captured were related to the waste generated in the Municipality of Paulista, in Pernambuco, and valued for the production of fuel in the Waste Treatment Center, in the Municipality of Igarassu, in Pernambuco and sold to feed furnaces in the cement industries. The results showed that the energetic use of wastes as fuel is in evidence, being the object of this study due to the possibility of discoveries that contribute to the application of the technology. And that the production process stands out for having the greatest positive impacts in the category related to climate change due to the avoided rates in fossil fuel replacement and the reduction in oil exploration for the manufacture of plastic resins and fibers of the main components. The analytical comparison of Fuel from waste and Petroleum Coke, the most used fossil fuel in the cement industry, carried out by the internationally standardized method of Life Cycle Assessment showed a reduction of 1,781.46 tCO₂-eq/year. The results found in the application of the multi-criteria method to evaluate the treatment technologies determined to be consistent and can be used for municipalities in aiding decision-making an order of importance for the economic aspect in first place with 55.6%, followed by the environmental with 20.0%, the technician with 19.5% and finally the social criterion 4.8%. The energy potential, according to the technical, socio-environmental and benefit characteristics, proved to be viable in all benefits.

Keywords: urban solid waste management; refused derived fuel; life cycle assessment; waste energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Classificação dos resíduos sólidos segundo a origem.....	21
Figura 2 –	Classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade.....	21
Figura 3 –	Ordem de prioridade no gerenciamento de resíduos.....	22
Figura 4 –	Série histórica (1990 a 2019) das emissões do setor de resíduos.....	25
Figura 5 –	Modelo simplificado de possíveis fontes de emissões consideradas pelas metodologias IPCC e ACV.....	26
Figura 6 –	Amostra de CDR produzido no CTR-PE.....	30
Figura 7 –	Objetivos do desenvolvimento sustentável.....	35
Figura 8 –	Emissões de GEE com a utilização de RSU na indústria de cimento.....	40
Figura 9 –	Cenário do mercado de cimento brasileiro.....	41
Figura 10 –	Foco AVC convencional x foco AVC de resíduos.....	43
Figura 11 –	Ciclo produtivo do CDR.....	44
Figura 12 –	Mapa de localização do Município de Paulista-PE.....	45
Figura 13 –	Organograma da Metodologia Geral da Pesquisa	48
Figura 14 –	Fluxograma para a Análise Bibliométrica.....	51
Figura 15 –	Fronteira do Sistema Produto (Primeira Fase).....	54
Figura 16 –	Fronteira do Sistema Produto (Segunda Fase).....	55
Figura 17 –	Níveis de Detalhamento do Modelo de Ciclo de Vida.....	56
Figura 18 –	Árvore Hierárquica para Análise do Potencial Energético.....	62
Figura 19 –	Fluxograma Sistemático de Busca de Dados.....	65
Figura 20 –	Evolução do Número de Publicações ao Longo do Anos.....	66
Figura 21 –	Principais Países com Publicações da Temática.....	67
Figura 22 –	Análise das citações dos artigos: (a) os 10 artigos com maiores números de citações; e (b) os 10 artigos com maiores médias de citações por tempo de publicação.....	69
Figura 23 –	Nuvens de Palavras formada a partir: (a) dos títulos; (b) dos resumos.....	70
Figura 24 –	Rede de Coocorrência de Palavras.....	71
Figura 25 –	Análise do Dendograma.....	72
Figura 26 –	Planta de Triagem e Produção de CDR em Igarassu-PE.....	73
Figura 27 –	Rota do CDR Produzido em Paulista-PE.....	74
Figura 28 –	Proporção por tipologia dos RSU do Município de Paulista-PE: (a)	

	Percentual de RSU por gerenciamento; (b) Percentual de Resíduos valorizados para produção de CDR.....	75
Figura 29 –	RSU de Paulista-PE por Processos de Gerenciamento.....	76
Figura 30 –	Etapas ICV do impacto processual.....	78
Figura 31 –	Processo de Queima de CDR.....	79
Figura 32 –	Emissões de CO ₂ -eq do CDR e Coque no processo de Queima.....	80
Figura 33 –	Análise do Impacto Utilizando a Categoria Usetox 2.....	80
Figura 34 –	Comparação das emissões de C _{O2} -eq entre as cadeias de suprimento do CDR e Coque de Petróleo.....	81
Figura 35 –	Média da composição gravimétrica dos componentes do CDR.....	82
Figura 36 –	Prioridades das Alternativas de Tratamento Térmico pelos Critérios	87
Figura 37 –	Composição Gravimétrica Média dos RSU de Paulista-PE.....	89
Figura 38 –	Prioridades dos Critérios Técnicos para a Produção de CDR.....	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Objetivos e Metas dos ODS alinhados ao CDR.....	36
Quadro 2 –	Etapas do Processo de Produção de CDR.....	38
Quadro 3 –	Classificação e descrição do CDR de acordo com a ASTM.....	39
Quadro 4 –	ICV do processo do ciclo de vida do CDR.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Limites para Classificação dos RSUE.....	29
Tabela 2 –	Escala Fundamental para Julgamentos Comparativos de Saaty.....	60
Tabela 3 –	Índice Randômico de Consistência.....	62
Tabela 4 –	Principais Instituições com Publicações na Temática.....	68
Tabela 5 –	Discriminação dos Periódicos por Total de Publicações e Métricas de Impacto.....	69
Tabela 6 –	Matriz de comparação de Paridade dos Critérios.....	83
Tabela 7 –	Comparação Normalizada dos Critérios Estabelecidos.....	84
Tabela 8 –	Matriz de Comparação com Pesos Atribuídos.....	85
Tabela 9 –	Índice de Preferência Geral.....	85
Tabela 10 –	Estimador de Autovalor.....	86
Tabela 11 –	Resumo do Cálculo de Prioridade para Alternativa.....	86
Tabela 12 –	Resumo do Cálculo de Consistência de Julgamento.....	88
Tabela 13 –	Poder Calorífico de materiais em RSU.....	90
Tabela 14 –	Análise de PCI e do PCS da Amostra.....	91
Tabela 15 –	Comparação de Emissões de CO ₂ -eq do Poder Calorífico.....	91
Tabela 16 –	Indústrias de cimento no estado da Paraíba e Pernambuco.....	93
Tabela 17 –	Tabela de critérios técnicos de produção de CDR.....	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABLP	Associação Brasileira de Res. Sólidos e Limpeza Pública
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
CDRU	Combustível Derivado de Resíduos Urbanos
CTR	Central de Tratamento de Resíduos
Cd	Cádmio
CH ₄	Metano
Cl	Cloro
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO _{2-eq}	Dióxido de Carbono Equivalente
Cr	Cromo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONMETRO	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
GEE	Gases de Efeito Estufa
Hg	Mercúrio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
Pb	Chumbo
PCI	Poder Calorífico Inferior

PE	Política Energética
PIB	Produto Interno Bruto
PNMC	Política Nacional de Mudanças Climáticas
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRISMA	Principais Itens a Relatar para Revisões Sistemáticas e Meta-análises
PBACV	Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida
PLANARES	Plano Nacional de Resíduos Sólidos
N2O	Oxido Nitroso
RDF	<i>Refuse Derived Fuel</i>
RMR	Região Metropolitana do Recife
RS	Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RSUE	Resíduos Sólidos Urbanos para Fins Energéticos
SEEG	Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SIMA	Secretaria Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
URE	Unidades de Recuperação Energética
US EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
WTE	<i>Waste-to-energy</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO GERAL.....	19
1.1.1	Objetivo Específicos.....	19
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS.....	20
2.1.1	Resíduos Sólidos Urbanos.....	23
2.1.2	Resíduos Sólidos e o Crescimento Urbano.....	23
2.1.3	Resíduos Sólidos e as Mudanças Climáticas.....	24
2.1.4	Tratamento e Valorização de RSU.....	26
2.1.5	Resíduos Sólidos Urbanos Energéticos.....	28
2.2	COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS.....	29
2.2.1	Contexto Legal e Normativo.....	31
2.2.2	CDR no contexto dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável...	34
2.2.3	Matéria-Prima e Combustão do CDR.....	36
2.2.4	Processo de Produção.....	37
2.2.5	Classificação e Propriedades.....	38
2.2.6	Coprocessamento de CDR na Indústria do Cimento.....	39
2.2.7	Ciclo de Vida da Produção de CDR.....	42
3	METODOLOGIA.....	45
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	45
3.2	CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	46
3.3	PASSOS METODOLÓGICOS.....	50
3.3.1	Levantamento de dados primários.....	50
3.3.2	Levantamento de dados secundários.....	50
3.3.3	Análise Bibliométrica.....	50
3.3.4	Avaliação do Ciclo de Vida do CDR.....	53
3.3.5	Análise do Potencial Energético	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	65
4.1	ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	65
4.1.1	Busca de dados.....	65
4.1.2	Evolução Temporal das Publicações.....	66
4.1.3	Distribuição das publicações.....	67
4.1.4	Análise das citações dos artigos.....	69
4.1.5	Frequência de Palavras.....	70

4.1.6	Análise Fatorial.....	71
4.2	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CDR.....	72
4.2.1	Estudo de Caso.....	72
4.2.2	Inventário e Análise dos Impactos.....	75
4.2.3	Análise Comparativa.....	79
4.2.4	Análise de Incerteza.....	81
4.3	ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO.....	83
4.3.1	Prioridades de critérios.....	83
4.3.2	Análise de Consistência.....	83
4.3.3	Prioridade de alternativas.....	86
4.3.4	Análise dos Critérios Técnicos do potencial de produção de CDR no Município.....	88
5	CONCLUSÕES.....	96
	REFERÊNCIAS	98
	APÊNDICE A -	110
	APÊNDICE B -	111
	APÊNDICE C -	112

1 INTRODUÇÃO

A problemática do aumento da geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) está presente em todos os municípios brasileiros. Este fato vem se tornando destaque no setor da engenharia civil. A proteção ao meio ambiente contra os impactos antrópicos causados pelo aumento da urbanização está sendo debatido através de conhecimentos multidisciplinares, entre esses a Geotecnia, aliada a outras áreas de conhecimento, como Química e Biologia.

Segundo Tavares (2018), a gestão de RSU se tornou um desafio para os gestores públicos municipais, visto que este detém a responsabilidade pela gestão, tanto os de origem domiciliar, quanto os oriundos da limpeza pública urbana. Esta responsabilidade está estabelecida nas Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico, Lei nº 11.445 (BRASIL, 2007), na qual os planos de resíduos sólidos devem integrar os Planos Municipais de Saneamento, e na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), que define os princípios, diretrizes e instrumento da gestão dos RSU.

Dentre as diferentes formas de destinação RSU, o aterro sanitário, atualmente, é a modalidade mais utilizada e disseminada (FUGII, 2019). A implementação desse sistema objetiva diminuir o impacto dos resíduos no ambiente, sobretudo a contaminação do solo, o ar e os cursos de água. Contudo, por razões geotécnicas e ambientais, os aterros estão posicionados acima do lençol freático (JUCA et al., 2021).

Conforme preconiza a PNRS (BRASIL, 2010), a utilização de aterros é um recurso para a disposição final dos rejeitos. A Lei também hierarquiza as destinações para os resíduos, onde inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos ambientais (JUCA et al., 2020; SILVA et al., 2020).

De acordo com o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2006), o aumento da disposição de RSU em aterros sanitários é responsável pelo crescimento das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Um aterro sanitário pode ser considerado como um reator biológico, onde a decomposição da matéria orgânica emite diversos gases, alguns em grandes quantidades, como o metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂). Estes são provenientes da decomposição

anaeróbia dos compostos biodegradáveis dos resíduos orgânicos (GAMA et al., 2019).

Araújo Júnior (2019) enfatiza que a metodologia atual de disposição em aterros tem efeitos negativos nos aspectos socioambientais e econômicos, além das emissões de GEE que estão relacionadas aos RSU têm sido alvo de preocupações ambientais, quanto ao aquecimento global. Já dentre as formas de destinação de RSU, a recuperação energética e o tratamento proporcionam mais eficácia em termos ambientais e que os atuais sistemas de gestão de RSU em aterros sanitários (SOARES; MIYAMARU; MARTINS, 2017).

Os resíduos passíveis de recuperação energética classificam-se como fonte alternativa de energia para todos os efeitos previstos na legislação (BRASIL, 2019). Nos últimos anos, novas tecnologias de gerenciamento de RSU permitem que estes sejam transformados, passando a ter valor econômico, diminuindo a disposição em aterros, além de respeitar os aspectos socioambientais e econômicos do local a serem implantadas (BERTICELLI; PANDOLFO; KORF, 2016).

Devido à elevação de carbono na atmosfera causado pelas emissões GEE gerados pelo uso de combustíveis fósseis, alternativas de combustíveis para geração de energia são amplamente pesquisadas (PERES et al., 2020). Para Jucá et al. (2014), uma solução para essa problemática seria o uso de resíduos não viáveis para a reciclagem, porém com valor energético, por meio da conversão destes em Combustível Derivado de Resíduo (CDR), a fim de serem utilizados, por exemplo, nas indústrias de produção de cimento.

Na indústria de cimento, o CDR é aplicado como permuta aos combustíveis fósseis não renováveis, como o coque de petróleo, representando a segunda principal alternativa do setor (VISEDIO; PECCHIO, 2019). Segundo Araújo (2020), a indústria cimenteira é fundamental para a economia mundial, porém o processo produtivo consome grandes quantidades de combustíveis e de eletricidade, sendo responsável por até 7% das emissões de CO₂ no Brasil.

Nesse contexto, para auxiliar na seleção da melhor alternativa para o tratamento dos RSU e para compreender os possíveis impactos gerados na utilização de combustíveis alternativos como o CDR, a análise de emissão de GEE pode-se ser utilizada através de avaliação do ciclo de vida (ACV).

Com a quantificação dos GEE emitidos e analisados na ACV, é possível avaliar os possíveis impactos associados aos produtos, tanto na fabricação quanto no consumo, através das fases de um sistema ou processo, incluindo a manufatura, o uso e a distribuição do produto, a possibilidade de reciclagem, além de outros tratamentos pós-consumo (ABNT, 2014a; ABNT, 2014b). Para Dutra, Medeiros e Gianelli (2019), a técnica de ACV pode comparar e estimar os potenciais impactos ambientais causados durante todo o ciclo processual de uma determinada atividade ou produto.

O Governo Brasileiro assumiu compromisso voluntário, através da Política Nacional sobre Mudança do Clima (BRASIL, 2009), de reduzir as emissões de GEE projetadas até 2020. Assim, os Estados que possuem Central de Tratamento de Resíduos (CTR) onde existem ações que colaboram para redução de GEE, contribuem para atingir o compromisso firmado pelo Brasil. Em Pernambuco, o CTR-PE recebe em média 1.500 t.ano^{-1} de RSU oriundos dos seguintes municípios que dispõem de coleta domiciliar: Abreu e Lima, Araçoiaba, Condado, Goiana, Igarassu, Itamaracá, Itapissuma, Olinda e Paulista. Esses RSU são verificados durante a triagem, onde os não recicláveis que possuem viabilidade de recuperação energética seguem para a transformação em CDR, passando a ter um valor econômico, além de diminuir a quantidade de disposição no aterro sanitário.

O Município do Paulista, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), possui uma população estimada de 334.376 habitantes, ocupando a quinta colocação entre os municípios do estado de Pernambuco. Paulista está entre os nove municípios que enviam os RSU para o CTR-PE. Este contribui em média com $97.200 \text{ t.ano}^{-1}$, a partir das rotas de coletas das quatro administrações regionais da cidade. Neste contexto, observa-se que pode ser inferida a existência de conexões entre a valorização energética e a redução na emissão de GEE. Tal situação está alinhada ao atendimento a princípios da sustentabilidade, por meio da produção de CDR que considera o potencial de geração de RSU do município.

O presente estudo visa à diminuição das emissões de GEE e aumento da vida útil do aterro sanitário, através da valorização energética dos RSU através do potencial de produção de CDR no município estudado e os possíveis impactos processuais resultantes em termos de emissões de GEE para a atmosfera.

1.1 OBJETIVO GERAL

Estabelecer recomendação para o aproveitamento energético de Resíduos Sólidos Urbanos no Município do Paulista-PE, através de análise de potencial energético, e de emissão de Gases de Efeito Estufa para atmosfera durante a produção do Combustível Derivado de Resíduos.

1.1.1. Objetivos Específicos

- I. Analisar a evolução da informação científica e tecnológica sobre CDR nos últimos 10 anos.
- II. Verificar o impacto da emissão de carbono para atmosfera do ciclo processual do CDR;
- III. Comparar os impactos ambientais nos processos de produção do CDR e do Coque de Petróleo;
- IV. Determinar o potencial de produção de CDR e recomendações para gestão de RSU no Município do Paulista, através de critérios estabelecidos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta uma síntese do referencial teórico através de texto estruturado de referências publicadas até o momento em relação ao tema proposto, no qual dispõe em uma sequência de tópicos relevantes para a pesquisa.

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS

De acordo com a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010) que institui a PNRS, os resíduos sólidos (RS) são definidos como material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o descarte em rede pública de esgotos ou em corpos hídricos. A Norma Técnica Brasileira - NBR 10.004 (ABNT, 2004) também os define como resíduos nos estados sólido e semissólido, incluindo os resíduos líquidos, cujas particularidades tornem inviável o lançamento sem o tratamento ambientalmente adequado.

A PNRS é fruto de negociações entre vários atores envolvidos ao longo de anos, a qual fornece subsídios para a gestão compartilhada dos resíduos. Esta Lei atribui responsabilidades às pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, pela minimização do volume de resíduos e rejeitos gerados, além da redução dos impactos negativos causados à saúde e à qualidade ambiental. Tal normativa tem como propósito dar subsídios para a gestão integrada de resíduos sólidos, através de princípios, objetivos e diretrizes (BESEN; FREITAS; JACOBI, 2017).

A Lei nº 11.445 (BRASIL, 2007), que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, foi incluído pela Lei nº 14.026 (BRASIL, 2020), que atualiza o marco legal de saneamento básico. Esta considera os serviços públicos de manejo de resíduos sólidos incluindo as atividades operacionais de coleta, transbordo, transporte, triagem para fins de reutilização ou reciclagem, tratamento e destinação final dos resíduos domésticos, resíduos originários de atividades comerciais, industriais e de serviços e resíduos originários dos serviços públicos de limpeza urbana.

Quanto à origem (Figura 1), os resíduos sólidos são classificados como urbanos (os originários de atividades domésticas e de limpeza urbana), de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, dos serviços públicos de saneamento básico, industriais (os gerados nos processos produtivos e instalações industriais), de serviços de saúde, da construção, agrossilvopastoris, de serviços de transportes e de mineração (BRASIL, 2010).

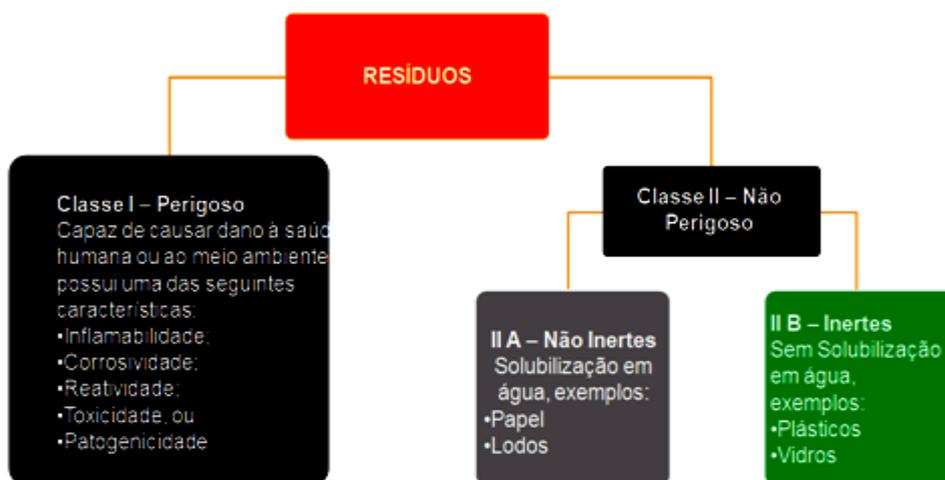
Figura 1. Classificação dos resíduos sólidos segundo a origem



Fonte: Adaptado de Brasil (2010)

Quanto à periculosidade (Figura 2), os resíduos são classificados quanto aos riscos potenciais que podem causar ao meio ambiente e à saúde em Resíduos Perigosos ou Classe I e Não Perigosos ou Classe II, segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004) e a PNRS (BRASIL, 2010).

Figura 2. Classificação dos resíduos sólidos quanto à periculosidade

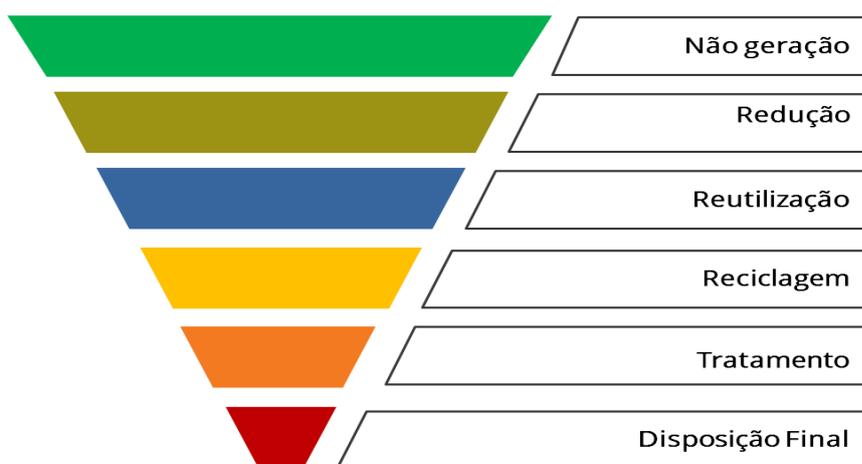


Fonte: Adaptado de ABNT (2004)

Os Resíduos Classe I ou Resíduos Perigosos podem apresentar riscos à saúde pública, incidindo em doenças e aumentando os riscos ao meio ambiente, quando manuseado de forma inadequada, em função de suas propriedades física, químicas ou infecto contagiosas (ROSINI et al., 2020). Já os Resíduos Classe II ou Resíduos Não Perigosos apresentam características de solubilidade ou biodegradabilidade, sem que se enquadrem como perigosos (OLIVEIRA; MATIAS; AGUIAR, 2018).

Quanto à priorização no gerenciamento de resíduos (Figura, 3), segundo a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), a gestão e o gerenciamento de resíduos devem seguir a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Para Bispo, Santos e Nascimento (2019), essas prioridades refletem uma tendência mundial com ênfase em atividades de não geração, redução e reutilização, fazendo com que os resíduos gerados sejam reutilizados na cadeia produtiva.

Figura 3. Ordem de prioridade no gerenciamento de resíduos



Fonte: Adaptado de Brasil (2010)

Mesmo seguindo o processo de priorização integralmente, ainda resta uma fração de material que não é passível de reutilização ou reciclagem. Isto pode ocorrer devido ao fato do resíduo ser constituído de mais de um tipo de material em sua composição, por falta de tecnologia e/ou mercado disponíveis para a reciclagem, dentre outros fatores. No entanto, o cumprimento dessas prioridades requer, além de ações de capacitação ambiental com foco no consumo responsável, o incremento tecnológico e a inovação no setor de resíduos sólidos, na tentativa de

obter alternativas de enfrentamento do problema do gerenciamento (BISPO; SANTOS; NASCIMENTO, 2019).

2.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Os RSU, de acordo com a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), englobam os resíduos domiciliares originários de atividades domésticas em residências urbanas e os de limpeza urbana oriundos da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza na cidade. São constituídos por itens comuns resultantes de resíduos residenciais gerados por famílias individuais, resíduos comerciais gerados a partir de grandes fontes únicas, resíduos de serviços municipais e outros serviços de limpeza urbana e da varrição (COLVERO, 2017; TAVARES, 2018).

A composição dos RSU varia de acordo com a situação socioeconômica e das condições e hábitos de vida da população, assim como dependem de diversos fatores como o clima, tempo, estações do ano, hábitos e o desenvolvimento socioeconômico da região em estudo. Estes são compostos, entre outros, por matéria orgânica, papel e papelão, vidro, plásticos, metais e roupas, descartados no processo do consumo da população urbana (PERNAMBUCO, 2012, JUCÁ et al., 2014, NOBERTO et al., 2020).

No Brasil, a prática tradicional adotada para o gerenciamento dos RSU consiste na disposição final em aterros sanitários, porém, em alguns municípios, podem ainda ser encontrados pontos de disposição clandestina e aterros controlados. Por outro lado, em países desenvolvidos, destacam-se as inovações e evoluções tecnológicas importantes, que têm acompanhado as demandas energéticas, materiais e ambientais (BERTICELLI; PANDOLFO; KORF, 2016; SOLIANI; KUMSCHLIES; SCHALCH, 2019).

2.1.2 Resíduos Sólidos e o Crescimento Urbano

O processo de crescimento demográfico urbano gera a expansão da população nas cidades e ocasiona um fenômeno comum que demanda atenção a estes espaços urbanos, por causarem um crescimento desordenado decorrente do processo de globalização (BORGES et al., 2020). É nas cidades que se congregam

a maior parte das atividades econômicas do planeta, bem como a mais elevada contribuição na geração de resíduos e consumo da energia mundial, se destacando pela liberação de volumes expressivos de gases de efeito estufa na atmosfera (SATHLER; PAIVA; BAPTISTA, 2019).

A aceleração do processo de urbanização pode provocar diversos problemas socioambientais relacionados à geração de resíduos sólidos. Diante de um quadro de crise nas mais diversas áreas, devido a desordem urbanística, a questão ambiental sobressai de maneira exógena e interconectada, sendo necessária uma atuação resiliente que possa superar e se adaptar às mudanças e adversidades presentes numa sociedade cada vez mais globalizada, à beira do ponto de mutação (SILVA; EL-DEIR; SILVA, 2017a).

Para Tavares (2018), nos centros urbanos, a geração de resíduos sólidos apresenta uma taxa superior ao crescimento populacional, fazendo com que a necessidade de investimentos no setor aumente progressivamente. Ainda, a urbanização também está associada à centralização da pobreza e da vulnerabilidade aos novos riscos ambientais contemporâneos (IPCC, 2014).

2.1.3 Resíduos Sólidos e as Mudanças Climáticas

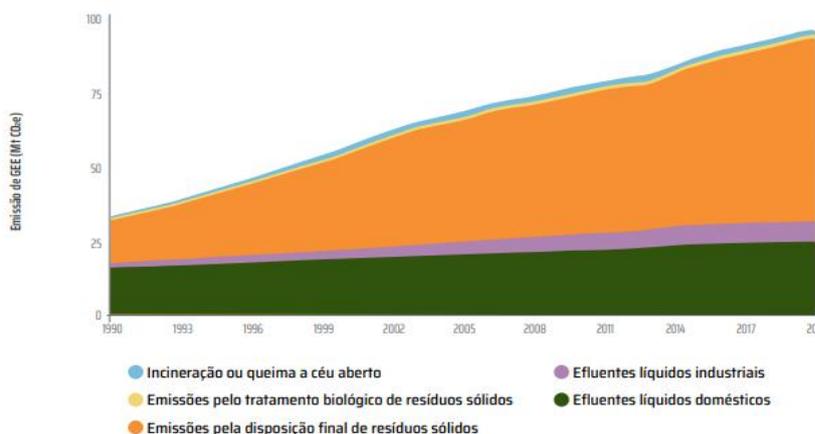
Os resíduos sólidos são fontes de emissão GEE, através da relação com a produção e o consumo, como também em função das emissões CH₄ quando são dispostos em lixões e aterros sanitários. Segundo o Observatório do Clima (2020), com 4% do total nacional, o setor de resíduos sólidos teve aumento de 1,3% em emissões de GEE, de 94,8 milhões para 96,1 milhão de toneladas de CO₂ equivalente (Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa - SEEG, 2020).

Os GEE emitidos no setor de resíduos sólidos são compostos predominantemente de CH₄ oriundos da decomposição da fração orgânica encaminhada à disposição final em aterros e lixões, dióxido de carbono (CO₂) e um pequeno percentual de óxido nitroso (N₂O), advindo da valorização de resíduos orgânicos (FIRMO et al., 2019, COSTA et al., 2020).

No Brasil, até o ano de 2019, das emissões de GEE do gerenciamento de resíduos (Figura 4), a maior parte da contribuição foi associada à disposição em

aterros sanitários e lixões (65%), seguida pelo tratamento de efluentes líquidos domésticos (26%), tratamento efluentes líquidos industriais (7%), incineração ou queima a céu aberto (2%) e, com menor contribuição, o tratamento biológico por meio de compostagem (1%), demonstrando que as diferentes etapas e técnicas apresentam percentuais distintos (SEEG, 2020).

Figura 4. Série histórica (1990 a 2019) das emissões do gerenciamento de resíduos



Fonte: SEEG 7 - Observatório do Clima (2020)

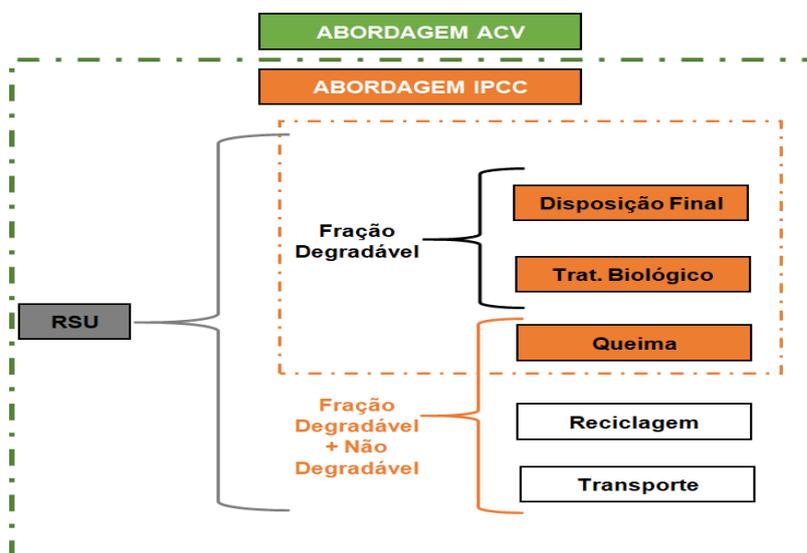
Segundo Firmo et al. (2019), o Brasil tem como características e sistemas de gestão voltados, predominantemente, à coleta e à disposição final em aterros sanitários e lixões, com um pequeno percentual de reciclagem e poucas experiências de valorização de resíduos orgânicos. Dessa forma, com a deficiência de mecanismos de captura e aproveitamento do biogás produzido em aterros, a disposição de resíduos pode aumentar as emissões de GEE.

Nos aterros sanitários, a decomposição da matéria orgânica é anaeróbica e emite mais CH_4 do que as demais frações (IPCC, 2014). Este gás apresenta fator de impacto de efeito estufa 28 vezes mais elevado do que o CO_2 . Assim, as emissões de aterros são mais representativas que as provenientes de locais de disposição inadequados, representando 57% das emissões do setor (SEEG, 2020). Além do mais, para Firmo et al. (2019), a variação no nível de emissões de GEE derivadas do setor de resíduos depende da composição gravimétrica dos RSU, bem como das tecnologias de tratamento e disposição final adotados no local.

O modelo do IPCC permite quantificar as emissões totais de uma determinada localidade, considerando uma rota simplificada. Entretanto, as práticas

de gerenciamento de RSU incluem também outras tecnologias que envolvem coleta, tratamento de resíduos secos e orgânicos, tratamento térmico e disposição final (IPCC, 2014). O modelo do IPCC para o escopo de resíduos não aborda algumas etapas, como a quantificação, bem como as emissões de GEE derivadas de tecnologias que convertem estes em combustível, o que compromete, em parte, a eficácia do modelo (FIRMO et al., 2019). Dessa forma, para uma abordagem mais completa, utiliza-se a metodologia de ACV, a qual é empregada internacionalmente para análise de fluxos de matéria e energia em todas as etapas da oferta de bens e serviços (Figura 5).

Figura 5. Modelo simplificado de possíveis fontes de emissões consideradas pelas metodologias IPCC e ACV



Fonte: Adaptado de Firmo et al. (2019)

2.1.4 Tratamento e Valorização de RSU

De acordo com a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010, Art. 9º.), o tratamento de resíduos sólidos está na quinta posição em ordem de prioridade para gerenciamento dos resíduos sólidos.

[...] 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, 2010, Art. 1º.).

A escolha das alternativas de tratamento de RSU é um processo complexo, em que se devem avaliar analisar diferentes critérios de avaliação, como as questões sociais, ambientais e econômicas (QAZI; ABUSHAMMALA; AZAM, 2018). Entretanto, para saber qual o melhor tratamento para utilizar no gerenciamento de RS primeiramente deve-se classificá-lo conforme NBR 10.004, o qual preconiza a classificação dos resíduos sólidos (ABNT, 2004).

Os resíduos dispostos sem tratamento em aterros sanitários contribuem significativamente para a intensificação da emissão de GEE, da poluição do ar, da poluição das águas, bem como o aumento problemas de saúde pública (THAKUR; GANGULY; DHULIA, 2018).

As tecnologias de tratamento de RS mais utilizadas podem ser separadas em 3 grupos: tratamento mecânico; tratamento bioquímico; e tratamento térmico (MÜLLER, 2021). O processo de tratamento mecânico obtém os melhores resultados na gestão de RS, ocorre em unidades de triagem manuais ou automatizadas, onde acontecem as atividades de separação, limpeza e acondicionamento, por tipo de material (CHANG; PIRES, 2015; MÜLLER, 2021).

De acordo com Müller et al. (2021), o tratamento biológico pode se dar através da compostagem ou unidade de digestão anaeróbica (biodigestor). O processo de compostagem é o tratamento biológico da matéria orgânica realizado na presença de oxigênio (aeróbio), tendo como resultado composto ou fertilizante como produto final. Já na digestão anaeróbica (biodigestor) é realizada na ausência de oxigênio e gera e captura o gás metano para uso como fonte de energia. Os tratamentos biológicos de RS seguem a ordem de prioridade da PNRS, porque evitam a disposição final de resíduos com possibilidade de tratamento (BRASIL, 2010).

O tratamento térmico, entre os tratamentos mecânico e biológico, possui o maior índice de redução de volume dos resíduos, podendo variar entre 80 e 90% (LOMBARDI; CARNEVALE; CORTI, 2015). A geração de energia térmica ou elétrica através de resíduos data do início do século XIX (McDOUGALL et al., 2001). O processo se dá pela queima controlada e devidamente preparada dos resíduos para diminuir o seu volume e gerar energia. Em relação às emissões de GEE, o CO₂ é o

principal GEE emitido pelos incineradores de RSU. Já o CH₄ não é gerado durante as operações normais da incineração (JOHNKE, 2002).

De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos em inglês *United States Environmental Protection Agency* (US EPA, 2016), a conversão da fração de resíduos não passíveis de reutilização e reciclagem em energia, calor ou combustível pode se dar por intermédio de processos que inclui combustão, gasificação, pirólise, digestão anaeróbia e a recuperação do biogás formado nos aterros sanitários, sendo esta conversão denominada recuperação energética dos resíduos ou *waste to energy* (WTE) na sigla em inglês.

Os tratamentos aplicados aos RSU utilizam tecnologias que neutralizam as características negativas, e agrega valor, através de matéria-prima secundária produzida. Para Machado et al. (2021), diversos métodos vêm sendo aplicados para promover o reaproveitamento de RS e minimizar os riscos ambientais causados pela disposição inadequada, como também para o tratamento dos RS gerados.

2.1.5 Resíduos Sólidos Urbanos Energéticos

Os RSU oriundos de atividades domésticas em residências urbanas podem ser elegíveis para recuperação energética. Esses resíduos possuem alto poder calorífico, sendo uma das possibilidades de tratamento a recuperação de energia através de processos termoquímicos (DRUDI, 2019). Para Mamede (2013), a valorização local do RSU e sua utilização para fins energéticos poderão auxiliar no desvio de uma significativa quantidade de resíduo para fins mais nobres, pois iriam ser destinados a aterros sanitários.

A NBR 16.849 (ABNT, 2020) estabelece os requisitos para o aproveitamento energético de RSU, promovendo a utilização de forma segura e sustentável, por meio do uso racional de RSU na preparação e o emprego de tecnologias adequadas de queima.

Esta Norma estabelece os requisitos para aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos com ou sem incorporação de outros resíduos classe II – Não perigosos, abrangendo os aspectos de elegibilidade de resíduos, registros e rastreabilidade, amostragem e formação dos lotes, armazenamento, preparo de resíduos sólidos urbanos para fins energéticos (RSUE), classificação dos lotes gerados e uso do RSUE nas

unidades de recuperação energética (URE) [...] (ABNT, 2020, p.1).

O sistema de classificação do RSUE determina os valores limites de três características do resíduo: PCI na base seca; teor de cloro, como recebido; e teor de mercúrio, como recebido (Tabela 1).

Tabela 1. Limites para classificação dos RSUE

Características de classificação				
Unidade	Medida estatística	Classes		
	PCI (base seca)	P1	P2	P3
kcal/kg	Limite inferior da média (P ≥ 95 %)	PCI ≥ 4750	4750 > PCI ≥ 3580	3580 > PCI ≥ 2390
	Teor de cloro	C1	C2	C3
%	Limite Superior da média (P ≥ 95 %)	CI ≤ 0,5	0,5 < CI ≤ 1,5	1,5 < CI ≤ 3,0
	Teor de mercúrio	H1	H2	H3
mg/kg	Média aritmética	Hg ≤ 0,1	0,1 < Hg ≤ 0,25	0,25 < Hg ≤ 0,5
	Percentil de 80	HgP80 ≤ 0,2	0,2 < HgP80 ≤ 0,5	0,5 < HgP80 ≤ 1

Fonte: ABNT (2020)

Assim, os valores limites são aplicados com base no cálculo da distribuição estatística dos resultados analíticos das características de PCI na base seca, teor de cloro e teor de mercúrio. Cada característica é dividida em três classes, sendo atribuído um código composto por uma letra (P, C ou H, conforme o parâmetro) e um número de classe (1 a 3, para cada característica). Uma combinação de códigos de classe constitui a classe do RSUE (ABNT, 2020).

2.2 COMBUSTÍVEL DERIVADO DE RESÍDUOS

O combustível derivado de resíduos (CDR), do Inglês *refused derived fuel* (RDF), é um termo aplicado a materiais que possuem valor calorífico normalmente por volta de 18 MJ.Kg⁻¹, recuperado da coleta de resíduos. Esta tecnologia de processamento do RSU em CDR é bem consolidada e difundida nos Estados Unidos, Japão e Europa.

Segundo Sampaio (2014), esta tecnologia é utilizada para um melhor rendimento do resíduo, no qual torna o combustível com um tamanho mais uniforme (Figura 6) umidade menor e redução da quantidade de componentes nocivos, como o cloro (Cl), flúor (F), sódio (Na) e potássio (K). Desta forma, problemas de não conformidade são evitados.

Figura 6 – Amostra de CDR produzido no CTR Pernambuco



Fonte: Autor (2020)

De acordo com Caputo e Pelagagge (2002), esta recuperação de matéria advinda do RSU é uma das opções disponíveis para a gestão de resíduos em municípios, por meio da produção de CDR. A Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP) define o Combustível Derivado de Resíduos como

Combustível alternativo preparado a partir de resíduos sólidos, conforme os requisitos estabelecidos nesta Resolução, comercializável em substituição a combustíveis convencionais, para ser utilizado em fornos e caldeiras industriais ou em unidades de tratamento térmico de resíduos, de maneira a não causar perdas em eficiência de processos produtivos nem prejuízo à qualidade de produtos e sem causar impactos ambientais adicionais ao ar, à água e ao solo, em comparação aos impactos gerados pelo uso exclusivo de combustíveis convencional (FIESP, 2020).

Segundo a Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SIMA), considera-se o uso do CDR uma forma de destinação final de resíduos sólidos adequada, de prioridade inferior à reciclagem e superior a outros tratamentos (SIMA, 2020). A utilização do CDR diminui a área ocupada por aterros sanitários, através da transformação dos RSU em combustível, evitando a disposição em extensas áreas de terra, as quais necessitariam de cuidados adicionais após o encerramento da vida útil, tornando vantajosa a alternativa desta recuperação energética (PIAIA, 2021).

O CDR pode ser utilizado nos fornos de usinas de biomassa, na indústria do cimento e nas caldeiras (VALENTE JÚNIOR, 2015). Conforme Hajinezhad, Ziaee e Tahani (2016), além de prover energia, o CDR pode ser utilizado/incorporado nas indústrias de papel, de madeiras, bem como incineradoras de resíduos e centrais térmicas. Desta forma, desonera o sistema de geração e distribuição energética.

2.2.1 Contexto Legal e Normativo

O CDR também é associado ao termo Resíduo Sólido Urbano Energético (RSUE), através da nomenclatura apresentada da ISO NBR 16849 (ABNT, 2020). Sendo classificado como um combustível alternativo, essa tecnologia ainda não possui uma Legislação Nacional específica que determine parâmetros mínimos de uso desse material dentro da matriz energética brasileira.

Com a promulgação da PNRS, as responsabilidades acerca do gerenciamento dos resíduos sólidos passam a ser compartilhada por todos os geradores (BRASIL, 2010). Assim, o enquadramento legal tem como objetivo a universalização da prestação dos serviços públicos de limpeza urbana, através de mecanismos que assegurem as dimensões da sustentabilidade, cabendo ao Poder Público o manejo dos RS (MERSONI; REICHERT, 2017).

No cenário brasileiro, o estado de São Paulo já possui legislação sobre o CDR. A tendência é que outros estados criem legislação específica, ou que seja promulgada Lei Federal sobre o tema. Dessa forma, o Estado de São Paulo estabeleceu as características mínimas dos Combustíveis Derivados de Resíduos Sólidos, além de condições operacionais, limites de emissão, critérios de

monitoramento e controle para disciplinar o licenciamento ambiental da recuperação energética do CDR nos fornos de produção cimento (SIMA, 2020).

Contudo, há de se considerar as legislações que concernem ao gerenciamento e gestão dos RSU, as normativas legais e outros dispositivos que abordam as tecnologias de alternativas energéticas, bem como as regulamentações que tratam diretamente da produção e utilização de CDR. Nesse contexto, o tratamento térmico de Resíduos Sólidos no Brasil foi regulamentado em 2002, através da Resolução nº 316 do CONAMA, no qual estabeleceu procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos (CONAMA, 2002). Em 2010, foi legalmente estabelecida a utilização de tecnologias visando à recuperação energética dos RSU, desde que seja comprovada a viabilidade técnica e ambiental, bem como a aprovação pelo órgão ambiental do monitoramento de emissão de gases tóxicos (BRASIL, 2010a).

Entretanto, somente em 2019, em atendimento a PNRS, o Ministério do Meio Ambiente (MMA), Ministério de Minas e Energia (MME) e o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) publicaram a Portaria Interministerial nº 274 (BRASIL, 2019), que disciplinou a recuperação energética dos RSU no Brasil. Esta se encontra em consonância com § 1º do Art. 9º da Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010a) e do Art. 37 do Decreto nº 7.404 (BRASIL, 2010b), quando estabelece as bases e diretrizes operacionais para o aproveitamento energético de tais materiais. A valorização de RSU para fins energéticos, depois de esgotadas as possibilidades aproveitamento de resíduos preconizadas na PNRS, possibilita o uso deste para obtenção de energia, tendo como disposição final em aterros sanitários somente o rejeito (BRASIL, 2019).

Já em relação às Políticas Nacionais relacionadas às preocupações ambientais e que podem se enquadrar no contexto da produção de CDR através do gerenciamento de resíduos, destacam-se: a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a Política Energética (PE) e a Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC). A PNRS (BRASIL, 2010a) regulamentada pela Lei nº 12.305, nas disposições gerais, Art. 4º, estabelece que sua composição reúne

O conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotadas pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à

gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos” (BRASIL, 2010, Art. 4º).

Dentre os instrumentos da PNRS, encontra-se a concepção do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PLANARES), que contempla itens como as tendências (cenários) e as metas de redução, reutilização, reciclagem, visando à minimização da quantidade de resíduos e rejeitos, além das metas para o aproveitamento energético dos gases gerados em aterros sanitários (BRASIL, 2020).

A PE regulamentada pela Lei nº 9.478 (BRASIL, 1997), bem como a PNMC regulamentada pela Lei nº 12.187 (BRASIL, 2009), utilizam mecanismos para minimizar efeitos negativos das principais fontes de energia originadas pela utilização de combustíveis fósseis que são responsáveis pelo incremento significativo de GEE.

Entretanto, a PE incentiva a produção de energia limpa, de fontes renováveis como a biomassa que se trata de matéria orgânica de origem vegetal ou animal usado para fins de produção de energia, o qual, considerando o ciclo de vida, absorve na produção o carbono emitido durante a combustão (VALENTE JÚNIOR, 2015). Porém, devido o CDR não ser considerado biomassa por esta política, não se beneficia de incentivo previsto ao aproveitamento da biomassa contido na PE. Para Yergin (2011), o RSU não deve ser incluído no conceito de biomassa, porém menciona em seu trabalho a possibilidade de transformar resíduo em energia. Entretanto, segundo Hinrichs e Kleinbach (2010), a energia de biomassa representa energias renováveis obtidas a partir de matéria animal ou vegetal, ou a partir dos resíduos.

A PNMC prevê a compatibilização das demais políticas aos seus objetivos:

Os princípios, objetivos, diretrizes e instrumentos das políticas públicas e programas governamentais deverão compatibilizar-se com os princípios, objetivos, diretrizes e instrumentos desta Política Nacional sobre Mudança do Clima (BRASIL, 2009, Art 11º).

De acordo com Valente Júnior (2015), a definição de resíduos é mais abrangente que a definição de biomassa, pois na definição de resíduo poderão existir elementos oriundos de fontes não renováveis, enquanto a biomassa versa sobre matéria de origem animal ou vegetal. Assim, os projetos que utilizam a biomassa de resíduos podem receber incentivos tanto da PE como da PNRS, ou de ambos. Dessa forma, a PNRS prevê a possibilidade de concessão de incentivos.

Art 7º. XIV São objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos: [...] VI - incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético (BRASIL, 2010, Art. 7º).

Assim como, a PE, incluído pela Lei nº 12.490 (BRASIL, 2011), no Art. 1º, XIV “incentivar a geração de energia elétrica a partir da biomassa e de subprodutos da produção de biocombustíveis, em razão do seu caráter limpo, renovável e complementar à fonte hidráulica (BRASIL, 1997, Art. 1º).

Estas políticas, apesar de possuírem focos e objetos distintos, trazem uma base comum voltada às questões no âmbito da esfera da qualidade socioambiental, assim como orientam na busca de meios para obtenção de um desenvolvimento sustentável, através de um conjunto coerente de decisões e ações da Administração Pública para a coletividade e balizada pelo interesse público (HOMERCHER; BERGUE, 2011, VALENTE JÚNIOR, 2015).

2.2.2 CDR no contexto dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

A Agenda 2030, proposta pela Organização das Nações Unidas (ONU), é um compromisso firmado entre os países signatários. Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) demonstram uma aproximação pela busca da sustentabilidade (Figura 7). Os ODS definem metas e prioridades a serem alcançadas e buscam mobilizar esforços em torno de um conjunto de metas locais¹ comuns, como alcançar o uso eficiente de recursos naturais (SILVA; EL-DEIR; SILVA, 2017). Entre estes há os objetivos relacionados ao tema focal desta dissertação, como o ODS 07 - Energia renováveis, ODS 09 - Inovação e infraestrutura, ODS 11 - Cidades e comunidades sustentáveis, ODS 12 - Consumo e produção responsáveis e ODS 13 - Combate as mudanças climáticas. Observa-se que com a utilização de combustíveis fósseis pelo setor industrial, potencializa-se as emissões de gases do efeito estufa, através do incremento de carbono na atmosfera. Assim, a utilização dos resíduos como fonte de energia, por meio da produção de CDR para fins de substituição de combustíveis fósseis, está relacionada com a geração de energia e a

¹ O termo de *global* representa a presença da dimensão local na produção de uma cultura global, onde se tem a necessidade de uma visão atenta da complexidade da relação local-global (LOURENÇO, 2014).

redução na emissão de GEE e a estruturação do setor produtivo em bases mais sustentáveis (VISED0; PECCHIO, 2019).

Figura 7. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável



Fonte: Adaptado (ONU, 2015)

A produção e uso de CDR durante o gerenciamento de resíduos sólidos se alinha às metas dos ODS 7, 9, 11, 12 e 13. Estes focam no contexto de ganhos referentes à redução da quantidade de rejeitos destinados a aterros sanitários, à redução da emissão de GEE na atmosfera ambiental através de um potencial combustível alternativo oriundo de RSU. Tal fonte energética pode substituir às formas convencionais derivadas de petróleo, sendo uma maneira de reutilização de um resíduo, em substituição a um recurso natural.

Especificamente, esta tecnologia está alinhada às metas do ODS 7, que visa assegurar o acesso a uma energia acessível, segura, sustentável e moderna para todos. Esta também se relaciona com o ODS 9, que tem por objetivo promover as indústrias sustentáveis e investir em pesquisa científica e em inovação, sendo formas importantes de facilitar o desenvolvimento sustentável. Já o ODS 11 visa tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis, ao passo que o ODS 12 busca a promoção da eficiência do uso de recursos energéticos e naturais, da infraestrutura sustentável, do acesso a serviços

básicos. Por fim, o ODS 13 está relacionado às medidas urgentes para combater a mudança climática e impactos relacionados (Quadro 1).

Quadro 1. Objetivos e Metas dos ODS alinhados ao CDR

ODS	Metas
7	7.2 Até 2030, aumentar substancialmente a participação de energias renováveis na matriz energética global. 7.3 Até 2030, dobrar a taxa global de melhoria da eficiência energética.
9	9.4 Até 2030, modernizar a infraestrutura e reabilitar as indústrias para torná-las sustentáveis, com eficiência aumentada no uso de recursos e maior adoção de tecnologias e processos industriais limpos e ambientalmente adequados; com todos os países atuando de acordo com suas respectivas capacidades.
11	11.6 Até 2030, reduzir o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando especial atenção à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros.
12	12.5 Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso. 12.4 Até 2020, alcançar o manejo ambientalmente adequado dos produtos químicos e de todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionalmente acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente. 12.2 Até 2030, alcançar gestão sustentável e uso eficiente dos recursos naturais.
13	13.2 Integrar medidas da mudança do clima nas políticas, estratégias e planejamentos nacionais.

Fonte: Adaptado (ONU, 2015)

2.2.3 Matéria-Prima e Combustão do CDR

Segundo Pinto (2017), o CDR é definido como um combustível sólido preparado tendo por base RS não perigosos, cuja produção se destina à recuperação energética. A matéria-prima para produção do CDR são RSU domiciliares ou comerciais e resíduos industriais não perigosos (Classe IIA e IIB), após passar por triagem para subtração de resíduos orgânicos e recicláveis (CONAMA, 2020). Assim, de acordo com Piaia et al. (2021), quando o CDR é fabricado através de matéria-prima resultantes de atividades desenvolvidas pela população dos municípios e pelos serviços de limpeza pública, são chamados Combustível Derivado de Resíduos Urbanos (CDRu).

Durante a combustão, o CDR é queimado no interior da fornalha para fornecer o calor necessário, no qual há uma combinação de oxigênio com elementos combustíveis presentes nos resíduos. O uso de resíduos urbanos como

combustíveis é amplamente utilizado na Europa, Estados Unidos e Japão. No Brasil, esta tecnologia vem sendo implantada de forma gradativa (SAMPAIO, 2014).

Embora exista uma vasta quantidade de combustíveis, os elementos combustíveis com contribuições mais significativas são três: carbono, hidrogênio e enxofre, sendo o último em quantidades menores, porém responsável por problemas de corrosão e poluição (KITTO; STULTZ, 2005). A transformação do RSU em CDR torna um combustível com um tamanho mais uniforme, pois além da umidade presente no combustível ser menor, a seletividade diminui a quantidade de componentes nocivos, como o cloro (Cl), flúor (F), sódio (Na) e potássio (K) e conseqüentemente os problemas causados por eles são evitados ou reduzidos (SAMPAIO, 2014).

2.2.4 Processo de Produção

Para a produção de CDR, é utilizada a fração contida em energia dos RSU, no qual possui uma mistura diversa de vários materiais e, portanto, as propriedades físicas e a composição química não são previsíveis, tendo como principais componentes o papel, resíduos têxteis, plástico, madeira e resíduos orgânicos domésticos (CAPUTO; PELAGAGGE, 2002; REZAEI et al., 2020). Segundo Jucá (2014), para se obter um CDR de boa qualidade, a composição deve conter material orgânico de baixa umidade e sem frações de contaminação crítica, como metais pesados, a exemplo do Cr, Cd, Pb, Hg. Este também não deve possuir substâncias orgânicas críticas, bem como substâncias halogenadas, medicamentos ou resíduos infectados.

A produção de CDR é mundialmente difundida. O setor industrial detém o conhecimento de diversos processos para realizar a alteração do resíduo, no qual possibilita um resultado melhor no aproveitamento energético (SAMPAIO, 2014). De acordo com Mamede (2013), a linha de produção de CDR consiste de estações arranjadas em série, no qual são separados os componentes indesejados e condicionados à matéria combustível, a fim de obter um CDR com características pré-determinadas. O CDR é produzido ainda de forma simples, a partir de resíduo

industrial, domiciliares e misto, através de equipamentos com uma série de etapas (Quadro 2).

Quadro 2. Etapas do processo de produção de CDR

Etapa	Ação
Trituração Primária	Rasga sacos
Tambor rotativo	Eliminação de materiais úmidos e pesados
Separação de metais ferrosos	Separação em maioria: aço e ferro
Separação de metais não ferrosos	Separação em maioria: alumínio, latão e cobre
Separação aerodinâmica	Separação através de soprador
Trituração	Processamento do RSU

Fonte: Adaptado de Sampaio (2014)

Conforme Rama (2010), não há uma padronização para o processo de produção do CDR dada as propriedades do material combustível, visto que, na linha de produção os RS são misturas heterogêneas de materiais, por vezes muito complexas, sendo a produção iniciada pela homogeneização da matéria-prima, através de tecnologias relevantes e aplicáveis. Assim, a configuração da planta de processamento e a quantidade de equipamentos empregados na produção do CDR podem causar um impacto significativo na qualidade final deste e no balanço de massa do combustível alternativo (MAMEDE, 2013, PINTO, 2017).

2.2.5 Classificação e Propriedades

Para Sampaio (2014), não existem especificações por parte do setor industrial em relação ao CDR, porém há diversas variações nas propriedades físicas e químicas do combustível oriundo de resíduos. Segundo Schlottauer (1986), a Sociedade Americana de Testes de Materiais, em inglês *American Society for Testing and Materials* (ASTM), desenvolveu sete categorias em que os tipos de CDR podem ser classificados, com a finalidade de fornecer um padrão de classificação dos diversos tipos de CDR para utilização das indústrias (Quadro 3).

Quadro 3. Classificação e descrição do CDR de acordo com a ASTM.

Classificação	Descrição
CDR-1	A partir de RSU bruto em condições de descarte
CDR-2	RSU processado para tamanho de partículas grosseiras com ou sem separação de metais
CDR-3	RSU processado e picado com separação de metais, vidros e outros orgânicos
CDR-4	RSU processado e triturado até a forma para pulverizar com separação de metais, vidros e outros orgânicos
CDR-5	RSU processado e densificado (comprimido) para formas de peletes, briquetes ou cubetes
CDR-6	RSU processado para queimar como combustível líquido
CDR-7	RSU processado para queimar como com combustível gasoso

Fonte: Adaptado a partir de Schlotthauer (1986) e Sampaio (2014)

2.2.6 Coprocessamento de CDR na Indústria do Cimento

No Brasil, a principal utilização do CDR se dá nos fornos rotativos da fabricação de cimento, na atividade denominada coprocessamento de RS. Segundo o Conama (2020), o CDR pode ser utilizado nos fornos como substituto de matéria prima desde que apresente características similares às dos componentes usualmente empregados na indústria do cimento, como substituto de combustível fóssil, desde que seja comprovado o ganho de energia necessário.

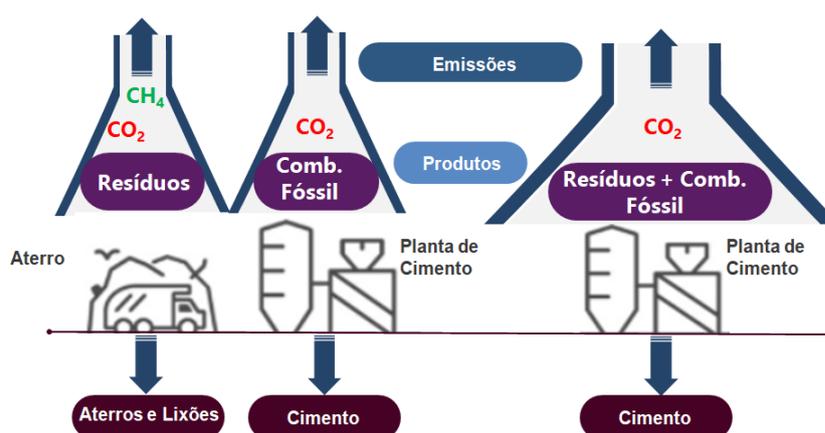
Dessa forma, o coprocessamento é conhecido através da integração da queima de resíduos sólidos com a produção de itens através de altas temperaturas. Segundo Freitas e Nóbrega (2014), é a recuperação simultânea de reciclagem e energia de materiais utilizados na substituição de combustíveis fósseis primários em fornos de cimento.

No processo de coprocessamento, as fontes tradicionais de energia na fabricação de cimento são combustíveis fósseis, como petróleo e carvão, sendo que estes são substituídos por combustíveis derivados de resíduos e biomassa, denominados combustíveis alternativos. Devido às altas temperaturas e ao tempo de permanência nos fornos de cimento, a destruição de tais combustíveis alternativos é considerada completa e eficiente (ARAÚJO, 2020).

De acordo com a Cembureau (2020), o coprocessamento contribui para a solução de problemas ambientais, como a redução de GEE e, conseqüentemente, a redução das alterações climáticas. Destaca-se também a redução do volume de resíduos que são depositados em aterros e o uso eficiente do conteúdo energético dos resíduos, sendo uma forma de estruturação da Economia Circular, através do uso dos minerais dos resíduos nas fábricas de cimento, evitando que estes sejam aterrados.

O coprocessamento eleva o grau de proximidade da indústria do cimento à Economia Circular e desempenha um papel fundamental em relação à gestão de resíduos em áreas locais e municípios (CEMBUREAU, 2020). O CO₂ é economizado pela substituição de combustíveis fósseis por fontes energéticas alternativas de RSU, evitando emissões de metano dos aterros (Figura 8).

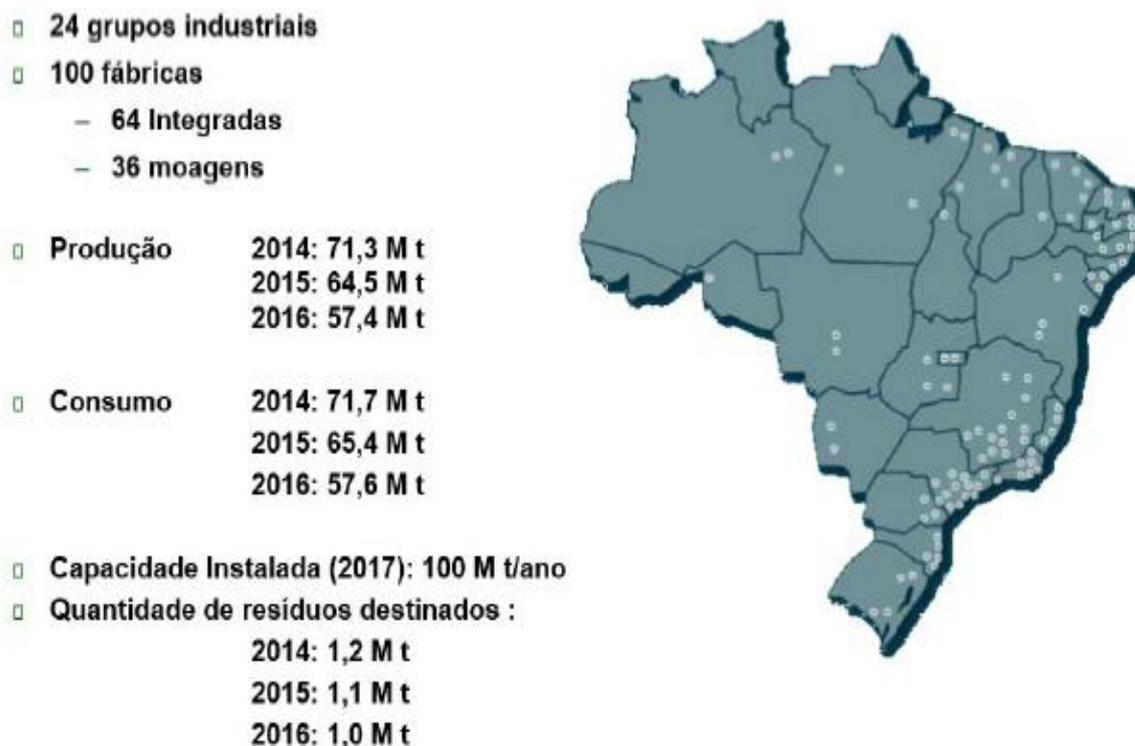
Figura 8. Emissões de GEE com a utilização de RSU na indústria de cimento



Fonte: Adaptado Cembureau (2020)

De acordo com a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), no Brasil, existem hoje 24 grupos cimenteiros em atuação, com 100 fábricas de cimento e uma capacidade instalada de produção total de 102 Mt.ano⁻¹ (Figura 9). A indústria cimenteira, mesmo sendo uma das mais basais para a economia mundial, a qual movimenta aproximadamente US\$ 250 bilhões de dólares.ano⁻¹, consome quantidades significativas de combustíveis e eletricidade no processo produtivo (ARAÚJO, 2020). Assim, o alto consumo de energia torna a indústria de cimento responsável por 5 a 7% das emissões de CO₂ antropogênico, representando cerca de 3% do total de emissões de GEE mundiais (VAN DEN HEEDE; DE BELIE, 2012).

Figura 9. Cenário do mercado de cimento brasileiro



Fonte: ABCP (2017)

O cimento é obtido pela síntese de calcário, argila e minério de ferro a aproximadamente 1450°C, usando temperaturas que podem chegar a mais de 2.000°C. O produto desse processo é chamado de clínquer, que é finamente moído com gesso e outros aditivos químicos para produzir cimento (GÜERECA; TORRES; JUAREZ-LOPEZ, 2015). O processo de fabricação de clínquer nas cimenteiras consome quantidades significativas de energia, utilizando como matéria-prima, geralmente, combustíveis fósseis. No entanto, os combustíveis derivados de resíduos foram desenvolvidos como uma alternativa para o setor. Dessa forma, o setor cimenteiro tem promovido discussões a respeito da minimização dos impactos ambientais negativos no processo produtivo (DE PAULA et al., 2019).

A substituição da fonte energética tradicional por combustíveis alternativos como o CDR tornou-se estratégica para as cimenteiras, que têm investido constantemente na recuperação energética de frações de resíduos sólidos com elevado poder calorífico elevado, por meio do seu uso como CDR, com o coprocessamento (DE PAULA et al., 2019; FIRMO et al., 2019).

2.2.7 Ciclo de Vida da Produção de CDR

Cada produto possui um ciclo de vida, que tem início com a extração do recurso natural, passando pelo processamento da matéria-prima, seguindo para a produção e distribuição do produto ao mercado consumidor, o qual utiliza o material produzido até o fim de sua vida útil. Neste ponto, pode ocorrer a disposição final em forma de resíduo ou retornar, como insumo, para um novo processo produtivo, através da Economia Circular.

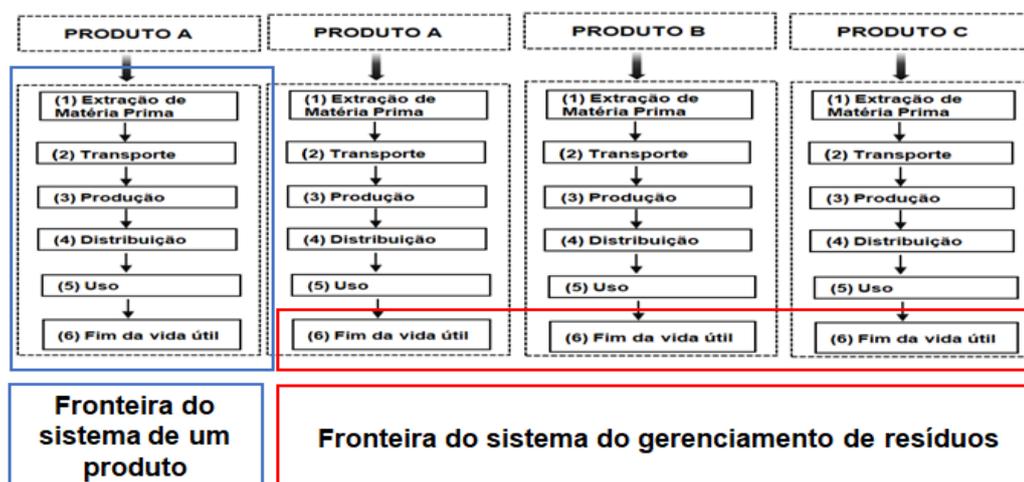
Para uma análise mais completa do ciclo de vida através de fluxos de matéria e energia, é empregada a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), a qual é uma ferramenta utilizada para quantificar os impactos ambientais potenciais de produtos ou processos. Segundo Firmo (2019), a ACV apresenta uma visão integrada com foco no fluxo de materiais, tanto na fabricação quanto no consumo, desde a extração da matéria-prima até a disposição final. São consideradas todas as emissões de GEE decorrentes do gerenciamento dos resíduos, independentemente do local ou momento temporal em que estas ocorreram.

No Brasil, a abordagem ACV vem sendo indicada com maior ênfase desde 2010, com a aprovação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV), através da Resolução do Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial nº 4/2010 (CONMETRO, 2010) e da PNRS, instituída pela Lei nº 12.305/2010, que define a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos como um dos seus princípios orientadores (BRASIL, 2010). A normatização da ACV no Brasil se dá através de duas normas que dispõem sobre ACV, a ABNT NBR ISO 14040:2014 – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura (ABNT, 2014a) e a ABNT NBR ISO 14.044:2014 – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações (ABNT, 2014b).

Segundo Firmo et al. (2019), apenas com a realização de ACV se pode verificar a real relevância do setor de resíduos para a mitigação das mudanças climáticas, no qual deve-se considerar as etapas do processo de gestão dos RSU, pela ótica da Economia Circular. Neste contexto, a ACV apresenta-se como uma ferramenta eficiente para avaliar os sistemas de gerenciamento RSU, servindo como apoio à tomada de decisão em relação ao melhor modelo a ser adotado (OLIVEIRA, 2019).

A Diretiva Europeia aborda a relação complementar entre a hierarquia de resíduos e o ciclo de vida, buscando a opção de tratamento que exiba melhor desempenho ambiental. Porém, em algumas situações, não é possível identificar somente pela hierarquia dos resíduos. É justamente nesses casos que a aplicação da ACV se faz necessária, sendo utilizada a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) ao tipo de tratamento em questão (COMISSÃO EUROPEIA, 2012). A ACV de resíduos não tem como foco todo o ciclo de vida do produto, mas sim o fim da vida útil deste (Figura 10), pois não reflete necessariamente o momento a partir do qual terminou a sua durabilidade.

Figura 10. Foco AVC convencional x foco AVC de resíduos



Fonte: Adaptado de Burnley; Phillips; Coleman (2012)

As ferramentas da ACV podem ser aplicadas como instrumentos de apoio à decisão no gerenciamento de resíduos, através da avaliação e comparação das diferentes opções de tratamento de RSU, para escolha da melhor alternativa, como atuação complementar a hierarquia dos resíduos (ANGELO, 2014). De acordo com Lee, Han e Wang (2017), a ACV também tem sido usada para caracterizar as emissões de GEE de aterros com vias de conversão de resíduos em energia, indicando que as emissões podem variar dependendo do fluxo de resíduos, práticas de gestão local e clima.

O processo de produção do CDR envolve consumo de energia, combustível e emissões de GEE, sendo a ACV uma ferramenta capaz de avaliar o impacto processual. Assim, a metodologia ACV pode ser aplicada para identificar os

indicadores ambientais categóricos da eficácia e da viabilidade da etapa de recuperação de material e energia, através da reincorporação e tratamento de RSU (IBÁÑEZ-FORÉS et al., 2018; NÓBREGA et al., 2019).

Estudos de ACV são aplicados para avaliar o desempenho ambiental do tratamento de RSU, sendo que os resultados podem mostrar benefícios ambientais diferentes, devido à tecnologia adotada (MONTEJO et al., 2013). No entanto, a inclusão da planta de tratamento mecânico-biológico é preferível à disposição em aterro sanitário, uma vez que fornece benefícios ao ambiente em termos de esgotamento de combustíveis fósseis, ecotoxicidade e toxicidade humana, apesar de ter impactos nas mudanças climáticas, acidificação terrestre e formação de oxidantes fotoquímicos (ABELIOTIS; KALOGEROPOULOS; LASARIDI 2012, BEYLOT et al., 2015, SILVA, 2021).

Cada produto possui um ciclo de vida repleto de etapas que podem gerar impacto ao meio ambiente (RIBEIRO et al., 2018). A ACV para o ciclo produtivo de CDR abrange os processos de transporte de RSU à Central de Tratamento de Resíduos, de triagem manual e automática, de produção e de armazenamento de CDR (Figura 11).

Figura 11. Ciclo Produtivo do CDR



Fonte: Recivalongo (2020)

A ACV do ciclo produtivo do CDR pode ser considerada de berço ao portão. Esta é utilizada para quantificar a carga ambiental do CDR desde a coleta do RSU, que entra no sistema de produção (berço), até o produto final, que será direcionado para a comercialização (portão).

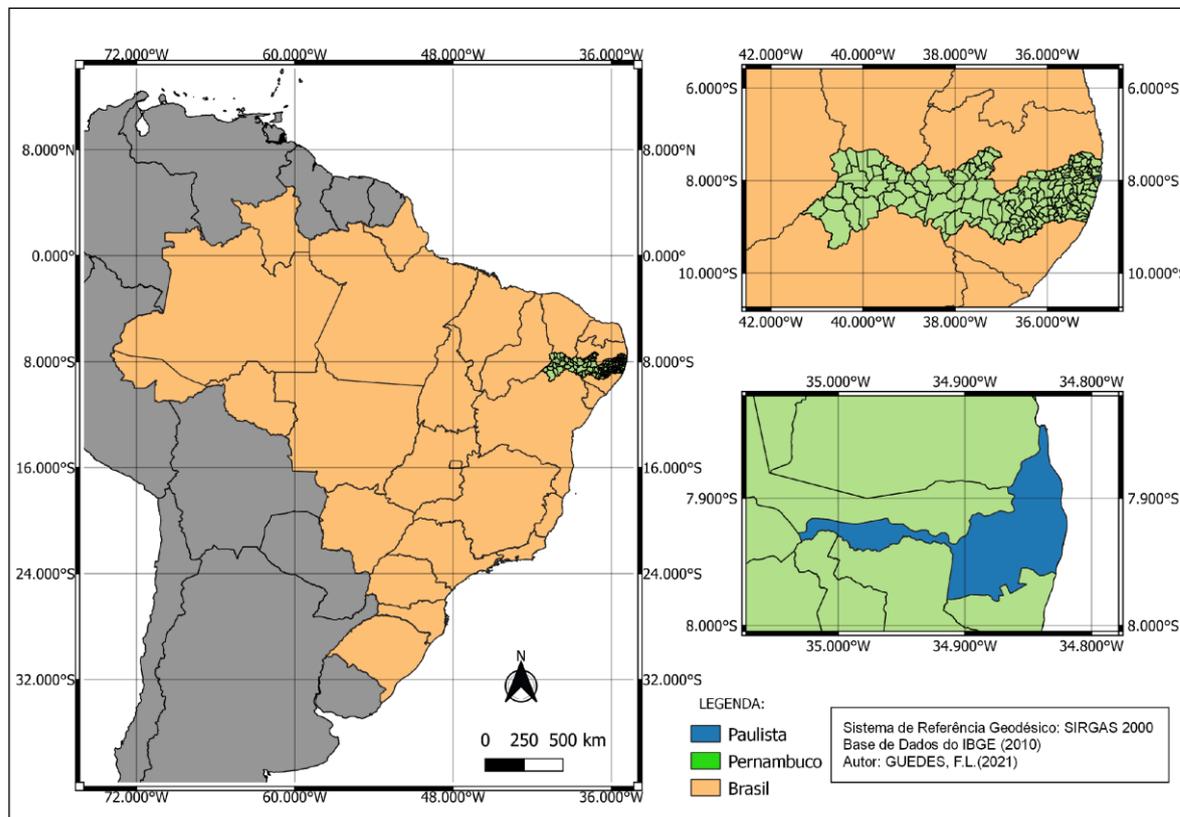
3 METODOLOGIA

Este capítulo aborda a descrição do processo de pesquisa do trabalho, bem como a definição dos procedimentos para a coleta e análise dos dados através de métodos estruturados.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município do Paulista (Figura 12) está localizado a 15,5 km ao norte da capital de Pernambuco, sendo pertencente à Região Metropolitana de Recife (RMR), sob as coordenadas geográficas: Latitude 7°56'24" Sul e Longitude 34°52'20" Oeste. Esta ocupa uma área territorial de 96,979 km², com população estimada para 2020 de 334.376 habitantes. O Produto interno bruto (PIB) municipal *per capita* é de 12.240,33, estando o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) no valor de 0,732 (IBGE, 2020).

Figura 12. Mapa de Localização do Município do Paulista-PE



Fonte:Autor (2021)

Em relação ao saneamento o município apresenta 60.8% de domicílios com esgotamento sanitário adequado, 100% de domicílios com coleta de RSU, 41.7% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização e 20.8% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada (IBGE, 2020).

Em média, o município coleta e gerencia 270 t.dia⁻¹ de RSU, sendo esta dividida em 34 setores de coleta. Em alguns setores, a frequência de coleta é diária, em outros, por dias alternados. A coleta é do tipo porta-a-porta, mecanizada e manual ensacada, de forma indiferenciada e sem separação na fonte, ou seja, é indiferenciada.

O transporte dos resíduos é realizado por meio de caminhões coletores compactadores de capacidade de carga de 15m³. A distância média individual percorrida pelos veículos por viagem é de 42 km, entre trechos produtivos e improdutivos. Após a estação de transbordo, os resíduos coletados são transportados em caminhões maiores para o CTR-PE, distante desta cerca de 37 km.

O município não possui iniciativas significativas de coleta seletiva ou triagem dos resíduos, porém os RSU enviados ao Centro de Tratamentos de Resíduos CTR-PE são submetidos à triagem manual, onde é realizado o aproveitamento dos resíduos passíveis de reciclagem. Após a triagem manual, o processo de triagem automatizada possibilita a separação de resíduos através de máquinas rasga-sacos de lixo, ímãs de separação do material ferroso, câmeras ópticas decompondo o plástico, por cores e tamanhos, prensas montando os fardos e trituradores que produzem CDR. Essa sistemática dos processos de separação de resíduos do CTR-PE tem como principal produto a separação de polietileno tereftalato (PET), polipropileno (PP), polietileno de baixa densidade (PEBD), PAPEL, alumínio (AL), ferro (FE) e produção CDR.

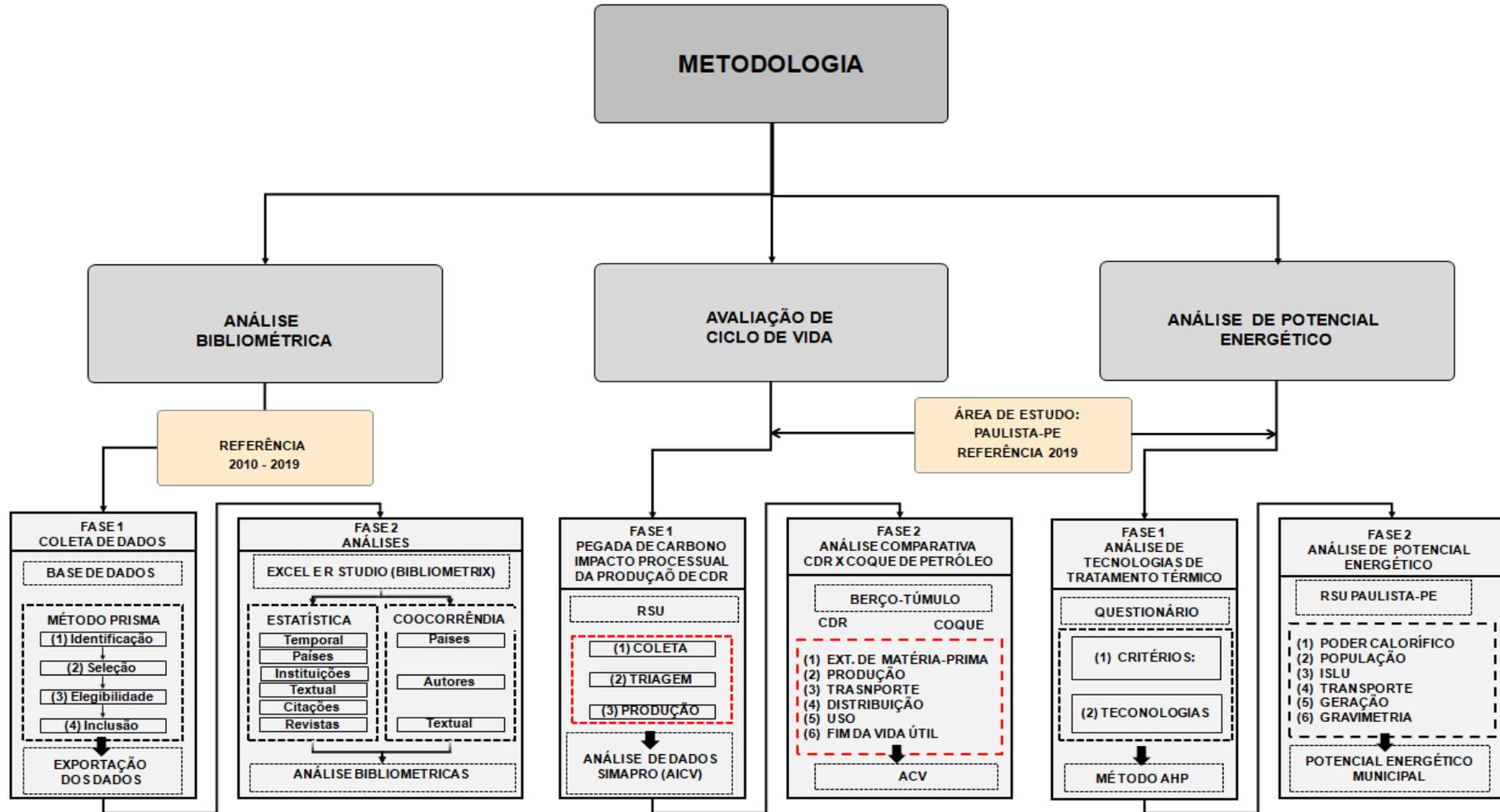
3.2 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

O estudo é uma pesquisa aplicada, descritiva e analítica, tendo como principal objetivo estabelecer recomendação do potencial do RSU gerado no Município do Paulista-PE, para a produção de CDR, bem como analisar a produção científica e a ACV do processo de produção de CDR, com base nos seguintes campos do

conhecimento: (i) análise bibliométrica; (ii) avaliação de ciclo de vida; e (iii) análise do potencial energético. De acordo com Gil (2007), uma pesquisa descritiva visa à identificação de fatores que descrevem um fenômeno descrito e detalhado.

A Figura 13 apresenta um organograma para melhor compreensão sobre os procedimentos da pesquisa.

Figura 13. Organograma da metodologia geral da pesquisa



Fonte: Autor (2022)

3.3 PASSOS METODOLÓGICOS

Nesta seção são descritos os passos metodológicos utilizados, de tal forma que o mesmo possa ser replicado em outras pesquisas.

3.3.1 Levantamento de dados primários

Para a coleta de dados primários, foram realizadas visitas ao município no período entre janeiro a dezembro de 2020, junto à Secretaria municipal e empresa responsável pelos serviços de limpeza urbana da cidade. Durante os encontros, foi aplicado um questionário (APÊNDICE A) sobre a gestão dos RSU em Paulista-PE, contemplando questões sobre os serviços de coleta, tratamento e disposição final. Os dados quantitativos de RSU enviados ao aterro sanitário e CDR produzido foram coletados no Centro de Tratamento de Resíduos de Pernambuco - CTR PE, localizado no município de Igarassu-PE, através de visitas e questionário (APÊNDICE B). Para análise do Potencial Energético do RSU municipal foi aplicado um questionário com especialistas e empresários do ramo de aproveitamento energético de Resíduos (APÊNDICE C).

3.3.2 Levantamento de dados secundários

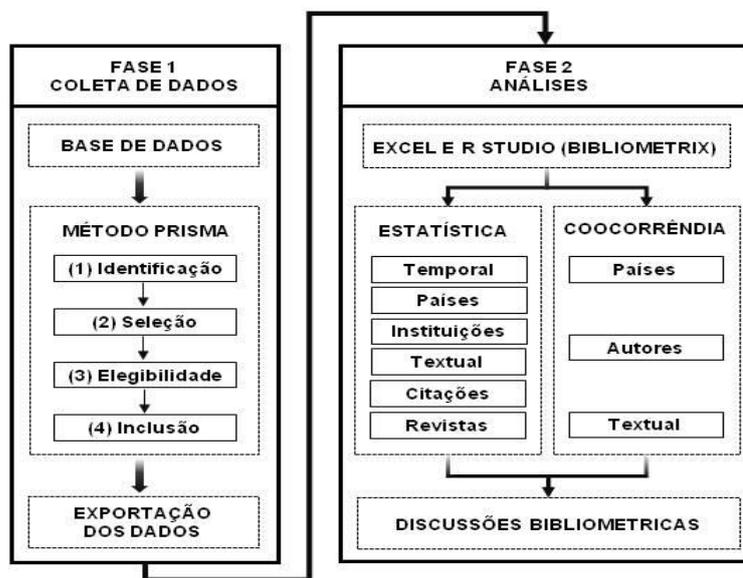
Os dados secundários foram obtidos através de informações coletadas em documentos públicos como: Dados demográficos e socioeconômicos gerais como população, IDHM e PIB através do IBGE, com informações do Censo 2010 e estimativas para o ano de 2020, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) e Índice de Sustentabilidade da Limpeza Urbana (ISLU).

3.3.3 Análise Bibliométrica

Para analisar os aspectos quantitativos e qualitativos de indicadores bibliométricos foi realizada uma busca por artigos científicos publicados sobre a temática de combustível derivado de resíduos, de energia de resíduos e de coprocessamento, visando investigar como a comunidade científica está tratando

tais assuntos. Assim, o trabalho foi dividido em duas fases: (I) Coleta de dados e (II) Análises (Figura 14).

Figura 14. Fluxograma para a análise bibliométrica



Fonte: Autor (2021)

a) Coleta de dados

Para o levantamento de dados, utilizou-se a base de dados da *Scopus*, que, segundo De Paula et al. (2017), é considerada uma das maiores bases de dados entre citações e resumos de literatura científica com revisão por pares, oferecendo ferramentas para rastrear, analisar e visualizar pesquisas das mais diversas áreas de conhecimento, permitindo uma visão ampla do que está sendo publicado no mundo. A plataforma *Scopus* abrange anualmente maior número de registros bibliográficos, totalizando mais de 55 milhões de registros, que datam desde 1823, o que representa uma alternativa consistente de fonte global de informação científica (MONGEON; PAUL-HUS, 2015).

A delimitação foi realizada por meio da sistematização de quatro etapas (Identificação, Seleção, Elegibilidade e Inclusão), definidas pela metodologia conhecida como os “Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises” – PRISMA (MOHER et al., 2010). De acordo com Pacheco et al. (2018), o PRISMA é amplamente utilizado para analisar estudos publicados em diversos

seguimentos da ciência.

Na etapa de Identificação foi aplicada a consulta na plataforma através de *Title – Abstract – Keywords*, com a aplicação simultânea dos termos “*refused devived fuel*” and “*waste energy*” and “*coprocessing*”, com a finalidade de tentar atingir uma maior abrangência dos estudos relacionados à Gestão de Resíduos Sólidos e a produção de CDR. Na etapa de Seleção, aplicaram-se os filtros: espaço-temporal (2009 a 2019); tipo de periódico (revistas científicas); tipo de produção científica (artigo de pesquisa); idioma do manuscrito (inglês). Na etapa de Elegibilidade, foram realizadas as leituras dos títulos e dos resumos dos artigos para triagem dos trabalhos que tinham relação direta com a temática abordada. Por fim, na etapa de Inclusão, foram lidos os artigos na íntegra, a fim de deixar somente as pesquisas com o foco desse estudo. Os dados contendo informações sobre os artigos foram exportados no formato .bib, que é lido pelos *softwares* de bibliometria. Desse modo, a análise do conteúdo das produções científicas focou na produção de CDR provenientes do meio urbano, bem como CDR oriundos do setor industrial. Com isso, o presente trabalho explorou as pesquisas científicas sobre o tema proposto em todo mundo.

b) Análises

Os dados bibliométricos dos artigos científicos selecionados, a partir da aplicação da sistematização da metodologia PRISMA, foram exportados e inseridos nas etapas de tratamento dos dados e análise bibliométrica. Dessa forma, foi realizado o levantamento bibliométrico com auxílio do *software* livre R Studio – pacote Bibliometrix. Segundo Geng et al. (2017), essa metodologia é reconhecida como um mecanismo de pesquisa estabelecida na área de ciência da informação, utilizando análises por métodos quantitativos, qualitativos e estatísticos para analisar informações de um conjunto de dados.

Posteriormente, adotaram-se as seguintes etapas: tratamento dos dados e análises quantitativa e textual/qualitativa. Isso foi possível por meio do *software* R Studio – pacote Bibliometrix, que fornece um vasto campo de importação de dados bibliográficos de diversas bases de dados, que auxiliam a realização de análises bibliométricas, facilitando a construção de dados. A elaboração de gráficos e de

tabelas mostrou-se necessária para explanação dos resultados. A quantificação e a identificação de trabalhos sobre a produção científica de CDR ao longo dos anos informaram o desenvolvimento da literatura sobre a temática, além da especialização dos trabalhos desenvolvidos (LIU et al., 2019). A análise textual dos artigos abrangeu os termos presentes nos títulos e nos resumos dos artigos selecionados, através da elaboração da frequência das palavras por nuvem de palavras, da rede de coocorrência e do dendograma. A análise lexical possui grande importância para o entendimento da nuvem de palavras (RAMOS; ROSÁRIO-LIMA; AMARAL-ROSA, 2018), pois realiza o agrupamento dos termos devido a quantidade de repetição no corpo textual, existindo palavras maiores e menores, a depender da frequência (MELCHIOR; ZANINI, 2019).

3.3.4 Avaliação do Ciclo de Vida do CDR

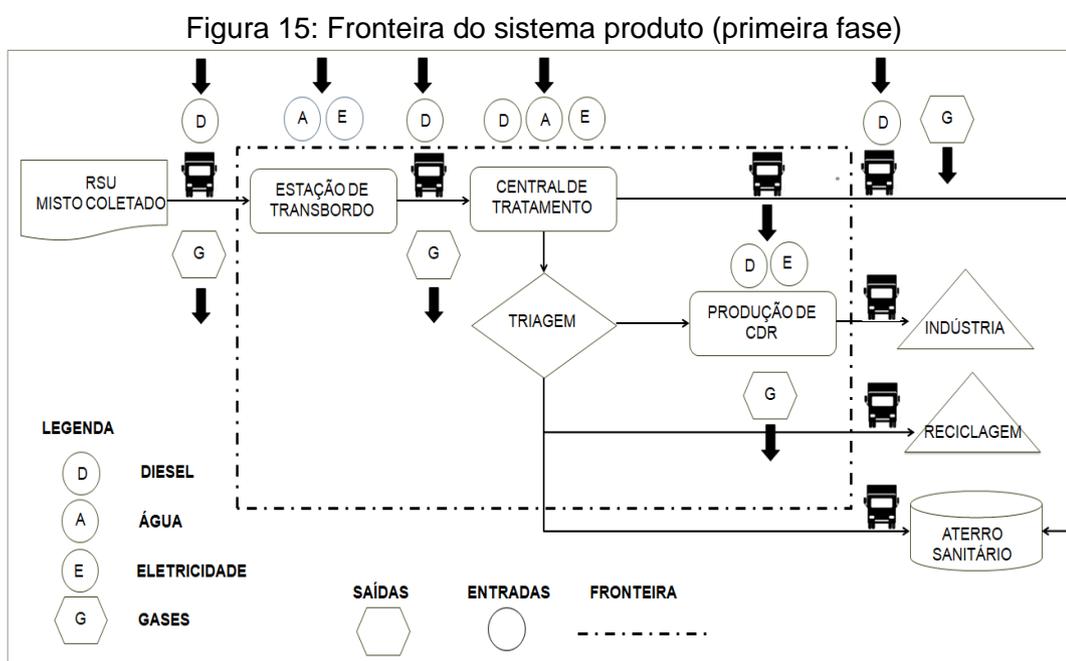
Para que se obter uma visão sistêmica dos impactos ambientais provocados por métodos produtivos, é recomendável à realização de uma ACV. Esta análise foi realizada de acordo com as normas ISO NBR 14040 (ABNT, 2014a), ISO NBR 14044 (ABNT, 2014b), seguindo as recomendações da norma ISO NBR 14067 (ABNT, 2018), que padroniza os estudos de Pegada de Carbono (PC) para a utilização da categoria de impacto de Mudanças Climáticas. Assim, para o cálculo da PC foi utilizada a Equação para conversão das emissões de GEE em toneladas de CO₂ equivalente, no qual as Emissões de GEE = \sum (Emissões do GEE x Potencial de aquecimento global). Estudos sobre ACV são indicados para quantificar a Pegada de Carbono associada processos de produção (MELQUÍADES et al., 2019). A técnica da ACV possui quatro fases: objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados.

a) Âmbito da Análise

O escopo do estudo perfaz um sistema de tratamento RSU para a produção de CDR, que inclui as etapas de transporte, triagem e tratamento e utilização. A unidade funcional refere-se ao processo produtivo de CDR t.mês⁻¹ a partir de RSU

coletados em Paulista-PE, considerando ano base 2019 e análise gravimétrica realizada em 2018 (TAVARES, 2018).

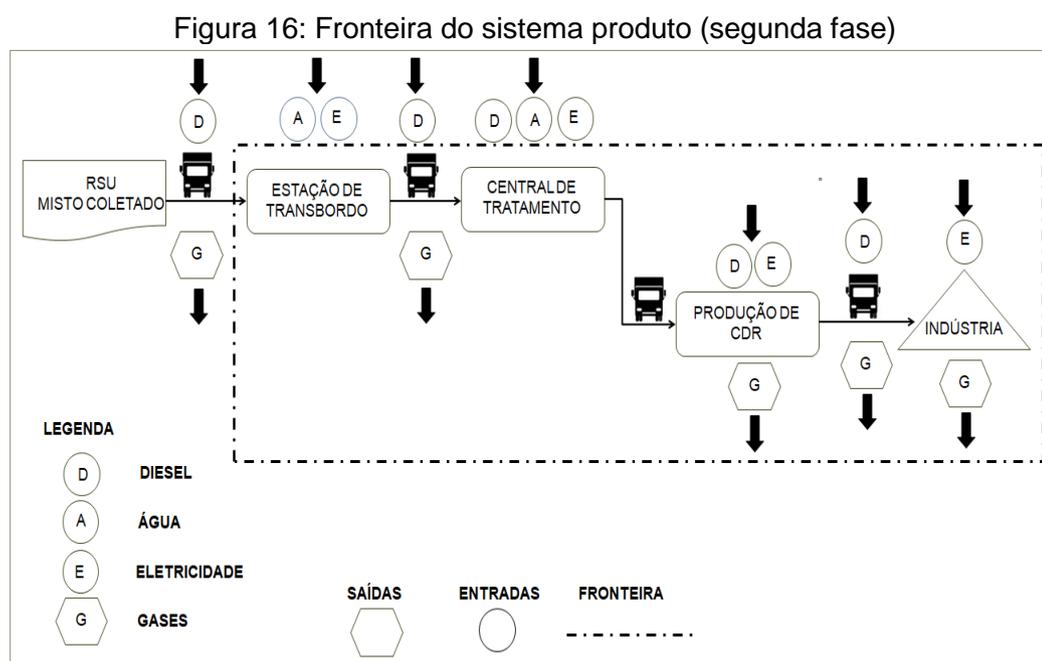
Os processos de transporte de Município de Paulista-PE à Central de Tratamento de Resíduos, de triagem (manual e automática) e de produção de CDR, configuram-se na fronteira da primeira fase do estudo (Figura 15), na qual se analisa o impacto processual. Dessa forma, nesta fase realizou-se uma ACV de forma parcial, na qual avaliou a Pegada de Carbono do gerenciamento de RSU para produzir CDR, optando-se pela determinação de um Inventário de Ciclo de Vida (ICV), que é composto pelas duas primeiras etapas da ACV: definição de objetivo e escopo e análise do inventário. Quando a realização do ICV é restrita ao processo dentro das companhias, é realizado um estudo “do berço ao portão da indústria” (VERSCHOOR; REIJNDERS, 1999). Assim, este estudo considerou a ACV do berço ao portão, quantificando a carga ambiental do CDR desde o transporte do RSU que entra no sistema de produção (berço) ao produto produzido pronto para comercialização (portão).



Fonte: Autor (2021)

A segunda fase do estudo trata-se de uma análise da cadeia de produção e consumo, desde a extração de recursos até a disposição final, tendo como destino final a queima em fornos das fábricas de produção de cimento. Além disso, para fins de comparação, também teve lugar um ICV do coque de petróleo, combustível fóssil

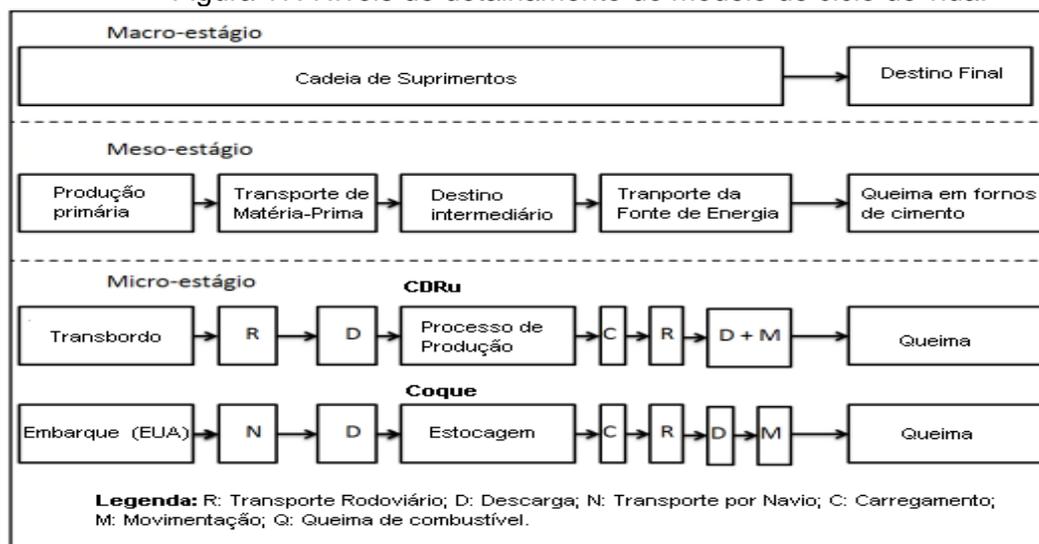
mais utilizado para queima na indústria cimenteira. Nessa fase, considerou a ACV do berço ao túmulo, no qual foi utilizado o procedimento proposto por D'agosto e Ribeiro (2009), para analisar as entradas e os aspectos ambientais do Ciclo de Vida de um produto para o caso da cadeia de suprimentos de combustíveis de transporte, através da: fase 1 - definição da abrangência e das dimensões, fase 2 - coleta de dados para a análise do inventário, fase 3 - avaliação da qualidade dos dados e por fim, fase 4 - comparação dos resultados obtidos (Figura 16).



Fonte: Autor (2021)

Foram considerados três níveis de detalhamento para o comprimento do estudo: macro, meso e micro estágios (Figura 17). Por meio desta abordagem, pode-se realizar refinamentos sucessivos à medida que se disponha de um maior detalhamento dos estágios e dos processos (D'AGOSTO; RIBEIRO, 2009). Assim, as comparações entre os ciclos de vida do CDR e do Coque com os níveis de detalhamento foram realizadas por meso-estágio, uma vez que os processos da fase de micro-estágio são específicos para cada ciclo de vida (ROCHA, 2014). A análise comparativa foi realizada seguindo os passos de Rocha (2014), através dos valores obtidos da ACV do Coque de Petróleo, com adaptação na estimativa de emissões de tCO_2 na etapa de transporte da fonte de energia para a área de estudo.

Figura 17. Níveis de detalhamento do modelo de ciclo de vida.



Fonte: Adaptado a partir de ROCHA (2014)

De acordo com estimativas do PCI dos principais componentes do CDR de três rotas analisadas e do PCI do coque, foi possível calcular a quantidade de combustível fóssil substituída, permitindo estimar a diminuição nas emissões atmosféricas no ano (Equação 1). A variação do PCI nos componentes principais do CDR (plástico, papel e resíduos têxteis), em função da composição gravimétrica e a Equação apresenta a expressão utilizada para calcular as emissões evitadas com a substituição do coque (SOARES, 2011; TAVARES, 2018; SILVA, 2021).

$$[Es = r * QCDR * (PCI_{cdr} / PCI_{coque})]$$

Equação 1

Onde:

Es: São as emissões evitadas pela substituição do coque por CDR (kg CO₂.ano⁻¹);

r: é o fator de redução específico de emissões (kg CO₂ kg.CDR⁻¹);

QCDR: é a quantidade de CDR utilizada nos fornos (kg.ano⁻¹);

PCI CDR: é o poder calorífico inferior do CDR (kcal.kg⁻¹);

PCI Coque: é o poder calorífico inferior do coque.

b) Análise de Inventário do processo produtivo de CDR

Os processos utilizados no inventário incluem desde o transporte dos RSU (matéria-prima), triagem (manual e automática) e produção (CDR), bem como o consumo de energia e combustível nessas etapas. Os dados de entrada referentes ao sistema produtivos foram obtidos de literatura, manuais técnicos e dados

públicos. Já as informações relacionadas à produção dos insumos e transporte foram obtidas na base de dados do *Ecoinvent 3* (FRISCHKNECHT et al., 2007).

A ACV do berço ao túmulo do CDR e do Coque de petróleo foi quantificada para a análise comparativa, através dos fatores de emissão obtidos na última etapa do ciclo e vida referente à disposição final, a qual é atribuída à queima dos combustíveis nos fornos das cimenteiras. Como as tecnologias de processamento, transporte e produção, tanto do CDR como do Coque, não sofreram alterações significativas recentemente, foram considerados dados dos últimos 10 anos. O CDR foi gerenciado como um resíduo, sendo disposto corretamente, e reaproveitado como combustível em destino adequado. Por isso, não foram quantificadas as emissões provenientes do processo produtivo e logístico do RSU em sua vida útil.

c) Avaliação dos Impactos

Essa fase tem a finalidade de compreender e analisar o impacto ambiental causado pelo consumo de matéria-prima e a emissão dos rejeitos identificados no momento do inventário. O mais importante nessa fase é a redução da poluição originada por um determinado processo em que um dos fatores responsáveis para tal é a utilização indiscriminada de elementos ecológicos, implicando em um alto grau de degradação ambiental (GIANNETTI; ALMEIDA, 2006).

O processamento dos dados coletados através dos cálculos e modelagem foram realizados com auxílio do *software* Simapro, na versão 9.2.0.2 (GOEDKOOP et al., 2016). O Simapro oferece diversos métodos para o cálculo de impactos ambientais, dentre os quais foi selecionado o método para a quantificação das contribuições de emissões atmosféricas para o problema das mudanças climáticas, proporcionando a Pegada de Carbono.

A determinação do impacto ambiental potencial do processo de produção do CDR foi realizada pelo do método *Single Issue* na categoria IPCC 2013 GWP 100a. Este é utilizado para impactos com abrangência de aplicação global de mudanças climáticas (GWP), sendo um dos mais usados para tal fim, expressado em kg CO_{2-eq}. Este método utiliza os fatores de conversão atualizados do IPCC para a quantificação das contribuições de emissões atmosféricas e caracteriza as diferentes emissões de GEE, de acordo com o potencial de aquecimento global em

100 anos. Além da metodologia do IPCC 100a, para o impacto ambiental referente à queima dos componentes do CDR na indústria do cimento, foi utilizado o método *USEtox 2*, que avalia as categorias de ecotoxicidade e ecotoxicidade humana.

d) Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade permite verificar os resultados considerando uma variável, de acordo com a modificação de suas quantidades, o que facilita as tomadas de decisões (BLANK; TARQUIN, 2008). Esta foi realizada para examinar diferentes cenários de composição gravimétrica do RSU. Para tanto, foram analisadas as variações dos componentes principais do CDR em três rotas distintas, no município estudado. Dessa maneira, foram estudados os percentuais da composição gravimétrica, a fim de verificar a influência dessas variantes no poder calorífico e nas emissões de Carbono emitida por esses materiais no processo de queima nos fornos das cimenteiras.

3.3.5 Análise do Potencial Energético

O processo metodológico visou verificar o potencial de produção de CDR no município de Paulista-PE e comparar com outras tecnologias de tratamento térmico de RSU através de análise multicritério. O processo de tomada de decisão incluiu os critérios para determinação das prioridades de acordo com graus de importância. O método escolhido para auxiliar a tomada de decisão de escolha da melhor alternativa é baseado nos conceitos do processo de Análise Hierárquica de Processos (AHP), que é um método de auxílio na tomada de decisão entre múltiplas alternativas (SAATY; VARGAS, 2001). Esta baseia-se em comparações múltiplas binárias de atributos quantitativos e qualitativos, possibilitando comparar alternativas variadas e mostrar em ordem de prioridade a mais indicada em estrutura hierárquica (COSTA, 2006).

Realizou-se um aprimoramento do método AHP a partir das integrações relacionadas à solução do problema proposto (COSTA, 2006, MENDES; STHEL, 2017). Assim, o trabalho foi dividido da seguinte forma: (i) Formulação do problema; (ii) Levantamento dos critérios; (iii) Análise de especialistas; (iv) Modelagem do

problema utilizando o método AHP; e (v) Resultado final. A análise foi dividida em duas fases, sendo a primeira a realização de uma AHP pela avaliação de critérios de viabilidade para tratamento térmico de RSU. Já a segunda foi uma avaliação do potencial de produção do município, através da caracterização dos resíduos e viabilidade, de acordo com características pré-estabelecidas por especialistas.

a) Análise Hierárquica de Processos

O ato de tomar decisões através da análise multicritério visa a solução de problemas com múltiplas alternativas, critérios e subcritérios de importância relativa, se tornando um importante instrumento de uso crescente no âmbito da tomada de decisão, através de hierarquias (COSTA, 2006). De acordo com Saaty (1990), o AHP avalia alternativas com o objetivo de indicar a melhor em ordem de prioridade, através de critérios estabelecidos pelo tomador de decisão. Esse método permite a modelagem de um problema, com graus de certeza e incerteza, através de dados quantitativos e qualitativos (SAATY; VARGAS, 2001).

Dentre métodos de Auxílio Multicritério à Decisão (AMD), o AHP é o método mais utilizado em diversas áreas de conhecimento, pois auxilia a resolução de problemas complexos, através de critérios conflitantes e subjetivos (ISHIZAKA; LABIB, 2011; MENDES et al., 2019). Na área de escolhas de tecnologias para tratamento de resíduos, foco desse trabalho, esse método é o mais utilizado (MÜLLER et al., 2021).

O AHP está baseado em três princípios do pensamento analítico, que sintetizam as etapas para a construção do modelo multicritério (COSTA, 2006). O primeiro princípio utiliza o método AHP para estruturar o problema em hierarquias, na resolução de qualquer problema, de modo que possibilite uma melhor avaliação e compreensão, no qual exhibe foco, alternativas a serem analisados, critérios, os especialistas e o responsável pela tomada de decisão final. Dessa forma, tem-se a separação do problema por níveis hierárquicos, com a criação da árvore hierárquica. Para Brunelli (2014), a construção da árvore colabora com a melhor visualização do problema, bem como a divisão do problema em subgrupos.

No segundo princípio se define as prioridades e julgamentos, de forma que as prioridades de um critério sobre outro ou de uma alternativa sobre outra são

estabelecidas, através de comparações, par a par, fundamentadas na observação de especialistas, que determina a importância relativa entre estes, através de prioridades analisadas num consenso (BANDEIRA et al., 2010). O terceiro princípio é conhecido como o princípio da consciência lógica, onde é realizada a comparação de cada alternativa, critérios e subcritérios em questão, o que torna mais fácil e mais preciso a opinião dos especialistas (COSTA, 2006). O método se baseia em comparações paritárias por tomadores de decisão que avaliam preferências entre alternativas, utilizando critérios diferentes (TAYLOR, 2010).

Para Alves e Alves (2015), mesmo que os profissionais da área possuam conhecimento e experiência, podem ocorrer inconsistências em seus julgamentos, principalmente quando se tem diversas comparações a serem feitas no modelo. Portanto, é importante que haja uma forma de validar as avaliações e assegurar que estas são consistentes. A metodologia AHP indica que a fase de avaliação seja procedida por meio de julgamentos os critérios, subcritérios e alternativas em matrizes quadradas, cujos elementos recomendam a importância de um objeto em relação a outro. Saaty e Vargas (2001) sugerem a utilização de uma escala de razão, representando a intensidade em preferência ou importância relativa de nove pontos (Tabela 2).

Tabela 2. Escala fundamental para julgamentos comparativos de Saaty

GRAU DE IMPORTÂNCIA	DEFINIÇÃO	EXPLICAÇÃO
1	Mesma importância	Ambos atributos contribuem igualmente para o objetivo
3	Pouca importância	A experiência e o julgamento favorecem fortemente um atributo em detrimento do outro
5	Importância forte	A experiência e o julgamento favorecem ligeiramente um atributo em relação ao outro
7	Importância muito forte	Um atributo é fortemente favorecido em relação ao outro; seu predomínio de importância é demonstrado na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorece um atributo em detrimento do outro com o alto grau de certeza
2,4,6,8	Valores intermediários ou adjacentes	Procura uma condição favorável entre duas definições.

Fonte: Saaty; Vargas (2001)

Após a escolha preferencial de cada alternativa ou critério, toma-se como referência o elemento de um nível superior, para então gerar a matriz quadrada de decisão, na qual são ordenados os objetos em relação à escala de importância ou preferência, fornecendo uma prioridade relativa. Segundo com Saaty (1980), os autovetores representam a média das possíveis maneiras de comparação dos objetos, através da matriz de decisão, e são associados ao maior autovalor da matriz que representa.

Uma comparação entre o maior autovalor e a ordem da matriz determina uma medida de inconsistência dos julgamentos representados na matriz. Segundo Saaty e Vargas (2001), a inconsistência é um fator próprio ao ser humano, devendo haver uma tolerância dentro de certos parâmetros para a sua validação. Os autores propõem um critério para o cálculo do Índice de Consistência (IC) (Equação 2):

$$IC = |(\lambda_{\text{máx}} - n)| \cdot (n-1)^{-1} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

(n) é a ordem da matriz;

($\lambda_{\text{máx}}$) o estimador de autovalor máximo de julgamentos.

Para o cálculo do estimador de autovalor máximo é usado a seguinte fórmula (Equação 3):

$$\lambda_{\text{máx}} = T \cdot w \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

(T) é o somatório das colunas das matrizes;

(w) é o autovetor normalizado para $\sum v_i = 1$.

Para avaliação da inconsistência em função da ordem máxima da matriz de julgamento, usa-se a Razão de Consistência (RC) através da fórmula (Equação 4):

$$RC = IC \cdot IR^{-1} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

(IR) é um índice randômico de consistência obtido para uma matriz recíproca, com elementos não negativos gerados de forma randômica (tabela 3).

Tabela 3. Índice randômico de consistência (IR)

Matriz de Ordem (n)	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor de IR	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.51

Fonte: Saaty e Vargas (2001)

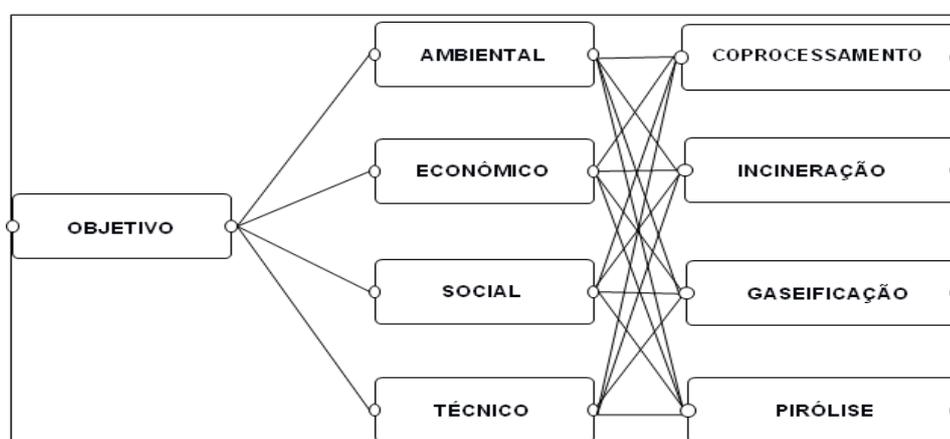
Segundo Saaty e Vargas (2001), serão considerados consistentes os julgamentos da matriz de decisão que: $RC = 0$ para $n = 2$, $RC < 0,05$ para $n = 3$, $RC < 0,09$ para $n = 4$ e $RC \leq 0,10$ para $n > 4$. Caso adverso, indica que existe alguma inconsistência nos julgamentos e o especialista deve ser requerido a rever a sua opinião.

b) Aplicação do Método

Os critérios adotados nessa pesquisa foram estabelecidos mediante pesquisa elaborada por Mendes, Pereira e Sthel (2019). Dessa forma, foram utilizados os critérios comumente aplicados para esse tipo de problema, que são critérios ambientais, econômicos, sociais e técnicos.

Para as tecnologias de tratamento térmico, foram utilizadas estratégias específicas para coprocessamento de CDR, incineração, gaseificação e pirólise. Posteriormente, seguindo os passos de Silva (2017b), foi montada a árvore hierárquica, através da análise das alternativas, e a atribuição de pesos aos critérios e subcritérios, realizada por especialistas que possuam domínio do tema presente dentre as opções da pesquisa, a partir da técnica *Brainstorming* (Figura 18).

Figura 18. Árvore hierárquica para a análise do Potencial Energético



Fonte: Autor (2021)

Após o levantamento bibliográfico e de campo sobre as características relevantes para a viabilidade técnica para a produção de RDF, foram definidos seis critérios: poder calorífico inferior (PCI), nº de habitantes (HAB), índice de sustentabilidade urbana (ISLU), distância entre o município e o mercado consumidor de RDF (DIST), quantidade de RSU gerado (QTD) e composição gravimétrica dos RSU (GRAV). Esses critérios foram avaliados de acordo com resultados esperados descrito por autores, sendo possível a formulação do problema em relação ao potencial municipal.

Assim, foram estabelecidas as preferências, segundo os critérios técnicos previamente estabelecidos, através de questionário preenchido por especialistas da área de tratamento de resíduos. Em seguida, foram determinadas as preferências em cada um dos seis critérios considerados, ou seja, o grau de importância de um em relação aos outros. Os especialistas atribuíram valores numa escala de 1 a 5, sendo 1 - menos importante e 5 - mais importante (ALVES; ALVES, 2015).

c) Determinação do Poder Calorífico

A análise do PCI - Poder Calorífico Inferior (quantidade de calor transferida com a água presente nos produtos de combustão no estado vapor) e PCS - Poder Calorífico Superior (quantidade de calor transferida com a água presente nos produtos de combustão no estado líquido) foi realizada das seguintes formas:

- Teórica:

Para a determinação do PCI associado aos componentes do CDR, por requerer insumos com PCI de, ao menos, $2.000 \text{ kcal.kg}^{-1}$, foram analisadas parcelas de materiais não valorizados na triagem para reciclagem, porém com elevado poder calorífico como resíduo de papel, plástico e têxtil. Foi utilizada a fórmula para cálculo do PCI do RSU elaborada por Themelis (2003), abaixo, de forma adaptada, considerando que os vidros e metais seriam retirados na íntegra (Equação 5). Considerando o valor $1 \text{ kJ.kg}^{-1} = 0,238846 \text{ kcal.kg}^{-1}$, o resultado em kcal.kg^{-1} foi dividido por 4,1868, pois $1 \text{ kcal.kg}^{-1} = 4.1868 \text{ kJ.kg}^{-1}$. Devido à ausência de dados

específicos, utilizou-se o valor típico de 60% como estimativa do teor de água (X_{H_2O}) nos componentes do RSU (EPE, 2014).

$$\text{[PCI RSU misto} = 18400X_{\text{comb}} - 2636X_{H_2O} - 628X_V - 544X_M \text{ kJ.kg}^{-1} \text{] Equação (5)}$$

Onde:

X_{comb} = participação da fração Combustível (plástico, papel e têxtil);

X_{H_2O} = teor de umidade;

X_V = participação de vidro;

X_M = participação de metal.

Apesar do cálculo do PCI aparentar parâmetros reconhecidos em diversas metodologias disponíveis, é importante destacar que todos os métodos disponíveis são voltados para materiais homogêneos, não existindo uma metodologia aceita para RSU. Dessa forma, a análise teórica calculada foi comparada com o resultado experimental. Assim, para determinação do PCI em laboratório, foi realizada a análise utilizando Calorímetro Digital Automático (POLI et al., 2013).

- Experimental:

Foi realizada a análise do PCI e do PCS, utilizando em todas as análises calorimétricas o Calorímetro Digital Automático IKA – WERKE, modelo C2000, de acordo com a NBR 8633 (ABNT, 1984).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo representa os resultados e suas respectivas discussões através de comentários e interpretação dos dados da pesquisa.

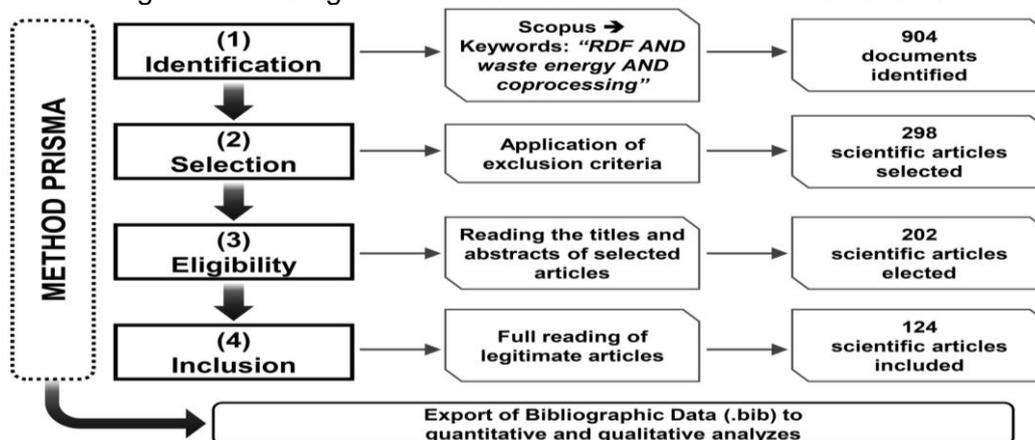
4.1 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Nesta seção os dados coletados serão analisados através de indicadores bibliométricos mensurando a contribuição do conhecimento científico derivado das publicações sobre o tema de estudo.

4.1.1 Busca de dados

A busca de dados utilizando o método PRISMA, teve como resultado a localização de 904 publicações, no qual foram aplicados critérios de seleção, elegibilidade e inclusão, reduzindo a amostra para 124 artigos científicos para análise da produção científica (Figura 19). A diferença entre o número de documentos localizados entre a fase de identificação até a fase inclusão aponta a relevância da metodologia inicial para análise de indicadores bibliométricos, pois permite uma sistematização que minimiza o surgimento de vieses na produção de revisões de literatura. Além disso, o método PRISMA permite maior velocidade na leitura, na análise e no processamento das informações existentes e da investigação do estado da arte dos trabalhos relacionados (PACHECO et al., 2018).

Figura 19. Fluxograma sistemático da busca na base de dados.

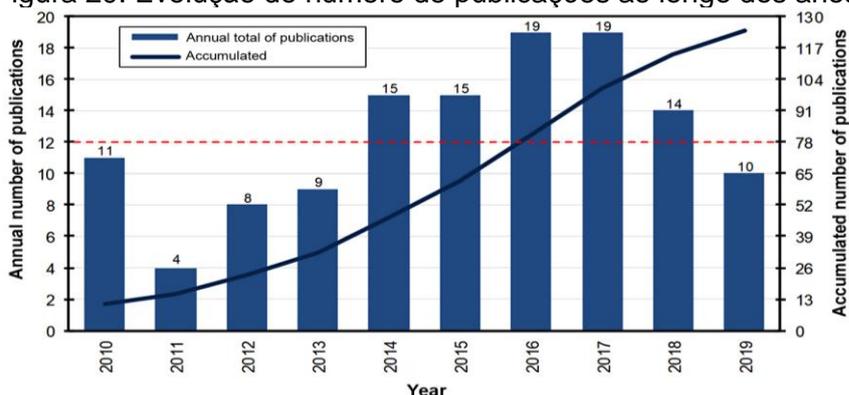


Fonte: Autor (2021)

4.1.2 Evolução Temporal das Publicações

Ao analisar a evolução do número de publicações ao longo dos anos, nota-se um aumento gradual, com exceção dos anos de 2018 e 2019 (Figura 20). Assim, pode-se afirmar que essa área de estudo se encontra em evidência, sendo objeto de estudo de pesquisadores devido à possibilidade de descobertas científicas que contribuam para aplicação dessa tecnologia de destinação de resíduos sólidos. O número de trabalhos referentes aos anos de 2016 e 2017 teve maior contribuição. Já o ano de 2011, foi o que teve menor quantidade de artigo científico sobre CDR. Ainda, verifica-se uma queda no número de publicações nos dois últimos anos analisados, 2018 e 2019. Contudo, acredita-se que isso não representa uma redução do interesse no tema estudado.

Figura 20. Evolução do número de publicações ao longo dos anos



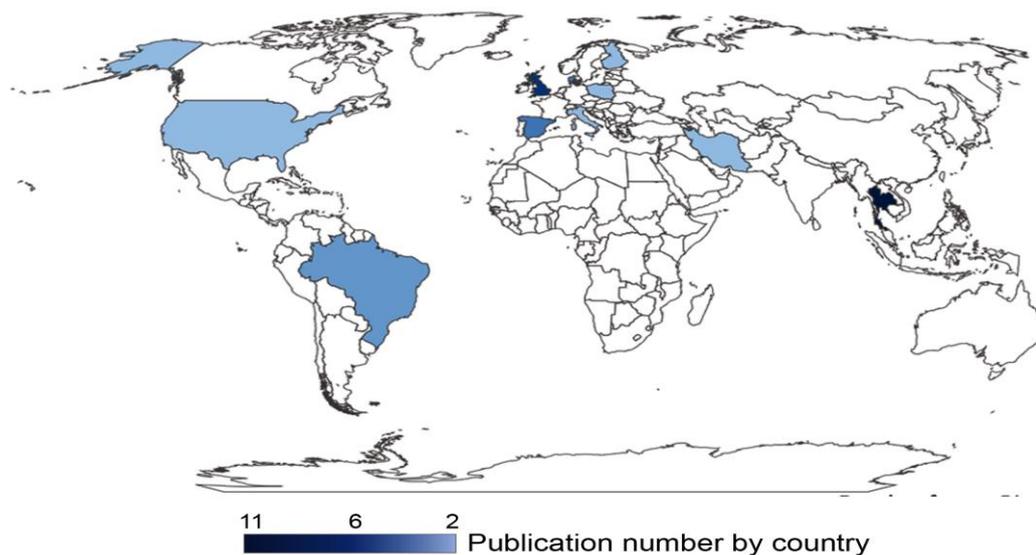
Fonte: Autor (2021)

A média de publicações anuais foi igual a 12, aproximadamente. Logo, nota-se que os anos de 2014, 2015, 2016, 2017 e 2018 tiveram uma quantidade acima da média, provocando uma acentuação do crescimento da linha correspondente ao número acumulado de artigos publicados. A contínua ascensão da quantidade de publicações relacionadas à destinação de resíduos através da produção de CDR indica que o campo de pesquisa estudo tem sido bastante explorado. Com isso, pode-se prever que o número de publicações relacionadas a esta área de estudo tenderá a continuar crescendo com o desenvolvimento de novas pesquisas que comprovam a eficiência da geração de combustível a partir de resíduos sólidos (LIU et al., 2019).

4.1.3 Distribuição das publicações

Considerando os autores correspondentes dos 124 artigos, percebe-se que apenas 10 países possuem duas ou mais publicações: Tailândia com 11, Reino Unido com sete, Dinamarca e Espanha com quatro, Brasil com três e Finlândia, Irã, Itália, Polônia e Estados Unidos com duas, totalizando 39 artigos (Figura 21). Ainda considerando os 10 países que têm duas ou mais publicações, nota-se que o continente europeu foi o que teve maior contribuição, com 21 publicações, seguido do continente asiático, com 13 publicações, e o continente americano, com cinco. Os resultados obtidos se mostram coerente com a história do CDR, pois apontam que o primeiro uso foi durante o fim do século XIX, aparentemente na Inglaterra e rapidamente adotada nos Estados Unidos, na Alemanha e no Japão (HARVEY, 1987). Na última década, países em todo o mundo têm explorado maneiras de usar melhor a tecnologia de produção de CDR, principalmente os países desenvolvidos, tais como Estados Unidos, países europeus e asiáticos (MUKHERJEE et al., 2020).

Figura 21. Principais países com publicações na temática



Fonte: Autor (2021)

Ainda considerando os autores correspondentes dos artigos, tem-se que sete instituições possuem duas ou mais publicações (Tabela 4). A distribuição das instituições pelos continentes dos locais de estudo sugere um interesse global pelo assunto, principalmente de economias de maior renda – Dinamarca, Estados Unidos, Espanha, Finlândia e Inglaterra; mas também de economias de renda média

– Tailândia e Brasil. É importante destacar que boa parte com foco a produção de CDR por meio do tratamento de resíduos sólidos, aplicados no coprocessamento.

Tabela 4. Principais instituições com publicações na temática

Instituições	País	Número de artigos
Chiang Mai University	Thailand	5
Technical University of Denmark	Denmark	3
Center of Excellence on Energy Technology and Environment	Spain	2
Lappeenranta University of Technology	Finland	2
NC State University	United States	2
Newcastle University	England	2
University of So Paulo	Brazil	2

Fonte: Autor (2021)

De acordo Boonpa e Sharp (2017), o governo da Tailândia considera a produção de CDR como tecnologia renovável, pois, além de reduzir a quantidade e melhorar a qualidade dos resíduos para atender aos padrões de controle de poluição exigidos, também gera uma quantidade substancial de energia. Tais políticas públicas de gestão para a produção de CDR podem ter elevado o número de pesquisas sobre a temática nesse país, sendo que esse fato pode ter contribuído para produção de artigos científicos oriundos da Chiang Mai University na Tailândia.

Os artigos estão distribuídos em 26 periódicos, sendo que 71% dos artigos foram publicados em apenas cinco (Tabela 5). As principais revistas foram *Waste Management*, com 48 artigos; *Journal of Cleaner Production*, com 16 artigos; *Waste Management and Research*, com 10 artigos; *Resources Conservation and Recycling* e *Waste and Biomass Valorization*, ambas com sete artigos. Considerando o alto fator de impacto desses periódicos em destaque, tem-se que a maioria dos trabalhos analisados apresenta boa qualidade. Estes foram submetidos a rigorosos processos de avaliação para publicação em revistas conceituadas em relação às métricas de impacto que, para esses periódicos, correspondem em média a 5.280 para o Fator de Impacto (2019) e 8.8 para o *Citescore* (2019), aproximadamente.

Tabela 5. Discriminação dos periódicos por total de publicações e métricas de impacto

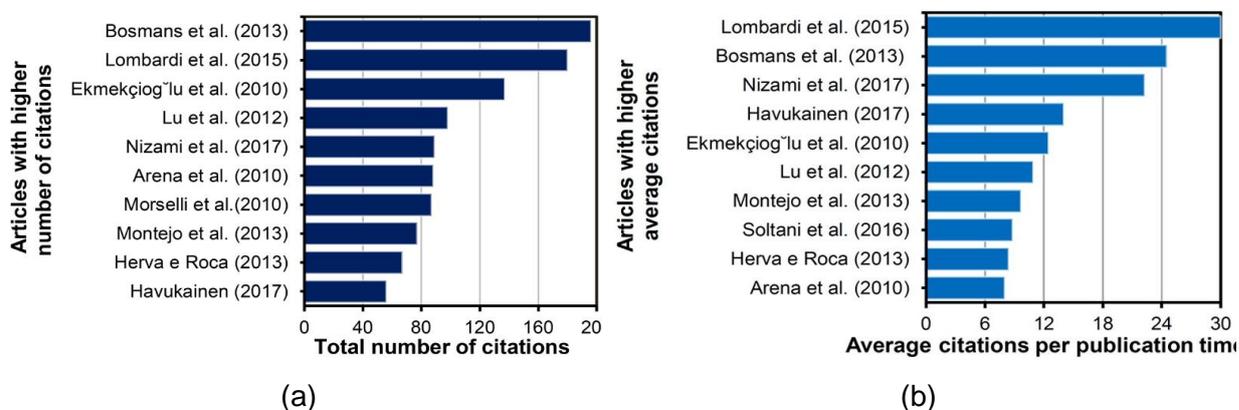
Revistas	Distribuição dos artigos		Métricas de impacto	
	Quantidade	Contribuição	CiteScore 2019	Fator de Impacto 2019
1 Waste Management	48	38,71%	9.6	5.448
2 Journal of Cleaner Production	16	12,90%	10.9	7.246
3 Waste Management and Research	10	8,06%	3.9	2.771
4 Resources Conservation and Recycling	7	5,65%	10.7	8.086
5 Waste and Biomass Valorization	7	5,65%	-	2.851
Total	88	70,97%		

Fonte: Autor (2021)

4.1.4 Análise das citações dos artigos

Ao analisar os 10 artigos com as maiores quantidades de citações e os 10 artigos com as maiores médias de citações por tempo de publicação do trabalho (Figura 22), constata-se que desses nove estão nas duas análises, comprovando a importância desses artigos e dos seus correspondentes autores para o tema abordado nesse estudo.

Figura 22. Análise das citações dos artigos: (a) os 10 artigos com maiores números de citações; e (b) os 10 artigos com maiores médias de citações por tempo de publicação.



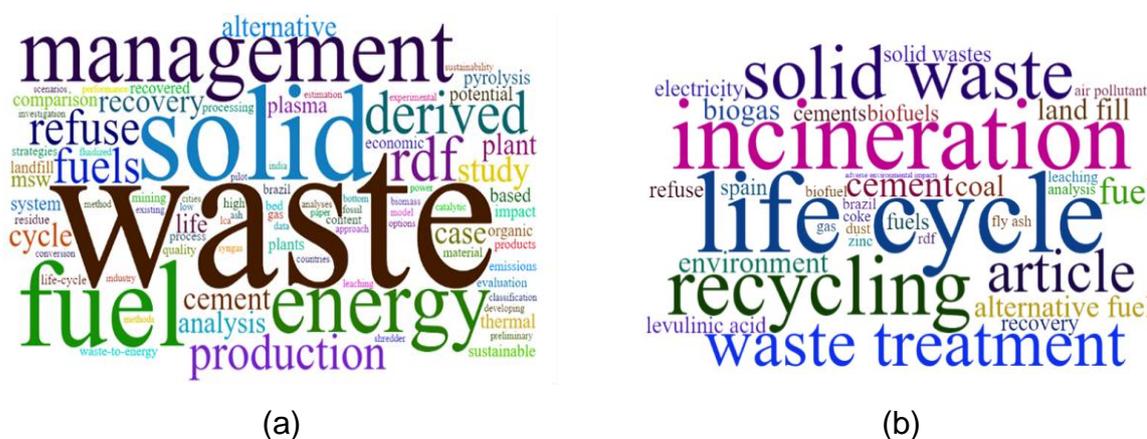
Fonte: Autor (2021)

Considerando esses artigos amplamente citados categorizados pelo banco de dados da *Scopus* obtiveram destaque com maior contribuição nas duas categorias analisada: Bosmans et al. (2013) e Lombardi et al. (2015). Estes autores trouxeram revisões abrangentes de conceitos, de características e de fatores que são básicos no estudo do CDR, servindo de base para as pesquisas que abordam a temática. Ainda, em termos de área de pesquisa, estes dois autores analisaram a questão de energia de resíduos através de revisão das tecnologias e desempenhos do tratamento térmico de sistemas para recuperação de energia dos resíduos.

4.1.5 Frequência de Palavras

Através da frequência de repetição das palavras dos documentos analisados, foi gerada uma lista ordenada de termos predominantes. Os termos que apresentaram maior ênfase na análise textual destacam-se na área central e apresentam maior tamanho (Figura 23). A maioria das palavras nos títulos dos artigos concentra-se em palavras relacionadas ao tema e ao contexto do estudo, sendo as principais: *waste*, *solid*, *fuel*, *energy* e *management*. Os termos mais frequentes na nuvem referente às palavras utilizadas nos resumos mostram uma ênfase nos métodos, destacando a indústria da reciclagem energética, ciclo de vida e incineração, sendo as principais: *life cycle*, *incineration*, *recycling*, *solid waste* e *waste treatment*.

Figura 23. Nuvem de palavras formadas a partir: (a) dos títulos; (b) dos resumos



Fonte: Autor (2021)

Em relação à análise de redes por coocorrência de termos localizados nos títulos e nos resumos (Figura 24), observa-se que a sinergia entre as palavras ocorre em torno do termo *waste*, que possui interligação com todos demais vocábulos que tiveram maiores repetições. Ainda, percebe-se uma ligação mais forte da palavra *waste* com os termos *solid*, *energy*, *management* e *municipal*, demonstrando que as pesquisas tratam basicamente da utilização de resíduos sólidos como fonte de energia, a fim de contribuir com a gestão municipal desses materiais. Secundariamente, destacaram-se os vocábulos *fuel* e *derived*, que juntamente com a palavra *refused* formam o objeto desse estudo, *refused derived fuel*. Ademais, apareceu em destaque um dos processos de conversão energética de diversas fontes, a gaseificação, mostrando que esse processo é um dos mais aplicados mundialmente.

Figura 24. Rede de coocorrência de palavras



Fonte: Autor (2021)

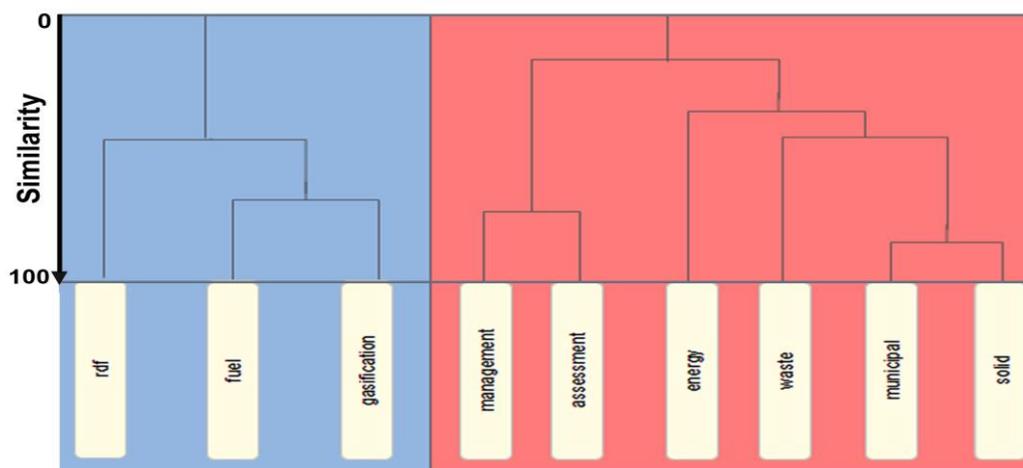
Dessa forma, a identificação da coocorrência das palavras, reforçam os resultados dos filtros aplicados nas etapas de busca e seleção, pois esses termos possuem o mesmo conteúdo semântico, ou seja, relacionados ao tratamento de resíduos sólidos na produção de CDR.

4.1.6 Análise Fatorial

Através da análise da matriz de coocorrências nas palavras dos resumos, observa-se pelo Diagrama de Árvore ou Dendrograma, que exhibe os grupos formados por agrupamento de observações em cada passo e nos níveis de similaridade, como as palavras se correlacionam e formam fatores que pode determinar um campo de estudo (Figura 25). Para Hair et al. (2006), a análise

fatorial é uma técnica de redução de dados que correlaciona itens a fatores.

Figura 25. Análise do Dendrograma



Fonte: Autor (2021)

O Dendrograma foi utilizado para visualizar os nichos do processo e das análises dos níveis de distância dos clusters formados. Seguindo a análise é possível observar dois *clusters*. O primeiro está caracterizado pela aproximação dos termos *RDF*, *fuel* e *gasification*, que são voltados para questão energética. Já o segundo está relacionado ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. O nível de similaridade é medido ao longo do eixo vertical e as diferentes observações são listadas ao longo do eixo horizontal. Esses principais termos encontrados na análise fatorial são considerados variáveis latentes, visto serem observadas no cotidiano, porém importantes para implantação de um estudo ou modelo (LEME et al., 2020).

4.2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DO CDR

Esta seção abordará a técnica de avaliação e quantificação de impactos ambientais possíveis associados a um produto e processo, através da compilação de avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais da tecnologia estudada ao longo do seu ciclo de vida.

4.2.1 Estudo de Caso

O estudo teve como objeto principal a quantificação das emissões de GEE a partir da produção de CDR, considerando para a quantidade $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ por produção mensal de CDR. Para tanto, a área de estudo da pesquisa foi o CTR – PE, localizado em Igarassu – PE, sob as coordenadas -07 43' 14,6"E e -34 56' 34,5"W, que dispões de Aterro Sanitário para resíduos classes I, II-A e II-B. Possui uma área de 106 hectares e estimativa de uma vida útil de 22 anos, o empreendimento recebe aproximadamente 1.500 t.dia^{-1} de RSU gerados em dez municípios de Pernambuco, no qual, para este estudo, foi escolhido os RSU coletados em Paulista-PE. Assim, metade dos RSU que o CTR-PE recebe diariamente são destinadas para a usina de triagem de RSU. Dessas 750 t, aproximadamente 30%, sendo um volume superior a 220 t, são comercializados como materiais recicláveis e CDR, de acordo com dados da Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública (ABLP, 2019).

Durante o processo de produção de CDR no CTR-PE (Figura 26), foram analisados os fluxos de matéria e energia nos processos de transporte, triagem manual e processos automáticos da planta que inclui trituração primária, peneiramento, remoção magnética de materiais ferrosos e não ferrosos, classificação com uso de sensores óticos, trituração secundária e armazenamento. Esse processo resulta numa fração de combustível com maior poder calorífico e composição livre de contaminação ou substâncias orgânicas, tornando um composto de boa qualidade (JUCÁ et al., 2014).

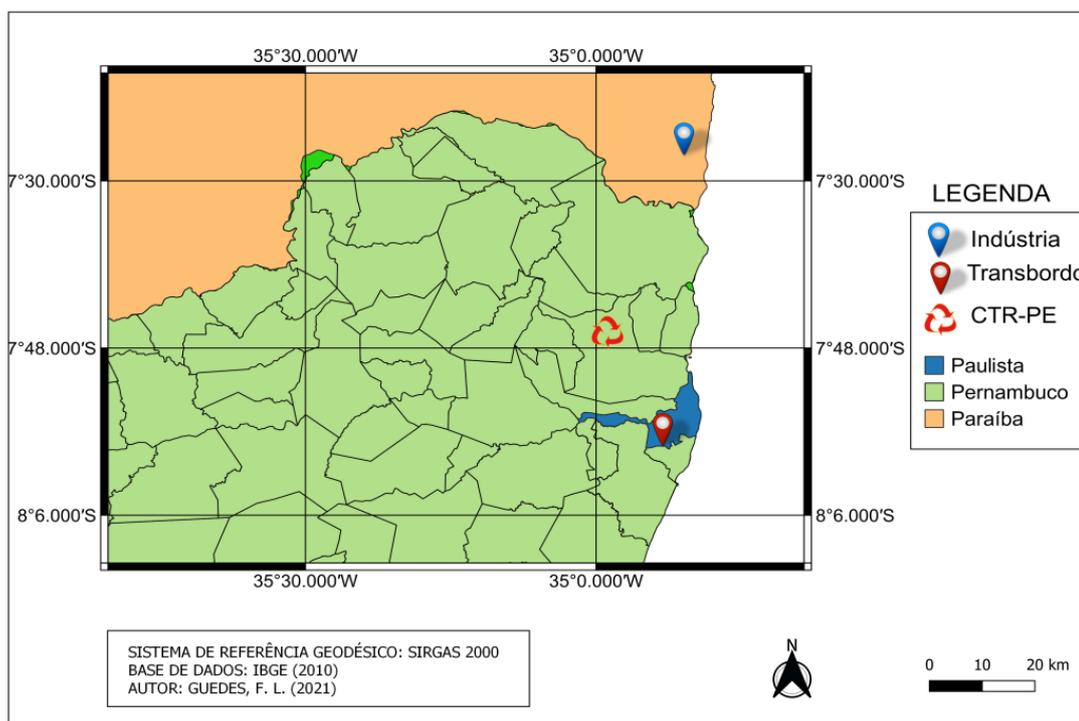
Figura 26. Planta de triagem e produção de CDR em Igarassu-PE.



Fonte: ABLP (2019)

Foram consideradas as estimativas de consumo de combustíveis fósseis aplicadas à rota do produto, desde o transporte da matéria-prima (RSU) até o produto final (CDR). Dessa forma, o percurso perfaz 17,1 km na etapa de transporte de RSU da Estação de Transbordo ao CTR-PE e 45,1 km na segunda etapa de comercialização do CTR à indústria, somando da estação de transbordo à indústria um total de 62,2 km (Figura 27).

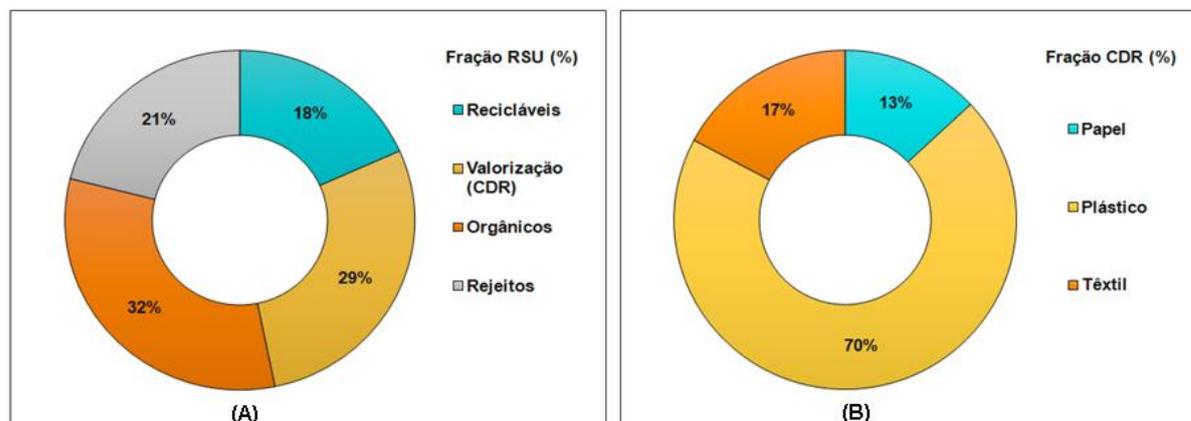
Figura 27. Rota do CDR produzido em Paulista-PE



Fonte: Autor (2021)

Os dados reais no processo de produção do CDR foram estimados através de dados quantitativos dos RSU do município e inventariados por frações de resíduos valorizados para produção de CDR. Dessa forma, de acordo com a análise gravimétrica dos RSU, foi considerado o percentual responsável pela composição principal do CDR, sendo formado pelo composto da mistura de resíduos de papéis, plásticos e resíduos têxteis (Figura 28). Foi observado que o percentual de materiais usados na preparação de CDR é composto, principalmente, por plásticos não valorizados na reciclagem, com cerca de 70% da amostra.

Figura 28. Proporção por tipologia dos RSU do Município de Paulista-PE: (a) Percentual de RSU por gerenciamento; (b) Percentual de Resíduos valorizados para produção de CDR.



Fonte: Adaptado de Tavares (2018)

4.2.2 Inventário e Análise dos Impactos

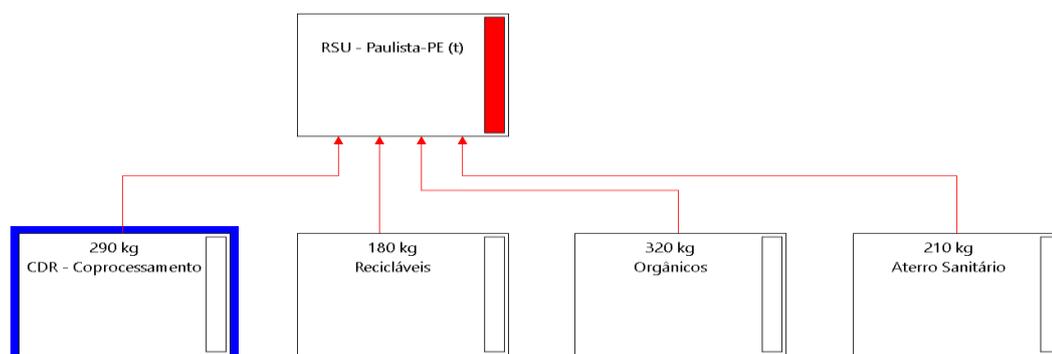
Para fins de ACV, foi considerado o percentual de RSU, de acordo com a caracterização gravimétrica, referente ao material não aproveitado na reciclagem e valorizado na produção de CDR. Assim, para uma tonelada de RSU produzido no município, 290 kg de resíduos tem potencialidades para a transformação em CDR (Figura 29). O balanço de entradas e saídas do ciclo produtivo do CDR foi realizado através da confecção do ICV, sendo a proporção do fluxo do sistema de materiais e energia analisado e estimado de acordo com a unidade funcional adotada do gerenciamento de 1 t de CDR.mês⁻¹ (Quadro 4).

Quadro 4. ICV do processo do ciclo de vida do CDR

Processo	Fluxo	Unidade Funcional	Quantidade	Unidade
Transbordo - CTR	Entradas	RSU	8.100	t
		Diesel	17.928	L
		Eletricidade	4.617	kWh
	Saídas	RSU	8.100	t
		GEE	0,00135	kg CO ₂ -eq
Triagem Manual e Automática	Entradas	RSU	8.100	t
		Diesel	4.536	L
		Eletricidade	9.091	kWh
	Saídas	CDR	2.349	t
		Recicláveis	1.458	t
		Rejeitos	1.701	t
	Orgânicos	2.592	t	
	GEE	0,00287	kg CO ₂ -eq	
Produção/Refino CDR	Entradas	CDR	2.349	t
		Eletricidade	340	kWh
	Saídas	CDR	2.349	t
		GEE	7,64E-5	kg CO ₂ -eq
CTR – Indústria Cimenteira	Entradas	CDR	2.349	t
		Diesel	20.369	L
	Saídas	GEE	0,00412	kg CO ₂ -eq
Queima	Entradas	Plástico	1.644,3	t
		Papel	305,37	t
		Têxtil	399,33	t
		Eletricidade	7.222,22	kWh
	Saídas	GEE	1.644,3	CO ₂ -eq
	Cinzas	0,00	t	

Fonte: Autor (2021)

Figura 29. RSU de Paulista-PE por processos de gerenciamento (1t).



Fonte: Autor (2021)

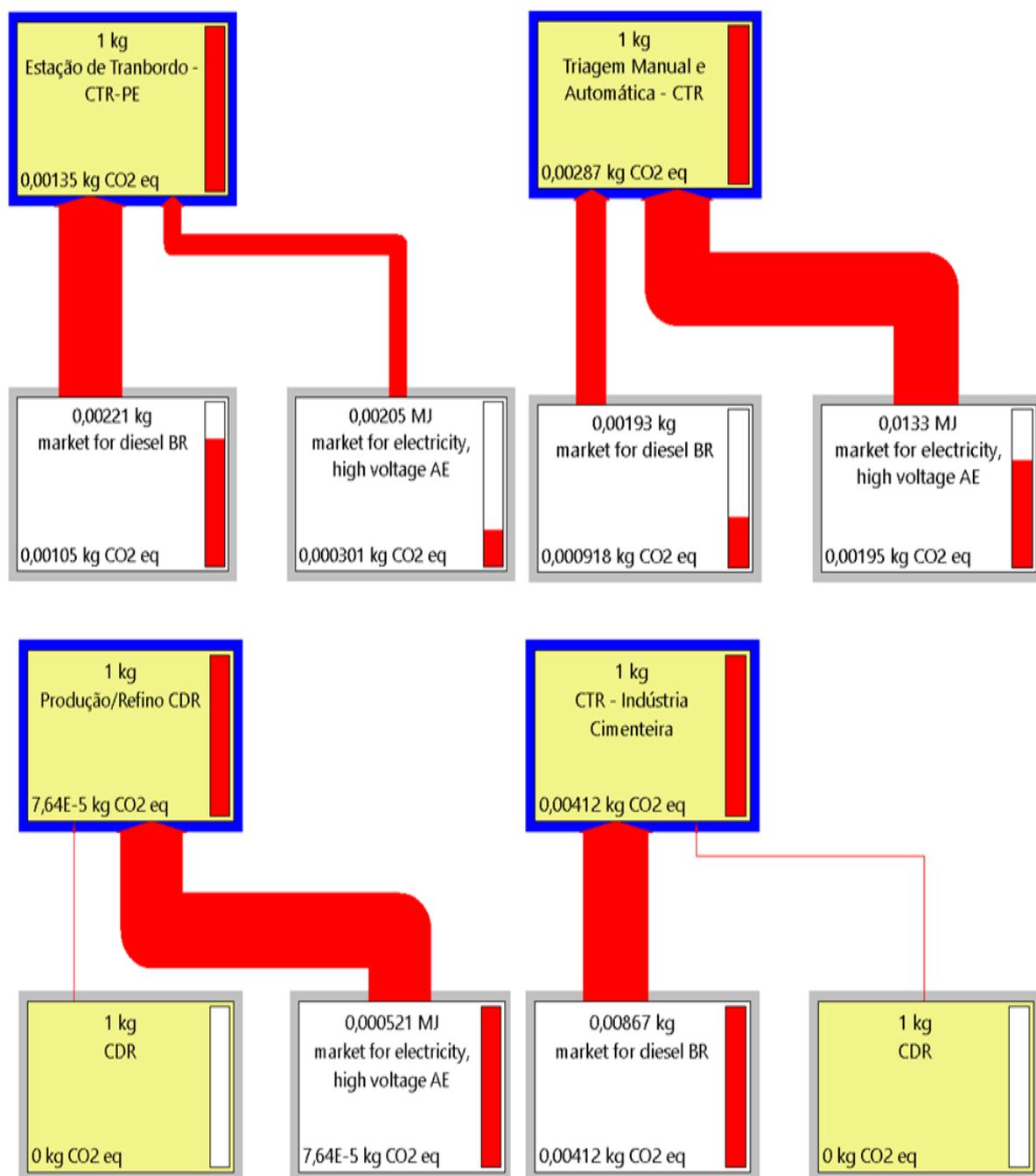
O início do ciclo de vida do CDR foi definido como sendo o carregamento dos caminhões na Estação de Transbordo que fazem o transporte para o CTR-PE, onde o RSU é processado e transformado em CDR. O destino do CDR é a indústria de cimento, onde é utilizado em fornos como combustível, gerando energia térmica. Dessa forma, o inventário refere-se à produção mensal do produto, considerando um mês com 30 dias.

O transporte da matéria-prima do berço ao portão representa a distância percorrida de 62,2 km em cada ciclo berço-túmulo e um consumo de diesel de $42.833 \text{ L.mês}^{-1}$. Essa segregação na etapa de transporte deve ser realizada devido às diferenças nas características dos caminhões utilizados em cada trecho, que implicam em fatores de consumo diferentes (MERRILD; LARSEN; CHRISTENSEN, 2012). Foi contabilizado as emissões referentes ao uso de Diesel de caminhões carretas de capacidade entre 29 e 35 m^3 e escavadeiras hidráulicas utilizadas no processo.

O consumo de energia elétrica na Sede da Estação de transbordo e no CTR-PE foram inventariados no processo, bem como a energia utilizada na Planta de triagem e produção de CDR, o que contabilizou $21.270,22 \text{ kwh.mês}^{-1}$.

Na análise do impacto processual berço ao portão, foi verificado que nas etapas referentes ao processo de fabricação de CDR, o maior impacto na categoria de mudanças climáticas refere-se ao consumo de combustível, com uma contribuição de $14,3 \text{ tCO}_{2\text{-eq.ano}}^{-1}$. Este é seguido pelo uso de energia elétrica com $5,46 \text{ tCO}_{2\text{-eq.ano}}^{-1}$, que somando toda cadeia produtiva do processo é responsável por um total de $19,77 \text{ tCO}_{2\text{-eq.ano}}^{-1}$ (Figura 30).

Figura 30. Etapas ICV do impacto processual

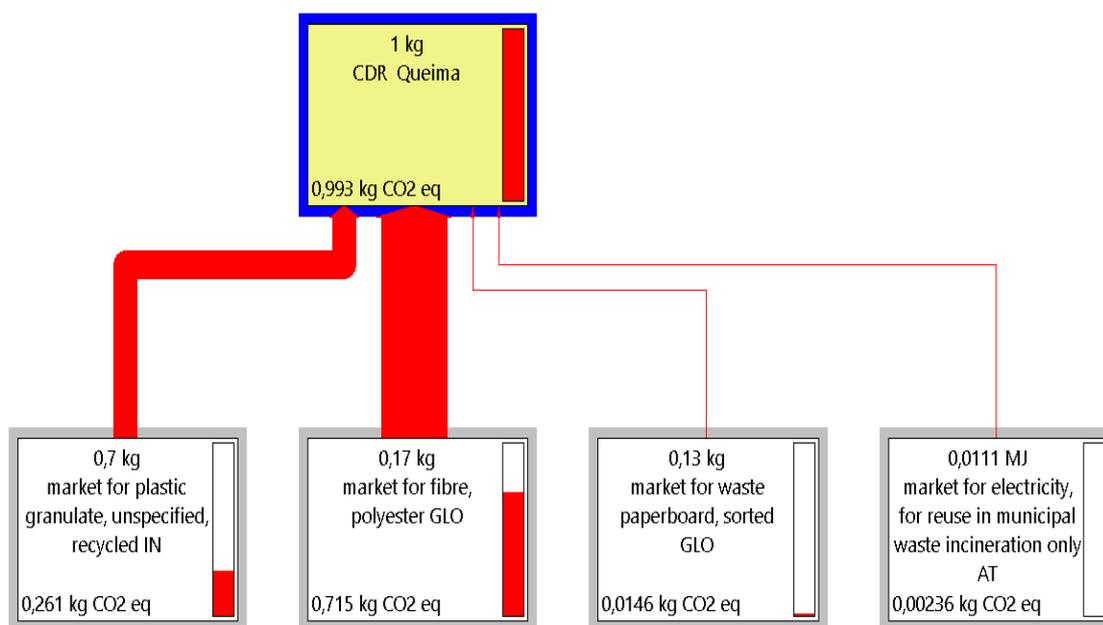


Fonte: Autor (2021)

No processo de queima do CDR nos fornos de cimento, foi observado uma contribuição maior de CO₂-eq emitido com a queima de resíduos têxteis, com 20.150 tCO₂-eq.ano⁻¹, e resíduos de plásticos, com 7.360 tCO₂-eq.ano⁻¹. Tais quantitativos

somam ao processo uma emissão de 27.990 tCO_{2-eq}, perfazendo um total anual de 28.160 tCO_{2-eq}.ano⁻¹ emitidos durante a queima (Figura 31).

Figura 31. Processo de queima do CDR

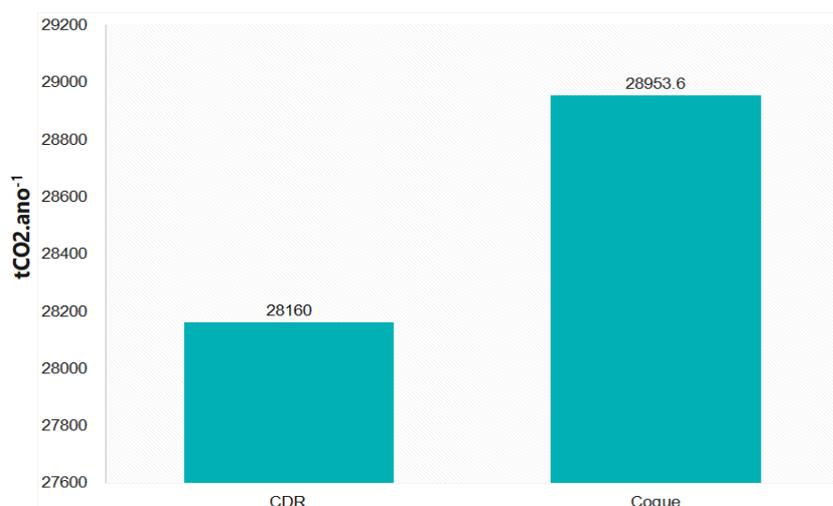


Fonte: Autor (2021)

4.2.3 Análise Comparativa

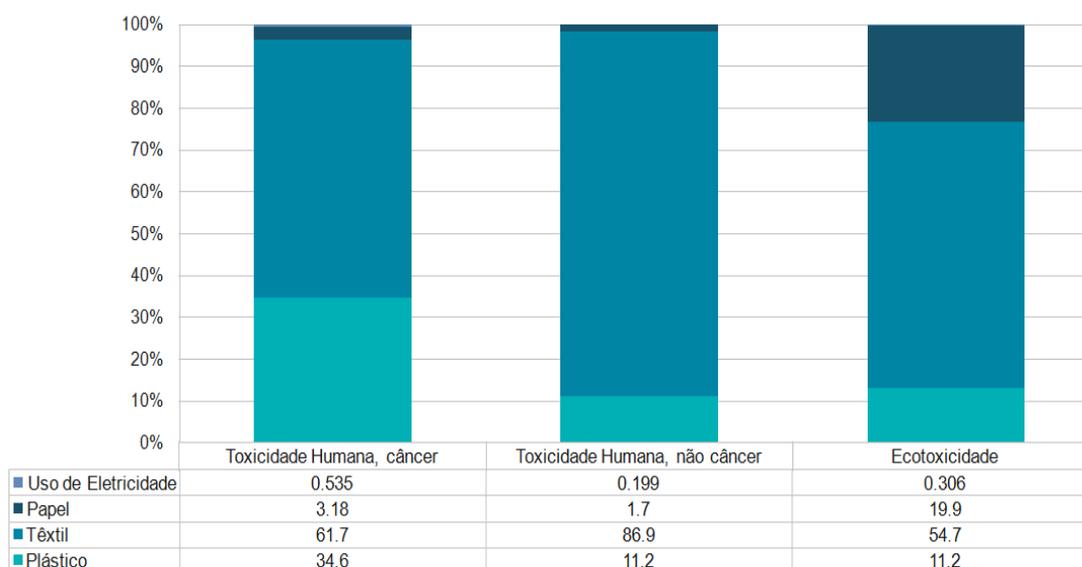
A análise indicou uma emissão total de 28.953,6 tCO_{2-eq}.ano⁻¹ no ciclo de vida do coque de petróleo e uma emissão de 28.321,1 tCO_{2-eq}.ano⁻¹ no ciclo de vida do CDR, indicando que os resíduos quando utilizados como substituto dos combustíveis fósseis na indústria de cimento evita a emissão de Carbono para a atmosfera (Figura 32). De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), a indústria do cimento consumiu 3.163.218,39 m³ de Coque de Petróleo, o que equivale a 70,6% das fontes de combustível para o Setor (EPE, 2020).

Dada à diferença na ordem de grandeza das emissões no processo de queima no forno de clínquer, última etapa do ciclo de vidas dos combustíveis analisados, julgou-se adequado analisar a cadeia do processo isoladamente, pelo método *Usetox2*, devido à contribuição de emissões de CO_{2-eq} mais significativa em toda cadeia produtiva (Figura 33).

Figura 32. Emissões de CO_{2-eq} do CDR e Coque no processo de Queima

Fonte: Autor (2021)

Assim, para o impacto ambiental referente à queima dos componentes do CDR na indústria analisada através do método *USEtox2*, que avalia as categorias de ecotoxicidade e ecotoxicidade humana câncer e não câncer, foi observado que à queima dos componentes têxteis, seguido dos plásticos, contribuem mais para a emissão de CO_{2-eq} na atmosfera (Figura 33).

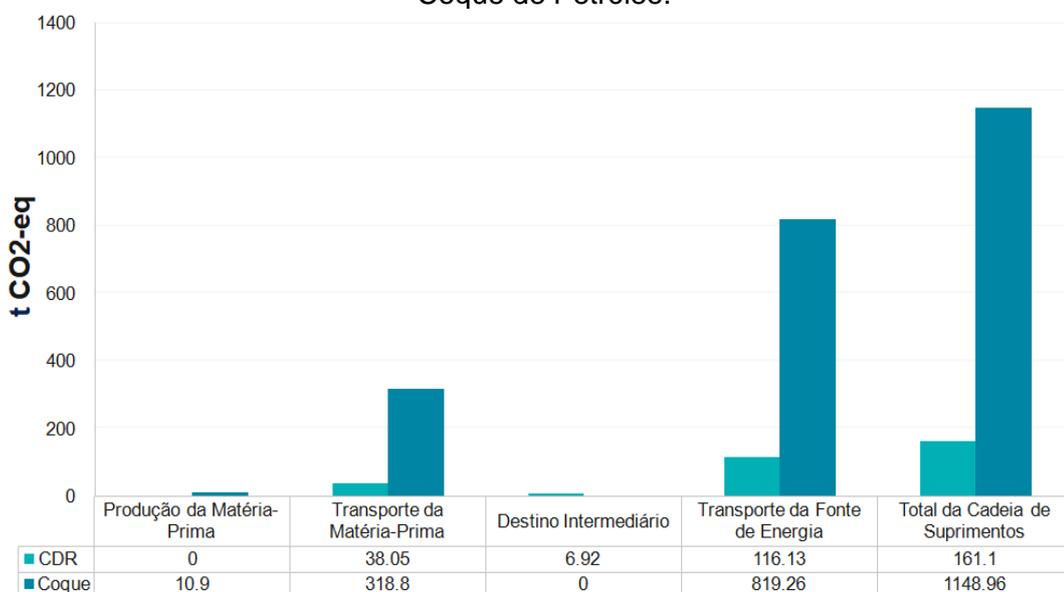
Figura 33. Análise de impacto utilizando a categoria *Usetox 2*.

Fonte: Autor (2021)

Na análise comparativa nos meso-estágios, observou-se emissão de 161,1 tCO₂.ano⁻¹ na cadeia de suprimentos do CDR e de 1.148,96 tCO₂.ano⁻¹ na do Coque

(Figura 34), percebe-se que os principais processos que contribuem diferença significativa são o transporte da matéria-prima, devido à longa distância percorrida via transporte marítimo para importação do coque, bem como o transporte até a fonte de Energia, levando em consideração que o CDR é oriundo do município próximo à fonte de energia. Cabe ressaltar a diferença nas emissões de CO₂ destino Intermediário, que ocorre porque o coque é apenas armazenado neste estágio, enquanto o CDR é processado, passando pela unidade planta de produção. Já na etapa de produção de matéria prima, devido o CDR ser oriundo do resíduo, a emissão foi considerada zero.

Figura 34. Comparação das emissões de CO₂-eq entre as cadeias de suprimento do CDR e Coque de Petróleo.



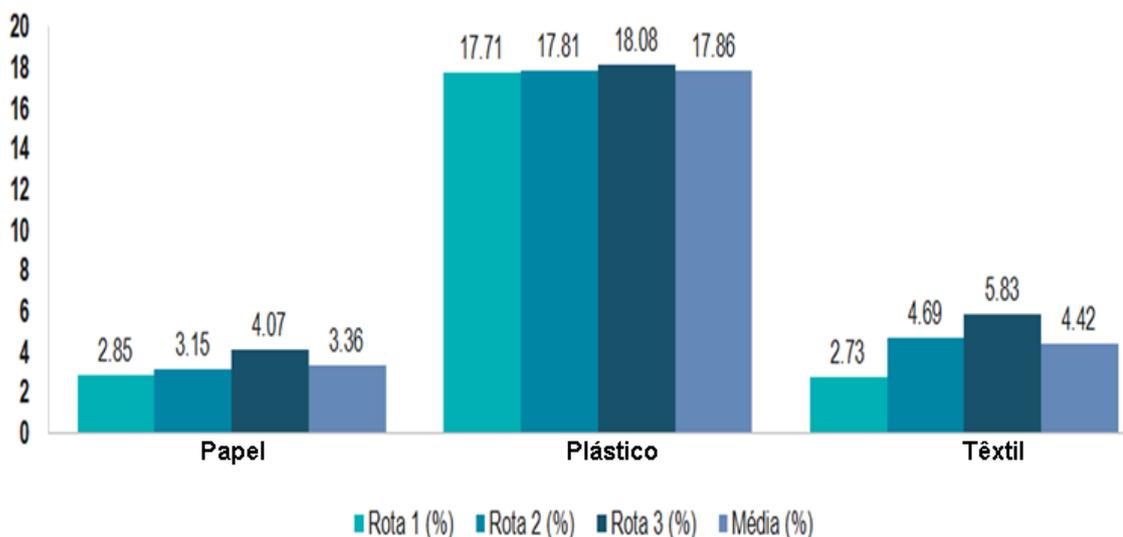
Fonte: Autora (2021)

4.2. Análise de Incerteza

A partir da atribuição de valores em termos de energia aos materiais contidos na composição gravimétrica do CDR foi estimado PCI dos resíduos dos principais componentes (IVIG, 2005; BARROS, 2012; REDEACV, 2017; GUEDES et al., 2021). Na análise, o plástico possui maior contribuição na composição gravimétrica em relação aos componentes das mostras das 3 rotas analisadas, com média de 17,86% (Figura 35), e foi levada em consideração que o PCI do plástico é maior que

os outros materiais cerca de $7.830 \text{ Kcal.kg}^{-1}$. Já os resíduos têxteis e de papéis possuem em média PCI de 4.170 e $3.780 \text{ Kcal.kg}^{-1}$, respectivamente.

Figura 35. Média da composição gravimétrica dos componentes do CDR.



Fonte: Adaptado de Barros (2012), Tavares (2018), Guedes et al. (2021b).

A diferença na composição dos materiais que compõem o CDR não alterou de forma que comprometesse o uso nos fornos de clínquer, dado o resultado do poder calorífico encontrado. O resultado mínimo da análise teórica do PCI foi de $4.932 \text{ kcal.kg}^{-1}$. Considerando que o PCI do CDR não deve ser inferior a $1.675 \text{ kcal.kg}^{-1}$ se tratando de aproveitamento de energético. Além disso, mesmo que a classificação segundo o PCI não deva ser considerada de forma definitiva para estabelecer a destinação correta do RSU, considera-se que para um $\text{PCI} > 2.000 \text{ kcal.kg}^{-1}$ a queima é tecnicamente viável (THEMELIS, 2003).

Assim, ao final da análise de sensibilidade, foi verificado que, mesmo com a variação do PCI de acordo com a rota de coleta do município do estudo, os valores não comprometem o aproveitamento de energia térmica contida nos RSU e o ciclo do CDR mantém valores de emissão de CO_2 inferiores ao do Coque, reforçando sua vantagem técnica e ambiental neste parâmetro.

4.3 ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO

Este capítulo apresentará o levantamento do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos municipais e tecnologia utilizada para fins de subsídio para desenvolvimento de políticas públicas adequadas de incentivo à realização do aproveitamento energético dos RSU do município.

4.3.1 Prioridades de critérios

A preferência dos especialistas para cada critério em relação ao objetivo principal foi determinada por meio de comparações entre pares, analisando as alternativas lado a lado e indicando aquela que melhor atende ao critério (Tabela 6). Assim, foi possível calcular as prioridades dos critérios de acordo com a escala fundamental de julgamentos comparativos (SAATY; VARGAS, 2001). Seis comparações de paridade foram analisadas, de acordo com a Equação 7:

$$(n^2-n).2^{-1} \qquad \text{Equação (7)}$$

Onde:

n = ordem da matriz.

Tabela 6. Matriz de comparação de paridade dos critérios

CRITÉRIOS PARA O OBJETIVO	AMBIENTAL	ECONÔMICO	SOCIAL	TÉCNICO
AMBIENTAL	1,00	0,20	7,00	1,00
ECONÔMICO	5,00	1,00	7,00	3,00
SOCIAL	0,14	0,14	1,00	0,20
TÉCNICO	1,00	0,33	5,00	1,00
SOMA	7,14	1,68	20,00	5,20

Fonte: Autor (2021)

A tabela foi normalizada dividindo o valor de cada célula pela soma da respectiva coluna (Tabela 7). Com a tabela da matriz normalizada, obtém-se o vetor de prioridade dos critérios, calculando a média dos valores de cada critério.

Tabela 7. Comparação Normalizada dos Critérios Estabelecidos

CRITÉRIOS PARA O OBJETIVO	AMBIENTAL	ECONÔMICO	SOCIAL	TÉCNICO	VETOR PRIORIDADE
AMBIENTAL	0,140	0,119	0,350	0,192	0,200
ECONÔMICO	0,700	0,597	0,350	0,577	0,556
SOCIAL	0,020	0,085	0,050	0,038	0,048
TECHNICAL	0,140	0,199	0,250	0,192	0,195

Fonte: Autor (2021)

Por meio da comparação normalizada foi possível verificar a classificação dos critérios por meio do vetor de prioridade calculado. Para Alves e Alves (2015), quanto maior a média das linhas, melhor o nível de preferência. Portanto, para o atributo tecnologia de tratamento do RSU, os quatro critérios, em ordem de importância gerada pelo processo matemático do AHP (quanto maior a pontuação, maior o nível de preferência), são: Econômico (55,6%); Ambientais (20,0%); Técnico (19,5%) e Social (4,8%).

O critério econômico apontado por especialistas como o principal fator a ser considerado destaca a importância de se verificar a viabilidade econômica devido ao alto custo de investimento da tecnologia de tratamento térmico de RSU em relação ao seu descarte em aterros sanitários. Segundo Mamede (2013), a tarifa de tratamento para aterros praticada no Brasil é pequena se comparada aos países europeus, uma vez que esses países elevam os custos de disposição em aterros como forma de incentivar práticas alternativas, como o tratamento.

A implantação de processos tecnológicos de tratamento e recuperação resulta em menos impactos ambientais ao longo de seu ciclo de vida, incluindo economia de energia (MERSONI; REICHERT, 2017). Este fato fica evidenciado nos critérios ambientais e técnicos que apresentam quase a mesma prioridade indicada pelos profissionais da área de uso de energia.

Embora o nível de preferência quanto ao critério social seja apontado por especialistas com menor percentual em relação ao critério de escolha da implantação de tecnologias para o uso de RSU energéticos, eles apresentam impactos positivos para a sociedade. A utilização de RSU como fonte de energia gera empregos diretos e indiretos, além de contribuir para a erradicação de aterros sanitários e melhoria da saúde (ABCP, 2020).

4.3.2 Análise de Consistência

Após as comparações de paridade, verificou-se a consistência dos julgamentos. Segundo Saaty (1990), o método AHP calcula a razão de consistência (CR) comparando o índice de consistência (IC) da matriz com os julgamentos, com o índice de consistência de uma matriz do tipo aleatório (IR). Com a matriz de julgamentos e prioridades, as prioridades são utilizadas como peso para cada coluna (Tabela 8).

Tabela 8. Matriz de Comparação com Pesos Atribuídos

CRITÉRIOS PARA O OBJETIVO	AMBIENTAL	ECONÔMICO	SOCIAL	TÉCNICO
AMBIENTAL	0,140	0,119	0,350	0,192
ECONÔMICO	0,700	0,597	0,350	0,577
SOCIAL	0,020	0,085	0,050	0,038
TÉCNICO	0,140	0,199	0,250	0,192
PESO	0,200	0,556	0,048	0,195

Fonte: Autor (2021)

O índice geral de preferência para cada um dos critérios foi calculado multiplicando os vetores de preferência para cada um dos critérios, pelos pesos dos próprios critérios, somando os produtos (Tabela 9).

Tabela 9. Índice de Preferência Geral

CRITÉRIOS PARA O OBJETIVO	AMBIENTAL	ECONÔMICO	SOCIAL	TÉCNICO
AMBIENTAL	0,028	0,066	0,017	0,038
ECONÔMICO	0,140	0,332	0,017	0,113
SOCIAL	0,004	0,047	0,002	0,008
TÉCNICO	0,028	0,111	0,012	0,038

Fonte: Autor (2021)

Em seguida, cada um dos valores resultantes foi dividido pelos pesos correspondentes, que são os vetores preferidos (Tabela 10). Assim, foi possível calcular o estimador de autovalor máximo de julgamento (λ).

Tabela 10. Estimador de Autovalor

SOMA DOS PESOS	PRIORIDADES	PESO / PRIORIDADE
0,149	0,200	0,743
0,602	0,556	1,082
0,061	0,048	1,266
0,188	0,195	0,964

Fonte: Autor (2021)

O total calculado da razão peso / prioridade dividido pela ordem da matriz (4) é igual a $\lambda_{max} = 4,235$. O Índice de Consistência (IC) foi calculado pela seguinte fórmula: $IC = |(\lambda_{max} - n)| / (n-1)$ O valor calculado do IR é dado na tabela 2. $IC = (4.235 - 4) / 4 - 1$, então $IC = 0,078$. Assim, por se tratar de uma matriz (4x4), pois possui 4 critérios comparados par a par, portanto, a inconsistência máxima permitida pela escala de Saaty é de 0,9. O valor resultante da razão de consistência RC para IC / IR foi de 0,087. Portanto, o grau de consistência para o caso estudado mostrou-se satisfatório, uma vez que $IC / IR < 0,09$.

4.3.3 Prioridade de alternativas

As prioridades das alternativas foram determinadas por meio de comparações entre pares, seguindo o mesmo método de cálculo dos critérios para atingir o objetivo principal, indicando a melhor alternativa que atende ao critério estabelecido (Tabela 11).

Tabela 11. Resumo do Cálculo de Prioridade para Alternativa

Critério Ambiental					
C1	Cop. CDR	Incineração	Gaseificação	Pirólise	Prioridade
Coprocessamento de CDR	1,000	9,000	7,000	5,000	64%
Incineração	0,111	1,000	0,333	0,200	5%
Gaseificação	0,143	3,000	1,000	0,333	10%
Pirólise	0,200	5,000	3,000	1,000	21%
Critério Econômico					
C2	Cop. CDR	Incineração	Gaseificação	Pirólise	Prioridade
Coprocessamento de CDR	1,000	5,000	1,000	0,333	23%
Incineração	0,200	1,000	0,333	0,200	7%
Gaseificação	1,000	3,000	1,000	0,333	19%
Pirólise	3,000	5,000	3,000	1,000	51%
Critério Social					
C3	Cop. CDR	Incineração	Gaseificação	Pirólise	Prioridade

Coprocessamento de CDR	1,000	7,000	5,000	5,000	63%
Incineração	0,143	1,000	0,333	0,333	6%
Gaseificação	0,200	3,000	1,000	1,000	15%
Pirólise	0,200	3,000	1,000	1,000	15%

Critério Técnico					
C4	Cop. CDR	Incineração	Gaseificação	Pirólise	Prioridade
Coprocessamento de CDR	1,000	7,000	3,000	5,000	56%
Incineração	0,143	1,000	0,200	0,500	6%
Gaseificação	0,333	5,000	1,000	3,000	27%
Pirólise	0,200	2,000	0,333	1,000	11%

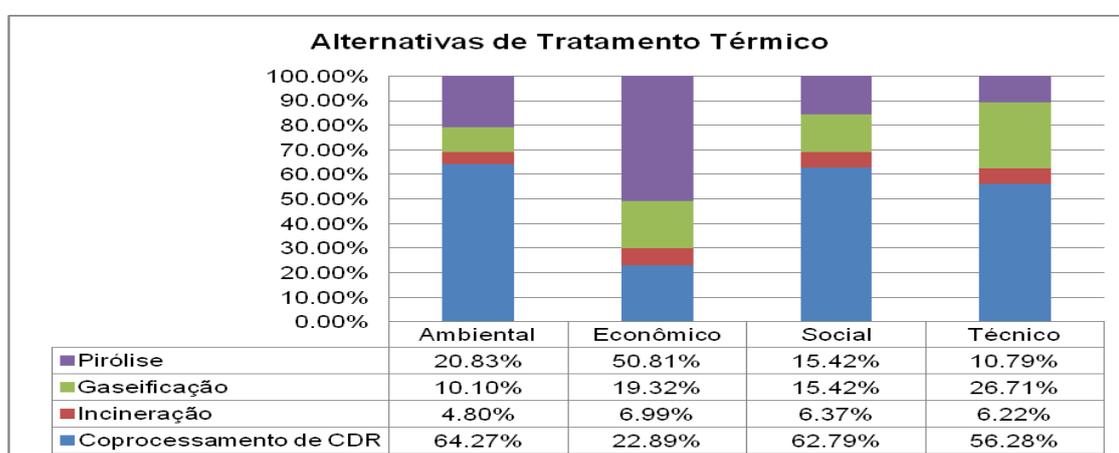
Fonte: Autor (2021)

Portanto, as quatro alternativas, em ordem de importância de acordo com os quatro critérios, geradas pelo processo matemático do AHP (quanto maior a pontuação, maior o nível de preferência), são:

- Ambientais: coprocessamento CDR, pirólise, gaseificação e incineração;
- Econômico: Pirólise, Coprocessamento de CDR, Gaseificação e Incineração;
- Social: Coprocessamento CDR, Pirólise, Gaseificação e Incineração;
- Técnico: Coprocessamento de CDR, Gaseificação, Pirólise e Incineração.

A incineração foi considerada menos viável em todos os critérios analisados, uma vez que o coprocessamento de CDR apresentou maior viabilidade nos critérios ambientais, sociais e técnicos, e no critério econômico ocupa o segundo lugar entre as tecnologias de tratamento (Figura 36).

Figura 36. Prioridades das alternativas de tratamento térmico pelos critérios



Fonte: Autor (2021)

Na análise de consistência para as alternativas, foi realizado o mesmo cálculo para cada um dos critérios isoladamente, resultando em um grau de consistência satisfatória para o caso estudado, de acordo com os valores obtidos, uma vez que $IC / IR < 0,9$ foi evidenciado em todos os critérios julgados e também na preferência entre os critérios (Tabela 12).

Tabela 12. Resumo do Cálculo de Consistência de Julgamento

ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA	IC ($\lambda_{max-n})/(n-1)$	IC	MOTIVO DA CONSISTÊNCIA ($RC=IC/IR$)	REFERÊNCIA (IC/IR)	SITUAÇÃO
Coprocessamento de CDR	0,058	0,9	0,064	<0,9	Consistent
Incineração	0,039	0,9	0,043	<0,9	Consistent
Gaseificação	0,025	0,9	0,027	<0,9	Consistent
Pirólise	0,023	0,9	0,025	<0,9	Consistent

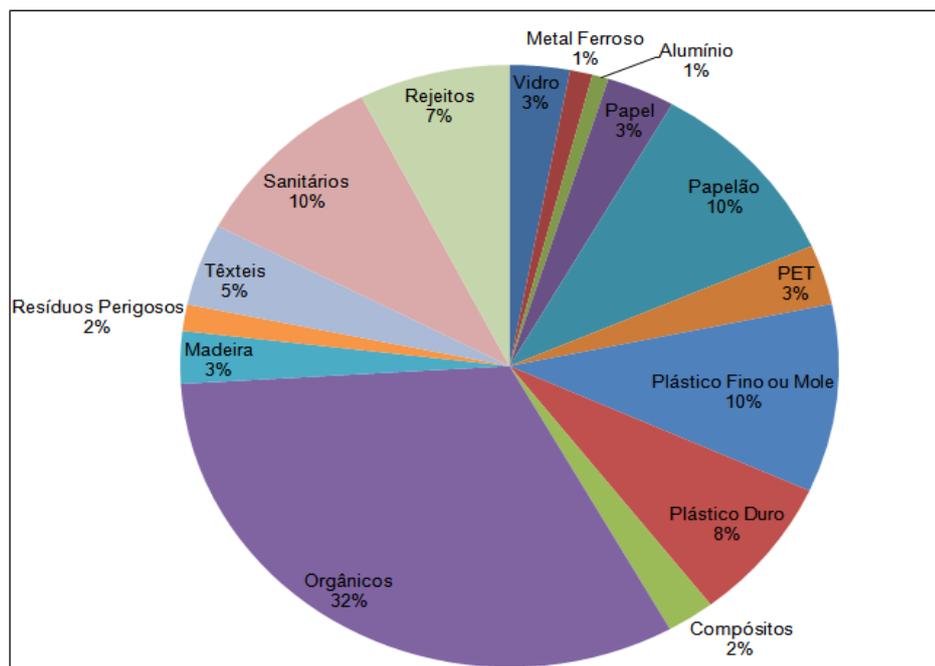
Fonte: Autor (2021)

4.4.4 Análise dos Critérios Técnicos do potencial de produção de CDR no Município

a) Análise Gravimétrica

Analisando a média de valores (Figura 37) encontrados nas composições gravimétricas encontradas e relacionando a tipologia, o percentual de matéria orgânica foi de 32%. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a disponibilidade de RSU no Brasil é inferior à quantidade processada internacionalmente, visto que a composição tem maior percentual em restos alimentares, representando menor poder calorífico (EPE, 2014). Cerca de 29% dos materiais, devido suas características, apresentam potencial para reciclagem. Assim, após a separação destes materiais com valor econômico, o fluxo restante de resíduos associados a materiais com poder calorífico elevado podem ser destinados à produção de componentes de CDR (ARAÚJO, 2020).

Figura 37. Composição Gravimétrica Média dos RSU de Paulista-PE.



Fonte: Adaptado de Tavares (2018)

A dinâmica das modificações do cenário dos municípios relacionados à geração de resíduos é sazonal, principalmente quando se trata de municípios que fazem parte da Região Metropolitana de Recife, presume-se que algumas discrepâncias ocorreram devido ao consumo, frequência e ano (TAVARES, 2018).

A composição dos RSU varia entre as cidades e até mesmo dentro de uma comunidade de ano para ano, mas as diferenças não são substanciais (THEMELIS, 2003). Para tanto, o estudo gravimétrico permite, ainda que de forma preliminar, verificar a composição média dos RSU, no qual se pode avaliar o potencial de aproveitamento energético através das frações destes materiais. As indústrias que utilizam o RSU em substituição aos combustíveis convencionais derivados de petróleo fazem o monitoramento contínuo do processo de combustão em seus fornos, pois o RSU é um combustível de composição heterogêneo e desconhecido, no qual a composição varia muito ao longo do tempo, principalmente umidade e PCI (CARVALHAES, 2013).

O principal constituinte da média de RSU de Paulista que podem ser valorizados para produção de CDR foi o plástico. Outros com baixa umidade são chamados de materiais combustíveis a exemplo de: papéis, têxteis, borracha, couro e madeira. Esses materiais podem ser chamados de combustíveis secos, em

distinção aos combustíveis úmidos ou orgânicos que contêm 50-70% de água. A terceira categoria são os não combustíveis secos, ou seja, metal, vidro e outros compostos inorgânicos que não têm valor de aquecimento. Resíduos perigosos, como tintas, óleos e produtos químicos constituem apenas 2% do total de RSU, devendo ser tratados separadamente.

B) Poder Calorífico Inferior

Através da análise individual dos materiais combustíveis de RSU relacionados aos resultados dos PCI normalmente encontrados nos resíduos sólidos urbanos (IVIG, 2005; SOARES, 2011), percebeu-se que o plástico possui maior PCI e que os resíduos têxteis e de papéis (Tabela 13).

Tabela 13. Poder Calorífico de materiais em RSU.

Material	PCI (kcal/kg) (IVIG, 2005)	PCI (kcal/kg) (SOARES, 2011)	Gravimetria (%)
Plástico	6301.00	7830.00	8.07
Papel	4033.00	3780.00	2.90
Têxteis	3478.00	4170.00	4.42

Fonte: (IVIG, 2005; SOARES, 2011; TAVARES, 2018).

Seguindo os passos de Themelis (2003) o resultado da análise teórica do PCI foi de $4.932 \text{ kcal.kg}^{-1}$. Considerando que o PCI dos RSU, devido características técnicas, não deve ser inferior a $1.675 \text{ kcal.kg}^{-1}$ se tratando de aproveitamento de energético através da incineração. Além disso, mesmo que a classificação segundo o PCI não deva ser considerada de forma definitiva para estabelecer a destinação correta do RSU, considera-se que para um $\text{PCI} > 2.000 \text{ kcal.kg}^{-1}$ a queima bruta é tecnicamente viável (THEMELIS, 2003).

A análise realizada pelo calorímetro digital C2000 IKA-WERKE teve como resultado médio de três amostras de CDR produzido no CTR – PE igual a $5.035,67 \text{ kcal.kg}^{-1}$ com umidade de 62,5% (Tabela 14). Acrescenta-se que a umidade $> 60\%$ reduz o poder calorífico, porém não torna o combustível menos atrativo para a substituição dos derivados de petróleo pela indústria cimenteira (GUEDES et al., 2021a).

Tabela 14. Análise de PCI e do PCS da Amostra

Amostra	Umidade	Poder Calorífico Inferior		Poder Calorífico Superior	
	%	kJ.kg^{-1}	Kcal.kg^{-1}	kJ.kg^{-1}	Kcal.kg^{-1}
1º	61,69	23.270,00	5.557,95	23.140,00	5.526,90
2º	63,18	17.140,00	4.093,82	16.930,00	4.043,66
3º	62,70	22.840,00	5.455,24	22.690,00	5.419,42

Fonte: Adaptado de CTR-PE (2019).

Os resultados são para as amostras como recebidas, apresentando diversos materiais (heterogêneo) e, por ter cerca de 60% de umidade, não foi possível a homogeneização. A umidade atual das amostras reduz o poder calorífico, mas nem por isso o torna menos atrativo para o aproveitamento energético dos componentes do CDR.

As proximidades dos resultados do PCI das análises e teórica e experimental reforçam a viabilidade técnica e econômica para o aproveitamento da energia contida nas frações dos materiais, sendo os resultados satisfatórios representantes da eficiência na seletividade de materiais pelos equipamentos do processo de produção, apesar do alto do valor de umidade apresentado.

Através da análise comparativa entre o CDR e os combustíveis tradicionais (Tabela 15), verifica-se o fator de emissão de CO_2 , o poder calorífico e a taxa de emissão de CO_2 por unidade energética (REVALORE, 2014).

Tabela 15 – Comparação de Emissões de CO_2 -eq do Poder Calorífico

Combustível	Und.	Fator de Emissão de CO_2	Poder Calorífico (MJ/kg)	CO_2 por unidade energética
Óleo	T	78,8	40,5	1,95
Coque de Petróleo	T	97,0	33,5	2,90
Carvão	T	98,3	33,5	2,93
Gás metano (de aterro)	1000 m^3	56,1	17,0	3,30
CDR	T	31,8	20,0	1,59

Fonte: Revalore (2014).

Conforme a tabela acima, o fator de emissão de CO_2 equivalente, obtido da combinação do fator de emissão da margem de operação, que reflete a intensidade das emissões de CO_2 da energia despachada, o CDR é o que possui menor emissão, tendo em relação ao Coque de Petróleo, que é o combustível alternativo

mais utilizado pela indústria de cimento, 67,22% a menos de emissão de CO₂, além de ser também avaliado como menos poluente em relação aos GEE. Já em relação à emissão de CO₂ por unidade energética, o CDR obteve 1,59 e o Coque de Petróleo 2,90; cerca de 45,17% a menos. Já comparando com os outros combustíveis, percebe-se que o CDR apresenta o menor potencial de emissão de CO₂ dentre os combustíveis relacionados.

Contudo, ao analisar os valores referentes ao poder calorífico, nota-se que o CDR tem menor potencial energético que o Óleo, o Coque de Petróleo e o Carvão, e apresenta um valor semelhante ao do Gás Metano oriundo de aterro. Mas, apesar disso, o CDR possui poder calorífico suficiente para aplicação geração de energia em diversos setores da indústria.

C) Índice de Sustentabilidade da Limpeza Pública (ISLU) de Paulista-PE

O relatório de 2019 do ISLU apresentou um valor de 0,622 para o município de Paulista, com este resultado o município se classifica com índice médio de desenvolvimento humano municipal. Dentre os municípios que participaram do último relatório, Paulista ocupa a posição nº 19 no Estado de Pernambuco (ISLU, 2019).

A dimensão (E), que corresponde ao engajamento do município, apresentou valor de 0,810, esta dimensão refere-se à população atendida pelos serviços de limpeza urbana. A ausência deste serviço estruturado e eficiente de coleta afeta a saúde pública e tende a fazer com que uma quantidade considerável de resíduos que poderia ser tratada e transformada em insumos tenha destinação inadequada.

Na Dimensão Sustentabilidade Financeira (S), Paulista alcançou o índice 0,588. Nesta dimensão evidencia-se que alguns pontos ainda devem ser melhorados para que se atinja a nota máxima de 1,0 que representa a máxima capacidade de operacionalização financeira. Esse pilar da dimensão S é relevante, pois garante a autonomia financeira dos serviços, sem que necessitem ser subsidiados pelo orçamento municipal em detrimento das obrigações com educação, saúde e encargos administrativos, algo já bastante debilitado nos municípios Pernambucanos, e em países em desenvolvimento no geral.

Na dimensão (R), que relaciona o aproveitamento do resíduo coletado, o município de Paulista apresentou o índice 0,00. Isso porque, ainda que seus resíduos sejam destinados a um local ambientalmente adequado, o CTR Pernambuco, um ponto importante a ser destacado é que o município não realiza triagem e nem aproveitamento do material coletado, os materiais que são reaproveitados são obtidos por meio de catadores informais nas ruas. Neste sentido, o município deveria investir em uma coleta seletiva promovendo uma gestão eficiente dos resíduos urbanos, pois reduziria assim a disposição destes materiais em aterros sanitários.

Na Dimensão (I) Impacto Ambiental, Paulista alcançou o índice 1,000. Nesta dimensão, verifica-se quanto do RSU coletado recebe o encaminhamento ambientalmente adequado. Aqui se destaca que o município de Paulista destina todos os resíduos sólidos urbanos coletados pelos serviços públicos de coleta urbana para uma unidade de transbordo e desta para uma central de tratamento de resíduos privada, em que são realizadas atividades de tratamento ambientalmente adequado, como triagem, reciclagem, composto derivado de resíduos, entre outras.

d) Mercado do CDR

O principal mercado do CDR em Pernambuco se dá pelo coprocessamento nos fornos de indústrias de cimento. De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), há quatro fábricas de cimento que trabalham com aproveitamento de energia através do coprocessamento (Tabela 16). Destaca-se que essas indústrias estão situadas a menos de 100 km do CTR – PE, aumentando a viabilidade econômica.

Tabela 16. Indústrias de cimento no estado da Paraíba e Pernambuco

Indústrias de Coprocessamento de CDR	Cidade	Distância em relação ao CTR – PE (km)
Nassau	Goiana - PE	28,7
Lafarge Holcim	Caaporã - PB	44,9
Intercement	Joao Pessoa - PB	74,9

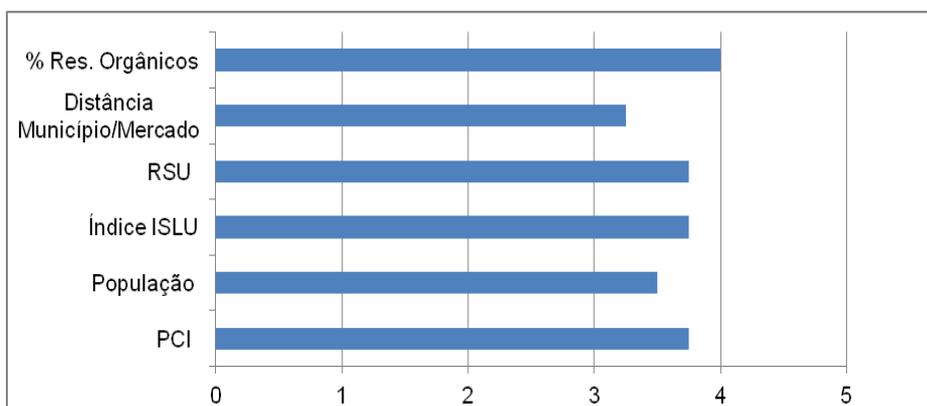
Fonte: Visedo; Pecchio (2019).

e) Critérios Técnicos AHP

Os critérios técnicos analisados pelos especialistas por meio do questionário indicam que quanto mais próximo dos critérios estabelecidos, maior a viabilidade de implantação da tecnologia pesquisada. De acordo com Aaker (2001), fatores como experiência e bom senso no preenchimento do questionário podem evitar erros, com potencial prejudicial, dada sua abrangência e abrangência.

A pontuação em uma escala de 1 a 5 em níveis de importância, sendo 1 considerado de pouca importância e 5 sendo de importância absoluta. Esses valores foram atribuídos com as respostas do questionário, que indicam como principal fator técnico o percentual de resíduos sólidos orgânicos, seguidos igualmente de menor poder calorífico, quantidade de RSU gerado no município e o Índice de Sustentabilidade Urbana (Figura 38). Os resultados mostram estudos nos quais indicam que o potencial de produção de CDR se aplica a materiais de alto poder calorífico, baixa umidade, sem frações de contaminação, nem substâncias orgânicas (JUCÁ et al., 2014, MERSONI; REICHERT, 2017).

Figura 38. Prioridades dos critérios técnicos para a produção de CDR



Fonte: Autor (2021)

Os resultados dos critérios técnicos são viáveis para a produção de CDR no município, uma vez que dos seis critérios analisados, cinco atingiram o requisito mínimo recomendado pelos autores em suas publicações e validado por especialistas. Apenas o ISLU teve resultado abaixo do esperado, mas este índice visa analisar a adesão dos municípios brasileiros à Política Nacional de Resíduos Sólidos, e, embora Paulista não atinja 100% da meta, o município possui 100% de

coleta de RSU, e esse resíduo coletado tem potencial energético, sendo a triagem do material passível de reciclagem realizada previamente no CTR-PE, e as sombras desses materiais valorizadas pelo aproveitamento energético do RSU por meio da produção do CDR (Tabela 17).

Tabela 17. Tabela de critérios técnicos de produção de CDR

CRITÉRIO	ESPERADO	REAL
C1 - PCI (kcal.kg⁻¹)	≥ 2 750	4.666
C2 - HAB (Hab)	300.000	334.376
C3 - ISLU	1	0,622
C4 - DIST (Km)	<150	<100
C5 - USW (Ton.mês⁻¹)	>6.000	8.100
C6 - GRAV	<60% orgânicos	34,96

Fonte: Autor (2021)

5 CONCLUSÕES

Este trabalho proporcionou observar o cenário das produções científicas sobre o aproveitamento energético de resíduos sólidos através do CDR. Os artigos analisados indicaram que essa área de estudo se encontra em evidência. A distribuição das instituições pelos continentes dos locais de estudo sugere um interesse global tanto de países desenvolvidos, como países em desenvolvimento como Tailândia e Brasil.

O processo de produção dos componentes do CDR se destaca por apresentar os maiores impactos positivos na categoria relacionada às mudanças climáticas devido às emissões evitadas na substituição do combustível fóssil e à redução da exploração de petróleo para fabricação de resinas plásticas e fibras dos principais componentes. Já o impacto negativo está relacionado ao uso de combustível no transporte do material, energia elétrica no processo de fabricação do CDR e queima nos fornos das cimenteiras com impactos negativos para a categoria de ecotoxicidade.

A comparação analítica entre o CDR e o Coque, dois casos combustíveis utilizados nos fornos de produção de cimento indicou que a produção de 1 t de combustíveis de ambos os casos contribuiu com a Emissão de GEE para o caso do CDR de 28.321,1 tCO₂-eq.ano⁻¹, e para o caso do Coque de 30.102,56 tCO₂-eq.ano⁻¹.

Os resultados encontrados na aplicação do método multicritério para avaliar as tecnologias de tratamento indicou que em ordem de importância gerada pelo processo matemático AHP o fator econômico ficou em primeiro lugar com 55,6%, seguido do ambiental com 20,0%, o técnico com 19,5% e por último o critério social 4,8%.

O potencial energético para a produção de CDR no município de Paulista de acordo com as características técnicas, socioambientais e econômicas, mostrou-se viáveis em todos os aspectos analisados. Foi atribuído como principal fator técnico o percentual de resíduos sólidos orgânicos, seguidos igualmente pelo PCI, quantidade de RSU gerado no município e o ISLU.

Portanto, o aproveitamento energético da energia que vem do RSU é uma tecnologia com grandes potenciais de sustentabilidade. Além de aumento de receita do município com a comercialização destes materiais, há uma redução na

quantidade de resíduos dispostos no aterro sanitário, aperfeiçoando a compactação, visto que a maior parcela é de resíduo orgânico, evitando enterrar materiais que não se decompõem naturalmente como plásticos, o que representa perspectiva de ampliação da vida útil do aterro sanitário.

Vale ressaltar que o fato do coprocessamento de CDR ter sido escolhido para a pesquisa não significa que seja a melhor opção para destinação dos RSU gerados no município. Sugere-se, ainda, em estudos futuros, de análise de rotas tecnológicas de aproveitamento energético de RSU e a realização de ACV mais abrangentes, que englobem o consumo de água demandados por cada etapa, bem como os aspectos financeiros e sociais.

REFERÊNCIAS

- AAKER, D. A. **Strategic market management**. New York: John Wiley. 2001.
- ABELIOTIS, K., KALOGEROPOULOS, A., LASARIDI, K. **Life cycle assessment of the MBT plant in ano liossia**, athens, Greece. 32, 213e219. 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.002>
- ABLP. Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública. **Revista Limpeza Pública**. Ed. nº 102. Publicação trimestral da 3º trimestre. São Paulo. 2019.
<https://www.ablp.org.br>
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14040: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2014a.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**. Rio de Janeiro, 2014b.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14067: Gases de efeito estufa - Pegada de carbono de produtos - Requisitos e orientações sobre quantificação e comunicação**. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16849: Resíduos sólidos urbanos para fins energéticos – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2020.
- ALVES, J. R. X.; ALVES, J. M. (2015). Definição de localidade para instalação industrial com o apoio do método de análise hierárquica (AHP). **Production**, v. 25, n. 1, p. 13-26, 2015.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132014005000023>
- ANGELO, A. C. M. **Contribuições para o inventário do ciclo de vida dos resíduos orgânicos provenientes da coleta domiciliar na cidade do Rio de Janeiro**. Dissertação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro-RJ. 2014.
<https://cutt.ly/IQuQuou>
- ARAÚJO, G. J. F. O coprocessamento na indústria de cimento: definição, oportunidades e vantagem competitiva. **Rev. nacional de ger. de cidades**. Tupã. v. 8, n. 57, p. 52-61, 2020.
<https://dx.doi.org/10.17271/231884728572020>
- ARAÚJO JÚNIOR, J. D. **Desempenho exergetico e emissões de gases de efeito estufa no uso do biocarvão no setor sucroenergético**. 2019. 161 f. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
<https://repositorio.unb.br/handle/10482/37572>
- BANDEIRA, D. L.; Becker, J. L.; Rocha, A. K. Sistemática multicritério para priorização de embarques marítimos. **Revista de Administração Mackenzie**. v. 11, n. 6, p. 107-130. 2010.
<http://dx.doi.org/10.1590/S1678-69712010000600007>
- BARROS, R. T. DE V. **Elementos de Gestão de Resíduos Sólidos**. 1. ed. Belo Horizonte: Tessitura, 2012.

BERTICELLI, R.; PANOLFO, A.; KORF, E. P. Gestão integrada de resíduos sólidos urbanos: perspectivas e desafios. **Revista de gestão & sustentabilidade ambiental**. Florianópolis. v. 5, n. 2, p. 711-744, 2016. <https://cutt.ly/Vhpglqu>

BESEN, G. R.; FREITAS, L.; JACOBI, P. R. **Política nacional de resíduos sólidos: implementação e monitoramento de resíduos urbanos**. São Paulo: IEE USP: OPNRS, 2017.

BEYLOT, A., VAXELAIRE, S., ZDANEVITCH, I., AUVINET, N., VILLENEUVE. **Life cycle assessment of mechanical biological pre-treatment of municipal solid waste: a case study**. Waste Manag. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.033>.

BISPO, L. M.; SANTOS, M. S. T.; NASCIMENTO, J. F. O Uso da Prospecção como Ferramenta na Busca de Tecnologias de Gerenciamento de Resíduos Sólidos no Brasil. **Cadernos de Prospecção**. v. 12, n. 2, p. 439-449, 2019. DOI: <https://dx.doi.org/10.9771/cp.v12n2p439>

BORGES, I. M. S.; LIMA, C. A. O.; FERNANDES, A. C. G.; NUNES, E. A. C., ALVES; ÁLISSON E. F.; NUNES, E. A. C.; NUNES, F. J. B.; ROCHA, A. L. S.; SANTOS JUNIOR, C. N.; BATISTA, C. S. The urbanization process and its environmental impacts in the City of Fagundes, Paraíba: historical outline. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. 1-18, 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.5196>

BOSMANS, A., VANDERREYDT, I., GEYSEN D., HELSEN, L. The crucial role of Waste-to-Energy technologies in enhanced landfill mining: a technology review. **Journal of Cleaner Production**, 55, 10-23. 2013 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.032>

BLANK, L.; TARQUIN, A.; **Engenharia Econômica**. 6. ed. Porto Alegre: Editora AMGH, 2008.

BOONPA, S., SHARP, A. Waste-to-energy policy in Thailand. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**, 12, 434-442. 2017. <https://doi.org/10.1080/15567249.2016.1176088>

BRASIL. **Lei nº 9.478, de 06 de agosto de 1997**. Dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências, Brasília, DF, 1997.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007**. Estabelece Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Brasília, DF, 2007.

BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009**. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências. Brasília, DF, 2009.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n o 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 2010.

BRASIL. **Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010**. Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Brasília, DF, 2010.

BRASIL. **Lei nº 12.490, de 16 de setembro de 2011**. Altera as Leis nºs 9.478, de 6 de agosto de 1997, e 9.847, de 26 de outubro de 1999, que dispõem sobre a política e a fiscalização das atividades relativas ao abastecimento nacional de combustíveis, Brasília, DF, 2011.

BRASIL. **Portaria interministerial nº 274, de 30 de abril de 2019**. Disciplina a recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos referida no § 1º do art. 9º da Lei nº 12.305, de 2010 e no art. 37 do Decreto nº 7.404, de 2010. Meio Ambiente. Gabinete do Ministro. Brasília, 2019.

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020**. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento. Brasília, DF, 2020.

BRUNELLI, M. **Introduction to the Analytic Hierarchy Process**. New York: Springer. 2014.

BURNLEY, S.; PHILLIPS, R.; COLEMAN, T. **Carbon and life cycle implications of thermal recovery from the organic fractions of municipal waste**. Int J Life Cycle Assess, v. 17, 1015–1027, 2012.

<https://doi.org/10.1007/s11367-012-0438-3>

CAPUTO, A. C.; PELAGAGGE, P. M. RDF production plants: II Economics and profitability. **Applied Thermal Engineering**, v. 22, p. 439-448, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(01\)00101-6](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00101-6)

CARVALHAES, V. Análise do Potencial Energético de Resíduo Sólido Urbano para Conversão em Processos Termoquímicos de Gaseificação. **Dissertação**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117p. 2013.

CEMBUREAU. **Market opportunities for use of alternative fuels in cement plants across the EU**. 2020.

<https://cutt.ly/3QuTxAO>

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, **Resolução nº 316, de 29 de Outubro de 2002**. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, DF. 2002.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, **Resolução nº 499, de 08 de Outubro de 2020**. Dispõe sobre o licenciamento da atividade de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer. Ministério do Meio Ambiente. Brasília, DF. 2020.

CONMETRO. Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Resolução nº 04/2010, de 15 de dezembro de 2010**. Dispõe sobre a Aprovação do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências. Brasília – DF, 2010.

<https://cutt.ly/9QuWeYn>

COLVERO, D. A.; ALMEIDA, M. G.; GOMES, A. P.; PFEIFFER, S. C. Aterro Sanitário de Goiânia: Uma Identidade Territorial e a Vulnerabilidade e Exclusão Social da População do seu Entorno. **Engenharia Ambiental**. v. 14, n. 2, p. 03-20, 2017. <https://cutt.ly/5b5ZT6B>

COSTA, A.R.S.; SILVA, R. C. P.; JUCÁ, J. F. T.; El-Deir, S.G. Aplicação da pegada ecológica na gestão de resíduos sólidos urbanos através de análise de componentes principais: Estudo da cidade de Recife, Brasil. *Revista IADIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, v. 13, p. 320-333, 2020.
<http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.2.67115>

CHANG, N.B.; PIRES, A. **Sustainable solid waste management: a systems engineering approach**. Nova Jersey: IEEE Wiley, 2015.

COSTA, H. G. Auxílio multicritério à decisão: método AHP. Rio de Janeiro: **Abepro**, 2006.

DE PAULA, R. S. P.; SHIMODA, E.; BATISTA, F. B.; SANTOS JÚNIOR, P. J. Indicadores bibliométricos na base scopus: Uma análise das publicações sobre o tema “economia ambiental”. **Braz. J. of Develop.**, Curitiba, v. 3, n. 2, p. 350-365, 2017.
<https://doi.org/10.34117/bjdv3n2-37>

DE PAULA, A. S.; PEREIRA, C. D.; VILELA, G. G.; FRICKE, K.; KASPER, O. **Recuperação energética de resíduos sólidos urbanos**. Caderno temático 3. PLANSAB. v.1, n.3, p. 1-51, 2019.
<https://cutt.ly/1QuTFWf>

DUTRA, A.C.; MEDEIROS, G.A.; GIANELLI, B.F. Avaliação do ciclo de vida como uma ferramenta de análise de impactos ambientais e conceito aplicados em programas educativos. **RBCIAMB**. n.51 p. 15-27, 2017. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820190399>

DRUDI, K. C. R.; DRUDI, R.; MARTINS, G.; ANTONIO, C. G.; LEITE, C. J. T. Statistical model for heating value of municipal solid waste in Brazil based on gravimetric composition. **Waste Management**, v. 87, p. 782–790, 2019. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.012>

EPA. Environmental Protection Agency. **Criteria for the Definition of Solid Waste and Solid and Hazardous Waste Exclusions**. 2016.
<https://cutt.ly/HQuQ8hc>

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Nota Técnica DEA 18/14 - Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos**. Série Recursos Energéticos. Rio de Janeiro. 50 p. EPE, 2014.

EPE. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2020: Ano base 2019**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasil. Rio de Janeiro : EPE, 292 p. 2020.

EUROPEAN COMMISSION. **Life cycle indicators framework: development of life cycle based macro-level monitoring indicators for resources, products and waste for the EU-27**. Luxemburgo: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Environment and Sustainability. 2012.
<https://cutt.ly/UQuQ0NB>

FIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. **Resolução nº 5, DE 14 de julho de 2020**. Dispõe sobre glossário a ser adotado nas Resoluções, Instruções

Operacionais e demais documentos do Sistema de Logística Reversa de Embalagens em Geral. São Paulo-SP. 2020.

FIRMO, A. L. B.; MOREIRA, H; C.; JUCÁ, J. F. T.; LUCENA, L. F. L.; MARIANO, M. O. H.; RUSSO, M. A. T.; SCHMIDT, T. **Gestão de resíduos sólidos urbanos com baixas emissões de GEE**. Caderno temático 2. PLANSAB. v.1, n.2, p. 1-36, 2019.
<https://cutt.ly/8QuQWbp>

FREITAS, S. S.; NOBREGA, C. C. **Os benefícios do co processamento de pneus inservíveis para a indústria cimenteira**. Engenharia Sanitaria e Ambiental, Rio de Janeiro, v. 19,n. 3, p. 293-300, 2014.
<https://cutt.ly/yQuTRxL>

FUGII, G. M. **Proposta de um modelo de dinâmica de sistemas aplicado à gestão de resíduos sólidos urbanos domiciliares de Curitiba**. 2019. 246 f. Tese (Doutorado em Tecnologia e Sociedade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
<https://cutt.ly/rhpfFYG>

FRISCHKNECHT R.; JUNGBLUTH N.; ALTHAUS H.-J.; DOKA G.; HECK T.; HELLWEG S.; HISCHIER R.; NEMECEK T.; REBITZER G.; SPIELMANN M.; WERNET G. Overview and Methodology. **ecoinvent report Nº. 1**. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf. 2007
<https://bityli.com/jXDyl>

GAMA, A. M. C.; COSTAS, V. C. B.; FIRMO, A. B. L.; JUCÁ, J. F. T. Estudo das emissões de GEE da disposição de resíduos sólidos na região metropolitana do Recife. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.10, n.6, p.163-177, 2019.
<https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.006.0015>

GOEDKOOP M.; HEIJUNGS R.; HUIJBREGTS M. A. J.; DE SCHRYVER A.; STRUIJS J.; VAN ZELM R. **ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and endpoint levels**. First edition. Report i: Characterization. The Netherlands: Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 2009.

GOEDKOOP, M.; OELE, M.; LEIJTING, J.; PONSIOEN, T.; MEIJER, E. **Introduction to LCA witch SimaPro**. Pré Consultants. Netherlands, Janeiro, 2016.

GENG, S.; WANG, Y.; ZUO, J.; ZHOU, Z.; DU, H.; MAO, G. Building life cycle assessment research: A review by bibliometric analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 76, 176 – 184, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.068>

GUEDES, F. L.; JUCA, J. F. T.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. I.; ARAGÃO JÚNIOR, W. R.; ARAUJO, J. A. R. Potencial energético do combustível derivado de resíduo produzido em Pernambuco, Brasil. In: **XIX Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – SILUBESA**. Recife., 2021a.

GUEDES, F. L.; BORGES, I.B.; EL-DEIR, S. G.; JUCA, J. F. T. Produção de energia térmica na indústria cimenteira a partir do coprocessamento de resíduos sólidos urbanos oriundos de Pernambuco. In: **XII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental – XII IBEAS**, Salvador. 2021b.

GÜERECA, L. P.; TORRES, N.; JUAREZ-LOPEZ, C. R. **The co-processing of municipal waste in a cement kiln in Mexico.** *Journal of Cleaner Production*, v.107 p. 741-748, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.085>

HAIR, J. F., BLACK, W. C; BABIN, B. J., ANDERSON, R. E., TATHAM, R. L. **Multivariate Data Analysis.** (6a ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall. 2006.

HAJINEZHAD, A.; ZIAEE, E.; TAHANI, M. **Utilization of Refuse-Derived Fuel (RDF) from Urban Waste as an Alternative Fuel for Cement Factory: a Case Study Ahmad.** *International Journal of Renewable Energy Research*, v.6, n.2, 2016.
 DOI: <https://doi.org/10.1234/ijrer.v6i2.3170>

HOMERCHER, E. T.; BERGUE, S. T. Políticas públicas e transparência: reflexões multidisciplinares. **Interesse Público – IP**, São Paulo, ano 13, n. 68, p. 405-422, 2011.
<https://cutt.ly/2njRnGK>

HUIJBREGTS, M. A. J.; STEINMANN, Z. J. N.; ELSHOUT, P. M. F.; STAM, G.; VERONES, F.; VIEIRA, M. D. M.; HOLLANDER A.; ZIJP, M.; VAN ZELM R. **ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level.** Report I: Characterization. The Netherlands: Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, 2016.

IBÁÑEZ-FORÉS, V.; BOVEA, M.D.; NÓBREGA, C.C.; GARCÍA, H.R. de M.; LINS, R.B. **Temporal evolution of the environmental performance of implementing selective collection in municipal waste management systems in developing countries: A Brazilian case study.** *Waste Management*, v. 72, p. 65-77. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.027>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico.** Cidades e Estados. Estimativas de População: 2020. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.
<https://bityli.com/tq7V5i>

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Solid Waste Disposal: Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Report produced by Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) on the invitation of the United Nations Framework Convention on Climate Change. Genebra: IPCC, 2006.
<https://bityli.com/qOP8D5>

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability.** Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 688, 2014.

ISHIZAKA, A.; LABIB, A. (2011). Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*. 2011, v. 38, n.11, p. 14336–14345. 2011.
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.143>

IVIG. Instituto Virtual Internacional de Mudanças - COPPE. Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia da UFRJ. **Rotas Tecnológicas para aproveitamento energético dos RSU.** Rio de Janeiro. 237 p. 2005.

JOHNKE, B. Emissions from waste incineration: good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories. **Intergovernmental Panel on Climate Change**, p. 455-468, 2002.

JUCÁ, J. F. T.; LIMA, J. D.; MARIANO, M. O. H.; FIRMO, A. L. B.; LIMA, D. G. A.; LUCENA, L. F. L.; FARIAS, P. R. R.; JUNIOR, F. H. C.; CARVALHO, E. H.; FERREIRA, J. A.; REICHERT, G. A. **Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. Jaboaão dos Guararapes: Grupo de Resíduos Sólidos – UFPE, 2014.

<https://cutt.ly/ChpgZLf>

JUCÁ, J. F. T.; BARBOSA, K.R.M.; Sobral, M.C. M. Sustainability indicators for municipal solid waste management: A case study of the Recife Metropolitan Region, Brazil. **Waste management & Research**, v. 38, p. 2020.

<https://doi.org/10.1177/0734242X20941088>

JUCÁ, J. F. T.; NOBERTO, A. S.; SANTOS JÚNIOR, J. I.; MARINHO, F. A. M. Brasília municipal solid waste landfill: a case study on flow and slope stability. **Soils and Rocks**, v. 44, p. 1-13, 2021.

<https://doi.org/10.28927/SR.2021.067321>

KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. **Steam Its Generation and Use**, 41 ed., Barbertn, Ohio, Estados Unidos, Nabcock & Wilcox Company. 2005.

<https://cutt.ly/3QuRUHj>

LEE, U., HAN, J., WANG, M. Avaliação das emissões de gás de aterro municipal aterros de resíduos sólidos para a análise do ciclo de vida das vias de conversão de resíduos em energia. *Journal Clean Production*. 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.016>

LEME, D. E. C., ALVES, E. V. C., LEMOS, V. C. O., FATTORI, A. Network analysis: a multivariate statistical approach for health science research. **Geriatr Gerontol Aging**, 14, 43-51. 2020.

<https://doi:10.5327/Z2447-212320201900073>

LIU, W.; WANG, J.; LI, C.; CHEN, B.; SUN, Y. Using Bibliometric Analysis to Understand the Recent Progress in Agroecosystem Services Research. **Ecological Economics**, 156, 293-305, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.09.001>

LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; CORTI, A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. **Waste Management**, v. 37, p. 26-44, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.waSIMAn.2014.11.010>

MACHADO, F. L. O.; MAGALHÃES, G. V. V.; LIMA, A. C. A.; ALBUQUERQUE, P. C.; STEFANUTTI, R.; ALBUQUERQUE, L. Valorização dos resíduos orgânicos através da biodigestão anaeróbia com a utilização da análise multivariada. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.1, p.4893-4903. 2021.

MAMEDE, M. C. S. Avaliação Econômica e Ambiental do Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos no Brasil. p.141. **Dissertação**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP, 2013. <https://cutt.ly/WniCoik>

MELCHIOR, C; ZANINI, R. R. Mortality per work accident: A literature mapping. **Safety Science**, 114, 72-78, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.01.001>

MELQUIADES, T.F.; CARVALHO, M.; ARAÚJO, Y. R. V.; COELHO JUNIOR, L. M. Pegada de carbono associada ao processo de pausteurização de sorvetes. v. 12, n. 2, p. 609-629, **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá (PR), 2019. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2019v12n2p609-629>

MENDES, L. F. R.; SHEL, M. S. (2017). Thermoelectric Power Plant for Compensation of Hydrological Cycle Change: Environmental Impacts in Brazil. **Case Studies in the Environment**, v. 1, n. 1, p.1-7, 2017. <https://doi.org/10.1525/cse.2017.000471>

MENDES, L. F. R.; PEREIRA, H. M. P.; SHEL, M. S. Análise multicritério para seleção de fontes renováveis de energia em um domicílio urbano no município de Campos dos Goytacazes/RJ. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.8, n.1, p. 278- 298, 2019. <https://doi.org/10.5380/rber.v8i1.56444>

MERRILD, H.; LARSEN, A. W.; CHRISTENSEN, T. H. Assessing recycling versus incineration of key materials in municipal waste: the importance of efficient energy recovery and transport distances. **Waste Management**, v. 32, n. 5, p. 1009-1018, 2012.

MERSONI, C.; REICHERT, G. A. Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: o caso do município de Garibaldi, RS. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.22. n.5. 2017. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017150351>

MONGEON, P.; PAUL-HUS, A. The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. **Scientometrics**, 106, 213–228, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1765-5>

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. **International Journal of Surgery**, 8, 336-341, 2010. <https://doi: 10.1016/j.ijisu.2010.02.007>

MONTEJO, C., TONINI, D., MÁRQUEZ, M. DEL C., FRUERGAARD ASTRUP, T., 2013. Mechanical-tratamento biológico: desempenho e potencialidades. Um LCA de 8 plantas MBT incluindo a caracterização de resíduos. J. Environ. Manag. 128, 661e673. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.063>

MÜLLER, L. N. P.; ARRUDA, J. B. F.; ALCAANTARA, R. L. C.; PEREIRA, R. L. multi-criteria analysis of alternatives for the treatment of municipal solid waste in the municipality of Juazeiro do Norte Ceará. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 26 n. 1. 2021. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190143>

NOBREGA, C. C.; CARVALHO, M.; GARCIA, H. R. M.; FORÉS, V. I.;BOVEA, M. D. **Avaliação do ciclo de vida da coleta seletiva de papel e papelão no núcleo do Bessa, município de João Pessoa (PB), Brasil**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.24, n.5, p. 875-886. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019197802>

NORBERTO, A. S.; CORRÊA, C. L.; MARIANO, M. O. H.; JUCÁ, J. F. T. Análise estatística da variabilidade de parâmetros de resistência ao cisalhamento de aterros sanitários. **Journal of Environmental Analysis and Progress**. v. 5, nº1, p. 108-116, 2020.

OLIVEIRA, C. M.; MATIAS, I. O.; AGUIAR, C. J. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: Uma revisão de mapeamento. **InterSciencePlace – International Scientific Journal**. v.13, n. 4, p. 189-208, 2018.

<https://dx.doi.org/10.6020/1679-9844/v13n4a10>

OLIVEIRA, A. L. A. R. **Avaliação do Ciclo de Vida aplicada na gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de caso do Distrito Federal**. Dissertação. Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96 p. 2019.

<https://cutt.ly/tm5ne6B>

ONU. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Assembleia Geral das Organizações Unidas. 2015. <https://cutt.ly/0nkwd2G>

Pacheco, R. L., Silva, I. D. G. M. Da., Melo, S. M. M. De., Riera, R. Guidelines para publicação de estudos científicos. Parte 4: como publicar revisões sistemáticas. **Diagn Tratamento**, 23, 19-23, 2018.

<https://bityli.com/24ewo>

PERES, S.; LOUREIRO, E.; SANTOS, H.; VANDERLEY E SILVA, F.; GUSMÃO, A. The Production of Gaseous Biofuels Using Biomass Waste from Construction Sites in Recife, Brazil. **Processes**, v. 8, n.4, p. 1-14, 2020.

<https://doi.org/10.3390/pr8040457>

PERNAMBUCO, Governo do Estado de Pernambuco. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos**. Pernambuco, 2012. 306 p. <https://cutt.ly/sb5ZLdZ>

PIAIA, E.; CASTILHOS JÚNIOR, A. B.; NADALETI, W. C.; SILVA, C. S.; HAERTEL, P. L. Potencialidades do uso energético de combustíveis derivados de resíduos sólidos urbanos (CDRU) na indústria brasileira. **Anais**. IV Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos – CONRESOL. Gramado-RS. 2021.

PINTO, M. I. F. Definição de Método expedito para determinação do PCI de CDR's a partir de análises complementares. **Dissertação**. Universidade Nova. Lisboa, 2017. <https://cutt.ly/7QuWFGI>

QAZI, W.A.; ABUSHAMMALA, M.F.M.; AZAM, M.H. Multi-criteria decision analysis of waste-to-energy technologies for municipal solid waste management in Sultanate of Oman. **Waste Management and Research**, v. 36, n. 7, p. 594-605, 2018.

<https://doi.org/10.1177/0734242X18777800>

RAMA, A. C. C. O. Análise da Viabilidade de Produção de Combustíveis Derivados de Resíduos. p. 119. **Dissertação**. Instituto Universitário de Lisboa, 2010. <https://cutt.ly/Knjvwj>

RAMOS, M. G; ROSÁRIO-LIMA, V. M; AMARAL-ROSA, M. P. IRAMUTEQ Software and Discursive Textual Analysis: Interpretive Possibilities. In: World Conference on Qualitative Research. **Springer**, Cham. 58-72, 2018.

https://doi.10.1007/978-3-030-01406-3_6

RECIVALONGO. Recycling and its infinite possibilities. Programa Operacional Regional do Norte. União Europeia. Portugal. 2020.

<https://recivalongo.pt>

REDEACV. Rede Empresarial Brasileira de Avaliação de Ciclo de Vida. Combustível Derivado de Resíduos: ACV Comparativa. Estudos e Casos Empresariais. Votorantim Cimentos. São Paulo-SP. 2017.

<https://bityli.com/qcbUET>

REVALORE. Viabilidade ambiental e econômica da recuperação energética de resíduos por meio de combustível derivado de resíduo – CDR. Conferência waste to energy. 2014.
<https://bityli.com/DVMbtr>

REZAEI, H.; YAZDAN PANAH, F.; LIM, C.J.; SOKHANSANJ, S. Pelletization of Refuse-Derived Fuel with Varying Compositions of Plastic, Paper, Organic and Wood. **Sustainability**. v.12, p. 2-11, 2020. <https://dx.doi.org/10.3390/su12114645>

RIBEIRO, A. R. B.; SANTOS, M. V. N.; LIMA, T. L. A.; OLIVEIRA, S.A. Análise dos benefícios de uma gestão sustentável gerados com a utilização da logística reversa. In: SILVA, R. C. P.; SANTOS, J. P. O.; MELLO, D. P.; EL-DEIR, S. G. (Orgs.). **Resíduos sólidos: tecnologia e boas práticas de economia circular**. 1ª ed. Recife: EDUFRPE, 2018. p. 18-30.

ROCHA, M. R.; LEMME, R. F. F.; D'AGOSTO, M. A. Inventário de ciclo de vida das emissões de co2 do pneu inservível como combustível em fornos de cimenteiras. **Anais**. Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente (ENGEMA). 2014.
<https://bityli.com/WMbmJI>

ROSINI, D. N.; BITTAR, B. D.; SIMIONI, F. J.; BECEGATO, V. A.; XAVIER, J. A.; DALALIBERA, A.; CARDOSO, D. C. C. Análise da viabilidade econômica e de risco para implantação de um aterro industrial para resíduos perigosos na região serrana de Santa Catarina. **Revista de gestão & sustentabilidade ambiental**. Florianópolis, v. 9, n. esp , p. 164-181, 2020.
<https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e0I2020164-181>

SAMPAIO, R. P. Estudo de caso dos possíveis efeitos deletérios causados pelo combustível derivado de resíduo (CDR) em caldeiras voltadas a produção de energia elétrica queimando principalmente bagaço de cana. 162 p. **Dissertação**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2014.
<https://cutt.ly/lnZ3Kfz>

SATHLER, D.; PAIVA, J. C.; BAPTISTA, S. Mudanças Climáticas: planejamento urbano e governança ambiental nas sedes das principais regiões metropolitanas e integradas de desenvolvimento do Brasil. **Caderno de Geografia**. v.29, n.56, 2019.
<https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2019v29n56p262>

SAATY, T. L. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**. v., n. 48, p. 9-26, 1990.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. Models, methods, concepts applications of the analytic hierarchy process. **Norwell**: Kluwer Academic Publishers, 2001.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4615-1665-1>

SCHLOTTHAUER, D. J., Processed Refuse Fuel Types. In: ROBINSON, W. D. et al, **The Solid Waste Handbook**, John Wiley & Sons, Inc., Nova Yorque. Cap. 12,2, p. 398-400. 1986

SILVA, L. J. A. S; EL-DEIR, S. G.; SILVA, R. G. Princípios da sustentabilidade no planejamento socioambiental do Comitê Ecos de Pernambuco. **Veredas do Direito – Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável**, v. 14 n. 30, 2017.
<https://doi.org/10.18623/rvd.v14i30.1080>

SILVA, R. F. A Análise Multicritério de tecnologias utilizadas na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos. 72p. **Dissertação**. Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca. Fundação Oswaldo Cruz, 2017.
<https://bityli.com/jt7nwo>

SILVA, R. C. P. ; A.R.S. Costa ; El-Deir, S.G. ; JUCA, J. F.T. Setorização de rotas de coleta de resíduos sólidos domiciliares por técnicas multivariadas: estudo de caso da cidade do Recife, Brasil. **Engenharia sanitária e ambiental (online)**, v. 25, p. 72-84, 2020.
<https://doi.org/10.1590/S1413-41522020200205>

SILVA, V. A. O. Aplicação de Avaliação de Ciclo de Vida na estimativa das emissões de gases de efeito estufa relacionadas ao consumo de alimentos: estudo de caso em Brasília, DF. **Dissertação**. xiv, 289p. Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Brasília-DF. 2021.

SIMA. SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA E MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Resolução nº 079/2009, de 04 de novembro de 2009**. Estabelece diretrizes e condições para a operação e o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em Usinas de Recuperação de Energia – URE.. São Paulo, 2009.

SIMA. SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE (SIMA). **Resolução nº 047/2020, de 06 de agosto de 2020**. Estabelece diretrizes e condições para o licenciamento de unidades de preparo de Combustível Derivado de Resíduos Sólidos - CDR e da atividade de recuperação de energia proveniente do uso de CDR. São Paulo, 2020.

SOARES, E.L.S.F. Estudo da caracterização gravimétrica e poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos. 133p. **Dissertação**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011.

SIMAPRO. **PRé Consultants**. *software* Simapro, versão 9.2.0.2. About SimaPro: The world's leading LCA software chosen by industry, research institutes, and consultants in more than 80 countries. 2021.

SOARES, F. R.; MIYAMARU, E. S.; MARTINS, G. Desempenho ambiental da destinação e do tratamento de resíduos sólidos urbanos com reaproveitamento energético por meio da avaliação do ciclo de vida na Central de Tratamento de Resíduos - Caieiras. Caieiras. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 22, n. 5, p.993-1003, 2017.
<https://doi.org/10.1590/s1413-41522017155522>.

SOLIANI, R. D.; . KUMSCHLIES, M. C. G.; SCHALCH, V. A gestão de resíduos sólidos urbanos como estratégia de sustentabilidade. **Revista Espacios**. v.40, nº3, p. 9-31, 2019.
<http://www.revistaespacios.com/a19v40n03/a19v40n03p09.pdf>

TAVARES, G. S. C. **Contribuição para a sustentabilidade na gestão dos resíduos sólidos urbanos nos municípios da Região Metropolitana**. 2018. 124f. Dissertação. Engenharia Civil - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
<https://cutt.ly/8nZ38u2>

TAYLOR, B. W. (2010). **Introduction to management science** (10th ed.). New Jersey: Pearson/Prentice Hall.

THAKUR, P.; GANGULY, R.; DHULIA, A. Occupational Health Hazard Exposure among municipal solid waste workers in Himachal Pradesh, India. **Waste Management**, v. 78, p. 483-489, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.020>

THEMELIS, N. J. An Overview OF the Global Waste-to-Energy Industry. In: **Waste Management World**, Jul-Aug 2003, pp. 40-47. Tulsa, OK: Pennwell Publishing, 2003.

VALENTE JUNIOR, P. A. F. O combustível derivado de resíduos no contexto das políticas nacionais de energia e resíduos sólidos. **Publica Direito**. Escola Superior Dom Helder Câmara. Belo Horizonte. 2015. <https://cutt.ly/vnjfvSF>

VAN DEN HEEDE, P.; DE BELIE, N. **Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green'concretes: literature review and theoretical calculations**. Cement and Concrete Composites, v. 34, n. 4, p. 431-442, 2012. <https://cutt.ly/FQuT0jG>

VERSCHOOR, A. H.; REIJNDERS, L. The use of life cycle methods by seven major companies. **Journal of Cleaner Production**, n. 7, p.375-382. 1999. <https://bityli.com/eSAc20>

VISEDO, G.; PECCHIO, M. **ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050**. Rio de Janeiro: SNIC, 2019 64 p. 2019. <https://cutt.ly/khpjszB>

YERGIN, D. **The quest: energy, security and the remaking of the modern world**. New York: The Penguin, 2011.

APÊNDICE A



Questionário: Dados Prefeitura do Município do Paulista-PE

Dissertação: Análise do potencial energético e emissão de gases de efeito estufa da produção de combustível derivado de resíduos sólidos urbanos no Município do Paulista-PE, Brasil

Este questionário enquadra-se numa pesquisa no âmbito de uma Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, realizado na Universidade Federal de Pernambuco. Os resultados obtidos serão utilizados apenas para fins acadêmicos. O questionário é anônimo, não devendo por isso colocar a sua identificação em nenhuma das folhas nem assinar o questionário. Não existem respostas certas ou erradas. Por isso lhe solicito que responda de forma espontânea e sincera a todas as questões.

- 1) Qual a cobertura de coleta dos resíduos sólidos urbanos no município?
- 2) Quantos são os setores de coleta urbana do município e frequência da coleta?
- 3) Qual valor médio de RSU coletados diariamente no município?
- 4) Classificação do tipo de coleta praticada atualmente no município?
- 5) Transporte (das residências para a unidade de transbordo):
- 6) Qual tipo e capacidade dos caminhões utilizados para coleta e transporte dos resíduos domiciliares?
- 7) Quantos caminhões são utilizados para coleta/transporte dos resíduos domiciliares?
- 8) Quantos quilômetros são percorridos por cada caminhão para transporte dos resíduos domiciliares para a unidade de transbordo (valor médio para coleta diária total dos resíduos)?
- 9) Qual o Consumo médio de diesel dos caminhões utilizados no transporte?
- 10) Quais Equipamentos utilizados na unidade de transbordo?
- 11) Qual o Consumo de água e eletricidade da unidade de transbordo?
- 12) Qual Tipo de caminhão utilizado no transporte da unidade de transbordo para o aterro sanitário?
- 13) Quais os Demais equipamentos envolvidos na etapa operacional?
- 14) Qual a Distância percorrida entre a unidade de transbordo e aterro sanitário?
- 15) Qual o Consumo de diesel dessa etapa do transporte (da unidade de transbordo para a disposição final)?

APÊNDICE B



Questionário: Dados Central de Tratamento de Resíduos

Dissertação: Análise do potencial energético e emissão de gases de efeito estufa da produção de combustível derivado de resíduos sólidos urbanos no Município do Paulista-PE, Brasil

Este questionário enquadra-se numa pesquisa no âmbito de uma Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, realizado na Universidade Federal de Pernambuco. Os resultados obtidos serão utilizados apenas para fins acadêmicos. O questionário é anônimo, não devendo por isso colocar a sua identificação em nenhuma das folhas nem assinar o questionário. Não existem respostas certas ou erradas. Por isso lhe solicito que responda de forma espontânea e sincera a todas as questões.

1) Dados RSU

Média quantidade de RSU/dia que Chega no CTR:

(%) de RSU/dia que vira CDR:

(%) de RSU/dia que vira recicláveis:

(%) de RSU/dia que vai pro aterro:

2) Dados Poder Calorífico

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Julho	Ago	Set	Out	Noc	Dez
PCI (kj/kg)												
PCS (kj/kg)												
Umidade												

3) Dados Gravimetria CDR:

Qual a composição Gravimétrica do CDR:

4) Qual valor médio de RSU coletados diariamente no município de Paulista-PE?

5) Qual tipo e capacidade dos caminhões utilizados o transporte dos RSU?

6) Quantos caminhões são utilizados para transporte à indústria?

7) Quantos quilômetros são percorridos por cada caminhão para transporte de CDR?

8) Qual o Consumo médio de diesel dos caminhões utilizados no processo?

9) Quais Equipamentos utilizados na triagem e produção de CDR?

10) Qual o Consumo de água e eletricidade?

APÊNDICE C



Questionário: Aproveitamento Energético de RSU

Dissertação: Análise do potencial energético e emissão de gases de efeito estufa da produção de combustível derivado de resíduos sólidos urbanos no Município do Paulista-PE, Brasil

Este questionário enquadra-se numa pesquisa no âmbito de uma Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, realizado na Universidade Federal de Pernambuco. Os resultados obtidos serão utilizados apenas para fins acadêmicos, sendo realçado que as respostas dos inquiridos representam apenas a sua opinião individual e não das Empresas/Instituições a que pertencem. O questionário é anônimo, não devendo por isso colocar a sua identificação em nenhuma das folhas nem assinar o questionário.

Não existem respostas certas ou erradas. Por isso lhe solicito que responda de forma espontânea e sincera a todas as questões.

Análise Multicritério - Fase I

O método escolhido para auxiliar a tomada de decisão de escolha da melhor alternativa é baseado nos conceitos do processo de análise hierárquica (AHP), que é um procedimento de auxílio na tomada de decisão entre múltiplas alternativas. Assim, nessa fase da pesquisa serão analisados por especialistas os impactos socioambientais, características técnicas e econômicas, possibilitando a verificação da tecnologia de tratamento térmico mais viável.

Os quatro critérios adotados na análise são: ambientais (Emissões de GEE, Impactos e etc...), econômicos (Custo de Implantação, Mercado e etc...), sociais (Inclusão Social) e técnicos (Pci, Composição Gravimétrica, e etc...).

1) Para definição da melhor tecnologia de tratamento térmico de RSU, em ordem de prioridade, qual a posição do critério AMBIENTAL em relação ao ECONÔMICO.

- Igual importância (1)
- Importância Moderada (3)
- Mais importante (5)
- Muito mais importante (7)
- Extremamente mais importante (9)
- Moderadamente menos importante (1/3)
- Menos importante (1/5)
- Muito menos importante (1/7)
- Extremamente menos importante (1/9)

2) Para definição da melhor tecnologia de tratamento térmico de RSU, em ordem de prioridade, qual a posição do critério AMBIENTAL em relação ao SOCIAL.

- Igual importância (1)
- Importância Moderada (3)
- Mais importante (5)
- Muito mais importante (7)
- Extremamente mais importante (9)
- Moderadamente menos importante (1/3)
- Menos importante (1/5)
- Muito menos importante (1/7)
- Extremamente menos importante (1/9)

3) Para definição da melhor tecnologia de tratamento térmico de RSU, em ordem de prioridade, qual a posição do critério AMBIENTAL em relação ao TÉCNICO.

- Igual importância (1)
- Importância Moderada (3)
- Mais importante (5)
- Muito mais importante (7)

- () Extremamente mais importante (9)
- () Moderadamente menos importante (1/3)
- () Menos importante (1/5)
- () Muito menos importante (1/7)
- () Extremamente menos importante (1/9)

4) Para definição da melhor tecnologia de tratamento térmico de RSU, em ordem de prioridade, qual a posição do critério ECONÔMICO em relação ao SOCIAL.

- () Igual importância (1)
- () Importância Moderada (3)
- () Mais importante (5)
- () Muito mais importante (7)
- () Extremamente mais importante (9)
- () Moderadamente menos importante (1/3)
- () Menos importante (1/5)
- () Muito menos importante (1/7)
- () Extremamente menos importante (1/9)

5) Para definição da melhor tecnologia de tratamento térmico de RSU, em ordem de prioridade, qual a posição do critério ECONÔMICO em relação ao TÉCNICO.

- () Igual importância (1)
- () Importância Moderada (3)
- () Mais importante (5)
- () Muito mais importante (7)
- () Extremamente mais importante (9)
- () Moderadamente menos importante (1/3)
- () Menos importante (1/5)
- () Muito menos importante (1/7)
- () Extremamente menos importante (1/9)

6) Para definição da melhor tecnologia de tratamento térmico de RSU, em ordem de prioridade, qual a posição do critério SOCIAL em relação ao TÉCNICO.

- () Igual importância (1)
- () Importância Moderada (3)
- () Mais importante (5)
- () Muito mais importante (7)
- () Extremamente mais importante (9)
- () Moderadamente menos importante (1/3)
- () Menos importante (1/5)
- () Muito menos importante (1/7)
- () Extremamente menos importante (1/9)

Potencial Energético - Fase II

Essa etapa trata-se de analisar o potencial energético do MUNICÍPIO ESTUDADO para o APROVEITAMENTO ENERGÉTICO através do COPROCESSAMENTO DE CDR de acordo com as características relevantes para a viabilidade técnica de produção do CDR, no qual foram definidos seis critérios: Poder calorífico inferior (PCI), nº de habitantes (HAB), índice de sustentabilidade urbana (ISLU), distância entre o município e o mercado consumidor de CDR (DIST), quantidade de RSU gerado (QTD) e composição gravimétrica dos RSU (GRAV), esses critérios foram avaliados de acordo com resultados esperados descrito por autores, sendo possível a formulação do problema em relação ao potencial do município.

De acordo com as características do Município pontue de 1 a 5, sendo 1 para MENOR pontuação e 5 para MAIOR pontuação.

- 1) Poder Calorífico Inferior (kcal/kg) 4.666 :
- 2) População (Hab) 334.376:
- 3) Índice de Sustentabilidade Urbana (Valor Máx.: 1) 0,622:
- 4) RSU gerado (Ton/mês) 8.100:
- 5) Distância Município x Mercado (km) < 100 :
- 6) Composição Gravimétrica (% orgânicos) 37,96