

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA EM SISTEMAS ISOLADOS (TE SISOL)

Relatório Levantamento de Recursos – Produto 8

Como empresa federal de utilidade pública, a Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH apoia o Governo Federal da Alemanha em seus objetivos na área de cooperação internacional.

Publicado por: Projeto Sistemas de Energia do Futuro

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH Sede social Bonn e Eschborn, Alemanha SCN Quadra 1 Bloco C Sala 1501, 15 andar, Ed. Brasília Trade Center. CEP 70711-902, Brasília-DF, Brasil Telefone: (61) 2101-2170 www.giz.de/brasil	Ministério de Minas e Energia (MME) Esplanada dos Ministérios, Bloco U Brasília/DF CEP: 70065-900 Telefone: (61) 2032-5555 www.gov.br/mme
---	---

Coordenação

Roberto Castro (GIZ)

Leticia Maciel (GIZ)

Gustavo Pires da Ponte (EPE)

Autores

Suani Teixeira Coelho – GBIO/IEE/USP

Vanessa Pecora Garcilasso – GBIO/IEE/USP

Marilyn Mariano dos Santos – GBIO/IEE/USP

Daniela Higgin Amaral – GBIO/IEE/USP

Danilo Perecin – GBIO/IEE/USP

João Maurício Pacheco – GBIO/IEE/USP

Mônica Joelma do Nascimento Anater – GBIO/IEE/USP

Revisão

Daniel Odílio – IESS/IDEAL/FV UFSC

Laís Vidotto – IESS/IDEAL/FV UFSC

Lucas do Nascimento – IESS/IDEAL/FV UFSC

Ricardo Rüther – IESS/IDEAL/FV UFSC

Comitê Técnico – Empresa de Pesquisa Energética (EPE)

Gustavo Pires da Ponte

Guilherme Mazolli Fialho

Aline Couto de Amorim

Michele Almeida de Souza

Paula Monteiro Pereira

Fotografia

Antônio Pereira/Semcom Manaus

O projeto Sistemas de Energia do Futuro integra a Cooperação Brasil-Alemanha para o Desenvolvimento Sustentável e é implementado pela Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH e pelo Ministério de Minas e Energia com recursos do Ministério Federal da Cooperação Econômica e Desenvolvimento (BMZ) da Alemanha.

Brasília, agosto de 2022.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. PANORAMA SISTEMAS ISOLADOS	17
1.2. ABORDAGEM METODOLÓGICA	24
1.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	25
2. PROCESSOS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA	28
2.1. GASEIFICAÇÃO.....	28
2.2. BIODIGESTÃO ANAERÓBIA	31
2.3. INCINERAÇÃO - CICLOS A VAPOR.....	35
2.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37
3. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS URBANOS (RU)	41
3.1. INTRODUÇÃO	41
3.2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	42
3.2.1 METODOLOGIA	46
3.2.2 RESULTADOS	59
3.3. RESÍDUOS DE TRATAMENTO DE ESGOTO	69
3.3.1 METODOLOGIA	69
3.3.2 RESULTADOS	72
3.4. CASO ESPECÍFICO DE FERNANDO DE NORONHA.....	75
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
4. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS (RAG)	80
4.1. METODOLOGIA	81
4.1.1 RESÍDUOS DA PODA DE LARANJA E LIMÃO (GALHOS)	83
4.1.2 RESÍDUOS DA COLHEITA E BENEFICIAMENTO DO MILHO (PALHA, FOLHA, COLMO E SABUGO) ...	83
4.1.3 RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DO CAFÉ (CASCA)	85
4.1.4 RESÍDUOS DA COLHEITA DO FEIJÃO (PALHA)	86
4.1.5 RESÍDUOS DA COLHEITA DA SOJA (PALHA).....	86
4.1.6 RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DO AÇAÍ (SEMENTE)	87
4.1.7 RESÍDUOS DA COLHEITA E BENEFICIAMENTO DE ARROZ (PALHA E CASCA).....	88
4.1.8 RESÍDUOS DA COLHEITA DA MANDIOCA (PARTE AÉREA DA PLANTA).....	89
4.1.9 RESÍDUOS DA COLHEITA DA BANANA (FOLHAS E PSEUDOCAULE)	90
4.1.10 RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DO COCO-DA-BAÍÁ (CASCA).....	92
4.1.11 RESÍDUOS DA COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR (PALHA)	93

4.2. RESULTADOS	94
4.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105
5. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS ANIMAIS (RA)	108
5.1. METODOLOGIA	109
5.1.1 DEJETOS DA AVICULTURA	109
5.1.2 DEJETOS DA SUINOCULTURA	110
5.1.3 DEJETOS DA BOVINOCULTURA	111
5.1.4 DEJETOS DA BUBALINOCULTURA.....	112
5.1.5 GERAÇÃO DE BIOGÁS E ELETRICIDADE DOS DEJETOS DA CRIAÇÃO – MODELAGEM	113
5.2. RESULTADOS	114
5.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118
6. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL	121
6.1. INTRODUÇÃO	121
6.1.1 PROPRIEDADES DA BIOMASSA FLORESTAL PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	122
6.1.2 RESÍDUOS FLORESTAIS MADEIREIROS	124
6.1.3 MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL (MFS)	126
6.1.4 CERTIFICAÇÃO FLORESTAL	127
6.2. METODOLOGIA	129
6.2.1 RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DE MADEIRA EM SERRARIAS	129
6.2.2 RESÍDUOS DE COLHEITA DO MANEJO FLORESTAL (GALHOS)	132
6.3. RESULTADOS	133
6.3.1 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DE MADEIRA EM SERRARIAS.....	133
6.3.2 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RESÍDUOS DE COLHEITA DO MANEJO FLORESTAL (GALHOS)	135
6.3.3 O CASO DO MUNICÍPIO DE ITACOATIARA – AM	136
6.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137
7. ESTIMATIVAS DE CUSTOS DOS PROCESSOS DE CONVERSÃO	143
7.1. GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	143
7.2. BIODIGESTÃO ANAERÓBIA	144
7.3. CONVERSÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS	146
7.4. CICLO RANKINE (CICLO A VAPOR).....	149
7.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	150
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	151
8.1. POTENCIAL DE ATENDIMENTO DOS MUNICÍPIOS ISOLADOS COM BIOMASSA	151
8.2. BARREIRAS EXISTENTES PARA VIABILIZAÇÃO DOS POTENCIAIS	156
ANEXO I	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de municípios que possuem sistemas isolados, total de sistemas isolados por estados, e número de municípios que mandam informações ao SNIS.	20
Tabela 2 - Usinas termelétricas (UTE) em operação nos estados do SISOL (excluindo Pernambuco), por combustível final.	20
Tabela 3 - Empreendimentos nos municípios onde estão instalados os sistemas isolados que utilizam biomassa como fonte energética (excluindo Pernambuco).	22
Tabela 4 - Intervalo de composição do biogás.	34
Tabela 5 - Composição média do biogás por tipo de substrato.	34
Tabela 6 - Disposição de RSU nos municípios que possuem sistemas isolados.	47
Tabela 7 - Média per capita coletada de RSU em relação à população urbana dos estados, em 2020.	48
Tabela 8 - Composição gravimétrica média dos RSU no Brasil e os valores de DOC.	50
Tabela 9 - Potência instalada e tecnologia indicada para diferentes faixas populacionais para aproveitamento energético de RSU (WtE).	57
Tabela 10 - Dez principais municípios com maior potencialidade de aproveitamento energético de RSU de aterro sanitário, considerando 100% de coleta dos resíduos gerados.	60
Tabela 11 - Potencial de biogás e energia elétrica pela disposição de RSU em aterros sanitários, considerando 100% de coleta dos resíduos gerados.	61
Tabela 12 - Dez principais municípios com maior potencialidade de aproveitamento energético de RSU pelo processo de biodigestão da fração orgânica.	63
Tabela 13 - Potencial de biogás e energia elétrica pela biodigestão da fração orgânica do RSU somando por estado as cidades que possuem sistemas isolados.	64
Tabela 14 - Dez principais municípios com maior potencialidade de aproveitamento energético de RSU por gaseificação.	66
Tabela 15 - Potencial de energia elétrica pela gaseificação de RSU considerando, em cada estado, as cidades que possuem sistemas isolados.	67
Tabela 16 - Dez principais municípios com maior potencial de aproveitamento energético de RSU considerando o tratamento da fração orgânica e a gaseificação do CDR.	68
Tabela 17 - Índice de atendimento urbano com rede de esgoto nos estados que possuem municípios na condição de Sistema Isolado Nacional.	69
Tabela 18 - Dez principais municípios com maior potencialidade de aproveitamento energético do biogás proveniente do tratamento anaeróbio do esgoto sanitário.	73
Tabela 19 - Potencial de geração de biogás e energia elétrica provenientes do tratamento anaeróbio do esgoto sanitário, somando por estado as cidades que possuem sistemas isolados.	74
Tabela 20 - Potencial de aproveitamento energético dos RSU do município de Fernando de Noronha, Pernambuco.	76
Tabela 21 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos da colheita e beneficiamento do milho (sabugo + palha), por município que possui potencial de aproveitamento da fonte.	94
Tabela 22 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos do beneficiamento do café (casca), por município que possui potencial de aproveitamento da fonte.	96
Tabela 23 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos da colheita da soja (palha), por município que possui potencial de aproveitamento da fonte.	96

Tabela 24 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos do beneficiamento do açaí (semente), por município que possui potencial de aproveitamento da fonte.....	96
Tabela 25 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos da colheita e beneficiamento do arroz (palha e casca) por município que possui potencial de aproveitamento da fonte.	97
Tabela 26 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos da colheita da banana (folhas e pseudocaule), por município que possui potencial de aproveitamento da fonte. ...	97
Tabela 27 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos da colheita da mandioca (parte aérea da planta), por município que possui potencial de aproveitamento da fonte. ..	98
Tabela 28 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos da colheita e/ou beneficiamento das culturas agrícolas por município que possui potencial de aproveitamento, considerando a somatória de todas as culturas analisadas.	100
Tabela 29 - Valores utilizados para determinação do potencial energético de resíduos de animais através do processo de biodigestão.	113
Tabela 30 - Síntese dos potenciais de biogás e energia elétrica para os municípios do sistema isolado, a partir dos dejetos de criação de aves de corte.	115
Tabela 31 - Síntese dos potenciais de biogás e energia elétrica para os municípios do sistema isolado, a partir dos dejetos de criação de galinhas poedeiras.	115
Tabela 32 - Síntese dos potenciais de biogás e energia elétrica para os municípios do sistema isolado, a partir dos dejetos de criação de suínos.	116
Tabela 33 - Síntese dos potenciais de biogás e energia elétrica para os municípios do sistema isolado, a partir dos dejetos de criação de bovinos de corte.....	116
Tabela 34 - Síntese dos potenciais de biogás e energia elétrica para os municípios do sistema isolado, a partir dos dejetos de criação vacas leiteiras.	117
Tabela 35 - Síntese dos potenciais de biogás e energia elétrica para os municípios do sistema isolado, a partir dos dejetos de criação de bubalinos.	117
Tabela 36 - Dez municípios com maiores potenciais de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento dos resíduos animais (em MWh/ano).	118
Tabela 37 - Potencial total de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento dos resíduos animais, por estado (em MWh/ano).	118
Tabela 38 - Empreendimentos que utilizam biomassa florestal para a geração de energia, por estado e município do sistema isolado (excluindo Pernambuco).....	122
Tabela 39 - Número de empreendimentos (serrarias) por município com sistema isolado.	129
Tabela 40 - Parâmetros florestais para o cálculo de geração de resíduos de serrarias.....	130
Tabela 41 - Parâmetros técnicos para o cálculo do potencial de geração elétrica a partir dos resíduos de serrarias.	131
Tabela 42 - Parâmetros florestais e técnicos para o cálculo do potencial de geração elétrica a partir dos resíduos da colheita.	132
Tabela 43 - Resultados obtidos a partir dos resíduos do processamento de madeira em serrarias nos municípios integrantes dos sistemas isolados (excluindo Pernambuco).	134
Tabela 44 - Resultados obtidos a partir dos resíduos de colheita do manejo florestal (galhos) nos municípios integrantes dos sistemas isolados (excluindo Pernambuco).	135
Tabela 45 - Custos de investimentos para plantas de geração de energia elétrica a partir da gaseificação de RSU, incluindo a produção de CDR.	143
Tabela 46 - Investimentos em serviços e tecnologias para geração distribuída de energia, em Reais.....	146
Tabela 47 - Investimentos em Grupos Geradores com Painel Manual, em Reais.	147

Tabela 48 - Investimentos em Grupos Geradores com Painel Automático + GD*, em Reais.	147
Tabela 49 - Média dos custos com manutenção, em Reais.	148
Tabela 50 - Custos das microturbinas de acordo com as potências disponíveis comercialmente, em Dólares americanos.	148
Tabela 51 - Estimativa de custo de implantação de plantas de geração de energia elétrica à biomassa de madeira, em Reais.	150
Tabela 52 - Potencial de atendimento com biomassa, considerando a relação potencial/carga, para cada município dos sistemas isolados cujo potencial de biomassa supera 100% da carga.	153
Tabela 53 - Potencial de atendimento com biomassa, considerando a relação potência/demanda.	154
Tabela 54 - Localidades integrantes dos sistemas isolados por municípios.	159

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	49
Equação 2	50
Equação 3	51
Equação 4	52
Equação 5	53
Equação 6	54
Equação 7	54
Equação 8	55
Equação 9	55
Equação 10	57
Equação 11	58
Equação 12	58
Equação 13	58
Equação 14	70
Equação 15	70
Equação 16	71
Equação 17	71
Equação 18	82
Equação 19	83
Equação 20	84
Equação 21	84
Equação 22	85
Equação 23	86
Equação 24	87
Equação 25	88
Equação 26	88
Equação 27	89
Equação 28	90
Equação 29	91
Equação 30	92
Equação 31	93
Equação 32	93
Equação 33	113
Equação 34	113
Equação 35	114
Equação 36	131
Equação 37	131
Equação 38	132
Equação 39	133
Equação 40	152

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Metodologias utilizadas para identificar o potencial do aproveitamento dos RSU em municípios supridos parcial ou totalmente por SISOL nos dois cenários considerados....46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de conversão da biomassa e seus principais produtos	28
Figura 2 - Esquema geral do biodigestor UASB.	32
Figura 3 - Biodigestor modelo LAFA.	33
Figura 4 - Fluxograma simplificado de sistema ciclo a vapor com extração na caldeira instalado pelo projeto ENERMAD.	37
Figura 5 - Processo de produção de madeira com cogeração de energia	125
Figura 6 - Fases para a implementação de uma planta de aproveitamento energético de RSU por gaseificação.	144
Figura 7 - Faixas de custos de projetos internacionais a biogás e resíduos sólidos urbanos.	149
Figura 8 - Valores internacionais de CAPEX e O&M de projetos a biogás e RSU.	149

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição da população (número de habitantes) total dos municípios analisados.	18
Gráfico 2 - Geração de energia elétrica no SISOL, por fonte.....	21
Gráfico 3 - Quantidade produzida das principais culturas agrícolas (em toneladas) na Região Norte no ano de 2020.....	80
Gráfico 4 - Custos estimados de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico em ETE por número de habitantes.	145

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEM	Área de Efetivo Manejo
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APA	Áreas de Proteção Ambiental
APP	Áreas de Preservação Permanente
BEN	Balanço Energético Nacional
BPF	Baixo Ponto de Fluidez
C	Carbono
CAR	Cadastro Ambiental Rural
CCC	Conta de Consumo de Combustíveis
CDR	Combustível Derivado de Resíduos
CNPT	Condições Normais de Pressão e Temperatura (1 atm; 0° C)
CSTR	<i>Continuous Flow Stirred Tank Reactor</i>
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DOC	Carbono Orgânico Degradável
DQO	Demanda química de Oxigênio
E	Energia elétrica disponível
EIR	Exploração de Impacto Reduzido
EMaxP	Exploração Máxima Permitida
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de Tratamento de Efluente
FC	Fator de Capacidade
FSC	<i>Forest Stewardship Council</i>
GBIO	Grupo de Pesquisa em Bioenergia
Gcal/h	Gigacaloria por hora
GD	Geração Distribuída
GEE	Gases do Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GW	<i>Gigawatt</i>
GWh	<i>Gigawatt-hora</i>
ha	Hectares
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IEMA	Instituto de Energia e Meio Ambiente
IISc	<i>Indian Institute of Science</i>
IMA	Incremento Médio Anual
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
kcal	Quilocaloria
kcal/h	Quilocaloria por hora
kcal/kg	Quilocaloria por quilograma
kcal/Nm ³	Quilocaloria por normal metro cúbico
kg	Quilograma

kg/h	Quilograma por hora
kg/hab/ano	Quilograma por habitante por ano
kg/hab/dia	Quilograma por habitante por dia
kgCO ₂	Quilograma de dióxido de carbono
kW	<i>Quilowatt</i>
kWe	<i>Quilowatt-elétrico</i>
kWp	<i>Quilowatt-potência</i>
l/dia	Litro por dia
LAFA	Lagoa Anaeróbia de Fluxo Ascendente
LandGEM	<i>Landfill Gas Generation</i>
m ³	Metro cúbico
m ³ /ano	Metro cúbico por ano
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MFS	Manejo Florestal Sustentável
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
MW	<i>Megawatt</i>
MWh	<i>Megawatt-hora</i>
MWh _{th}	<i>Megawatt-hora térmico</i>
MW _{th}	<i>Megawatt-térmico</i>
Nm ³	Normal metro cúbico (medido nas CNPT)
Nm ³ /ano	Normal metro cúbico por ano
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P	Potencial
PCI	Poder Calorífico Inferior
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PMFS	Plano de Manejo Florestal Sustentável
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
PRFV	Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro
PVC	Policloreto de vinila
RA	Resíduos Animais
RAFA	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
RAg	Resíduos agrícolas
REN	Resolução Normativa
RL	Reserva Legal
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RU	Resíduos Urbanos
SEEG	Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SIN	Sistema Interligado Nacional
SISOL	Sistema Isolados
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
t	Tonelada

t/ano	Tonelada por ano
t/dia	Tonelada por dia
t/h	Tonelada por hora
tC/tRSU	Tonelada de Carbono por tonelada de Resíduo Sólido Urbano
tep	Tonelada equivalente de petróleo
TI	Terras Indígenas
TQ	Terras Quilombolas
UASB	<i>Up-flow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UC	Unidades de Conservação
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
UTE	Usina Termelétrica
WtE	<i>Waste to energy</i>
η	Eficiência de conversão termoelétrica
ρ	Densidade básica

1. INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico Nacional apresenta dois tipos principais de sistemas: o Sistema Interligado (SI), cobrindo grande parte do país, composto por diferentes fontes de energia¹ e grandes linhas de transmissão, com atendimento de praticamente toda a população, e os Sistemas Isolados (SISOL), compostos por geração descentralizada, utilizando principalmente geradores diesel, que atendem uma parcela reduzida da população da região.

Os Sistema Isolados brasileiros estão, majoritariamente, inseridos na região Norte brasileira, notadamente nos estados de Rondônia, Acre, Amazonas, Roraima, Amapá, Pará e algumas localidades de Mato Grosso, além da ilha de Fernando de Noronha em Pernambuco. Isto posto, a maior parte encontra-se na região denominada Amazônia Legal que representa 59% do território nacional e inclui toda a área do bioma Amazônia, além de parte dos biomas Cerrado e Pantanal (SANTOS; SALOMÃO; VERÍSSIMO, 2021).

Por sua vez, o bioma amazônico abrange os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins, Mato Grosso e parte do Maranhão, ocupando 4,2 milhões de km² distribuídos por 775 municípios, representando 48% do território brasileiro. A Amazônia é o maior remanescente contínuo de floresta tropical úmida do mundo, possuindo extensa rede hidrográfica e enorme biodiversidade. Devido a estas características, tem papel estratégico na preservação, manutenção e conservação da biodiversidade, além de influenciar, significativamente, os climas regionais e globais (MACHADO, 2021; SANTOS; SALOMÃO; VERÍSSIMO, 2021).

A densidade demográfica na região é de 5,6 habitantes por km². Embora pouco povoada, em 2020 a região era habitada por 28,1 milhões de pessoas, cerca de 13% da população brasileira. A maior parte se encontra em áreas urbanas; contudo apresenta diversas comunidades em áreas remotas ou até mesmo isoladas, incluindo povos indígenas, quilombolas e ribeirinhos, os quais dependem economicamente e culturalmente dos recursos naturais (MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2022; SANTOS; SALOMÃO; VERÍSSIMO, 2021).

¹ Principalmente hidroelétricas (53,4%), gás natural (12,8%), energia eólica (10,6%) e biomassa (8,2%) (BEN, 2022).

De acordo com levantamento realizado por Santos; Salomão e Veríssimo (2021), 45% do território da Amazônia legal é composto por áreas protegidas, incluindo as Unidades de Conservação (UC) de Uso Sustentável, de Proteção Integral, Terras Indígenas (TI), Áreas de Proteção Ambiental (APA) e Terras Quilombolas (TQ). Além destas, compõem o território áreas produtivas com Cadastro Ambiental Rural (CAR), assentamentos rurais, as áreas militares, áreas de hidrografia, drenagem, infraestrutura urbana, glebas públicas não destinadas e áreas devolutas.

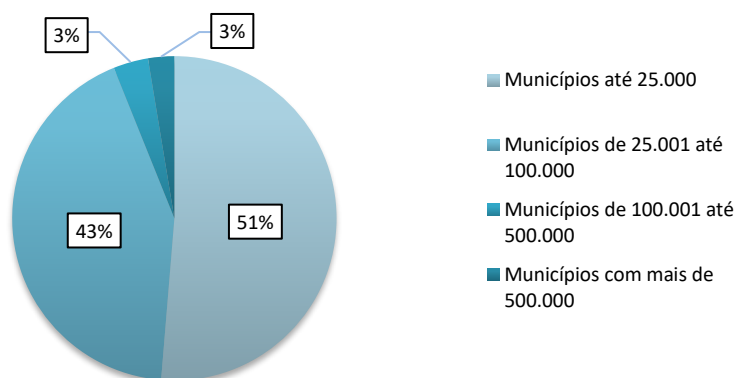
Em relação à cobertura e uso do solo, em 2020 a região que compreende a Amazônia Legal apresentou 74,21% do seu território coberto por formação florestal, seguida pela agropecuária com 17,40%, formações naturais não florestais com 5,70%; os corpos d'água representaram 2,50%, enquanto que as áreas alteradas sem vegetação somam 0,19% da área total (PROJETO MAPBIOMAS, 2022).

Estimativas apontam que a elevada diversidade e abundância dos recursos florestais na Amazônia, sendo esta considerada a maior reserva de madeira tropical do mundo, proporcionando inúmeros serviços ecossistêmicos e benefícios socioeconômicos para a população a partir da exploração dos produtos florestais madeireiros e não-madeireiros (MEDEIROS *et al.*, 2021; MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2022; PRADO, 2021). Entretanto, são múltiplas as ameaças inerentes à manutenção do bioma, dentre os quais estão a exploração desordenada dos recursos naturais, a expansão agrícola, o garimpo ilegal, as queimadas e os altos índices de desmatamento ilegal.

1.1. PANORAMA SISTEMAS ISOLADOS

De acordo com a EPE - Empresa de Pesquisa Energética (2022), são aproximadamente três milhões de consumidores em 251 localidades atendidas por nove distribuidoras, principalmente a partir de geração a diesel. O Gráfico 1 apresenta a distribuição da população total dos municípios analisados (IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2022).

Gráfico 1 - Distribuição da população (número de habitantes) *total* dos municípios analisados.



Fonte: Elaboração própria com base em dados de IBGE (2022).

Estes consumidores correspondem a apenas 0,6% do consumo nacional, mas estão distribuídos em 40% do território brasileiro, particularmente na região amazônica. Entretanto, a Amazônia Legal corresponde a 59% do território brasileiro, o que indica que grande parte da população não está incluída neste levantamento. A partir do Gráfico 1, observa-se que a grande maioria da população nos municípios do SISOL (51%) é abaixo de 25.000 habitantes, confirmando a dispersão de habitantes na região.

Esta oferta de energia se caracteriza por elevado índice de perdas e pela baixa qualidade da energia elétrica fornecida em sistemas de pequeno porte. Trata-se, em muitos casos, de geradores a diesel antigos e com dificuldades de manutenção. A grande maioria dos sistemas apresenta demanda máxima de até 10 MW, mas muitas comunidades têm demanda de apenas 100 kW, o que dificulta o atendimento.

Mais ainda, estes números não incluem a enorme quantidade de outras comunidades que não são atendidas e que atingem números expressivos. A seguir resume-se resultados levantados em publicação recente no Jornal da USP (CARDOSO; COELHO, 2022²). Segundo o IEMA - INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (2020), há 212.791 moradores de assentamentos rurais, 78.388 indígenas, 59.106 habitantes de unidades de conservação e 2.555 quilombolas que não possuem nenhum acesso à energia elétrica pública na Amazônia Legal. No total, segundo o estudo, são 990.103 os chamados “excluídos elétricos” na região, o que corresponde a 3,5% da população local da Amazônia Legal.

² Cardoso, J. R., Coelho, S.T. (2022) EIXO TEMÁTICO ENERGIA: ALGUMAS DAS PREOCUPAÇÕES, Jornal da USP, no prelo.

O mesmo estudo analisou a população sem acesso à energia elétrica para cada um dos municípios da Amazônia e comparou aqueles com a maior população sem acesso à energia com o IDHM (Índice de Desenvolvimento Humano Médio) dos mesmos. Considerando os dez municípios com a maior população sem acesso à energia, todos têm IDHM considerado Baixo (de 0,500 a 0,599) ou Muito Baixo (entre 0,000 e 0,499), com exceção de Sena Madureira (AC) e Guajará-Mirim (RO), que têm IDHM Médio de 0,600 a 0,699. Esse pode ser considerado mais um indicativo da correlação entre acesso seguro e confiável à energia elétrica e qualidade de vida.

Como mencionado em Cardoso; Coelho (2022), com base em IEMA (2021), “é importante ressaltar que o acesso igualitário à energia promove não apenas o desenvolvimento econômico das comunidades locais, mas também é responsável pela inclusão e bem-estar social de seus indivíduos. A população mais suscetível e vulnerável a esta situação, como os habitantes das regiões atendidas pelos sistemas isolados, tem sua situação agravada por vivenciarem um precário abastecimento elétrico, com impactos na saúde, nas emissões de gases do efeito estufa, na exclusão social e no baixo desenvolvimento socioeconômico como um todo. Ou seja, a provisão de serviços seguros, adequados e eficientes de energia são essenciais à organização social, econômica e ambiental dessas populações”.

Outro fato de relevância é que a grande maioria dos municípios integrantes do SISOL não fornece as informações de saneamento ao Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) (Tabela 1). Esta circunstância representa um grande desafio no atendimento às comunidades, bem como para os estudos e pesquisas locais. Observa-se também (Tabela 1) que os chamados SISOL, constando na base de dados da EPE (em número de 251³) correspondem apenas a 116 municípios; isto significa que uma quantidade expressiva de habitantes não está computada nestas estatísticas, pois o número total de municípios na Amazônia Legal é 775.

³ Conforme Relatório Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados Horizonte 2022/2026 – Ciclo 2021 (EPE, 2022) https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-652/EPE-NT-Planejamento%20SI-Ciclo_2021_r2.pdf

Tabela 1 - Número de municípios que possuem sistemas isolados, total de sistemas isolados por estados, e número de municípios que mandam informações ao SNIS.

UF	Nº de municípios	Nº de sistemas isolados	Municípios no SNIS
Acre	7	7	5
Amazonas	60	97	39
Amapá	6	25	3
Mato Grosso	1	1	0
Pará	18	21	12
Pernambuco	1	1	1
Rondônia	11	22	7
Roraima	12	77	9
TOTAL	116	251	76

Fonte: Elaboração própria com base em dados de EPE (2022); IBGE (2022); SNIS (2022).

Em termos de suprimento de energia elétrica, a região é predominantemente atendida por meio de usinas termelétricas que utilizam óleo diesel como combustível (Tabela 2) e que por ser uma fonte fóssil é altamente poluente, além de ter preços elevados e relativamente voláteis (EPE, 2018).

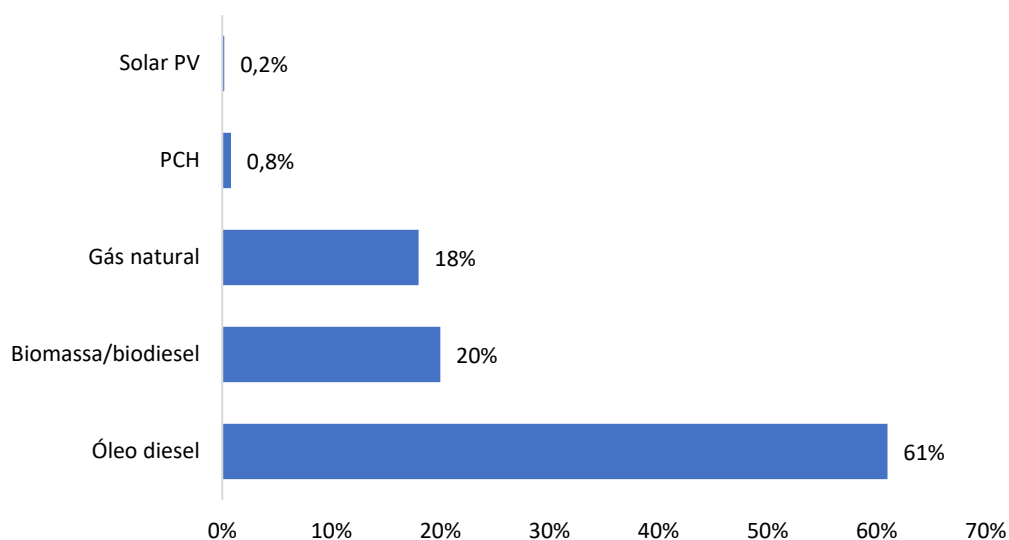
Tabela 2 - Usinas termelétricas (UTE) em operação nos estados do SISOL (excluindo Pernambuco), por combustível final.

Combustível	Quantidade	Potência (MW)
Bagaço de Cana de Açúcar	12	218,38
Biogás – RA	2	2,34
Capim Elefante	1	1,70
Carvão – RU	1	3,00
Carvão Mineral	1	103,85
Casca de Arroz	2	3,49
Gás Natural	17	2.083,25
Lenha	3	137,54
Licor Negro	1	55,00
Óleo Combustível	18	246,33
Óleo Diesel	525	1.821,38
Óleos vegetais	4	5,63
Resíduos Florestais	26	185,81
TOTAL	613	4.867,71

Fonte: Adaptado de ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2022).

Contudo, conforme apresentado no Gráfico 2, a região que compreende o SISOL apresenta potencial de aproveitamento de fontes primárias renováveis de energia, tais como biomassa, eólica e solar, para atendimento das comunidades isoladas, as quais vivenciam um precário abastecimento de energia elétrica, sendo esta, uma consequente barreira ao desenvolvimento socioeconômico da população (BRANDÃO, 2009).

Gráfico 2 - Geração de energia elétrica no SISOL, por fonte.



Fonte: Adaptado de EPE (2022).

Atualmente, nos estados que possuem sistemas isolados, temos um total de 71 empreendimentos em operação, em construção ou em construção não iniciada que utilizam biomassa como fonte energética; 12 deles utilizam o bagaço de cana-de-açúcar, 30 usam resíduos florestais, 16 óleos vegetais, e 13 outros combustíveis.

Considerando os empreendimentos em operação, em construção ou em construção não iniciada localizadas, apenas, nos municípios que possuem sistemas isolados, temos um total de 29 empreendimentos que utilizam biomassa como matéria-prima. Destes, quatro utilizam resíduos agroindustriais, 14 utilizam biocombustíveis líquidos, e 11 combustível de origem florestal (Tabela 3). Especificamente, quatro usinas utilizam capim elefante, uma utiliza licor negro, 14 utilizam óleos vegetais e 10 utilizam resíduos florestais (ANEEL, 2022). Portanto, verifica-se que a utilização de resíduos agrícolas para a geração de energia não é uma atividade já implementada nas localidades.

Tabela 3 - Empreendimentos nos municípios onde estão instalados os sistemas isolados que utilizam biomassa como fonte energética (excluindo Pernambuco).

Empreendimento	UF	Fase	Tipo	Combustível Final	Potência Outorgada (kW)	Município
BBF Benjamin Constant	AM	Construção não iniciada	Agroindustriais	Capim Elefante	9.800	Atalaia do Norte
BBF Tefé	AM	Construção não iniciada	Agroindustriais	Capim Elefante	9.800	Tefé
Rio Amazonas (Antiga Itacoatiara)	AM	Construção não iniciada	Floresta	Resíduos Florestais	8.000	Itacoatiara
Itacoatiara	AM	Operação	Floresta	Resíduos Florestais	9.000	Itacoatiara
Flórida Clean Power do Amapá	AP	Operação	Agroindustriais	Capim Elefante	1.700	Macapá
Martins	MT	Operação	Floresta	Resíduos Florestais	2.000	Colniza
BBF Anajás	PA	Construção não iniciada	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	2.835	Anajás
BBF Faro	PA	Construção não iniciada	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	1.575	Faro
BBF Gurupá	PA	Construção não iniciada	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	3.780	Gurupá
BBF Água Branca	PA	Construção não iniciada	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	630	Itaituba
BBF Crepurizão	PA	Construção não iniciada	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	2.835	Itaituba
BBF Jacareacanga	PA	Construção não iniciada	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	3.465	Jacareacanga
BBF Muaná	PA	Construção não iniciada	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	4.095	Muaná
BBF Porto de Moz	PA	Construção não iniciada	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	5.670	Porto de Moz
BBF São Sebastião da Boa Vista	PA	Construção não iniciada	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	3.780	São Sebastião da Boa Vista
BBF Terra Santa	PA	Construção não iniciada	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	5.040	Terra Santa
Jari Celulose	PA	Operação	Floresta	Licor Negro	55.000	Almeirim
Ebata	PA	Operação	Floresta	Resíduos Florestais	800	Belém
Pampa	PA	Operação	Floresta	Resíduos Florestais	550	Belém
Tramontina	PA	Operação	Floresta	Resíduos Florestais	1.500	Belém
Castanhal I	PA	Operação	Floresta	Resíduos Florestais	1.200	Prainha

Empreendimento	UF	Fase	Tipo	Combustível Final	Potência Outorgada (kW)	Município
BBF Izidolândia	RO	Operação	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	640	Alta Floresta d'Oeste
BBF Urucumacua	RO	Operação	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	640	Chupinguaia
BBF Baliza	RR	Construção	Agroindustriais	Capim Elefante	17.616	São João da Baliza
Palmaplan Energia 2	RR	Construção	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	11.550	Rorainópolis
Híbrido Forte de São Joaquim	RR	Construção não iniciada	Biocombustíveis líquidos	Óleos vegetais	56.217	São João da Baliza
Pau Rainha	RR	Operação	Floresta	Resíduos Florestais	10.000	Boa Vista
Santa Luz	RR	Operação	Floresta	Resíduos Florestais	10.000	Boa Vista
Bio Fuel	RR	Operação	Floresta	Resíduos Florestais	4.800	São João da Baliza

Fonte: Adaptado de ANEEL (2022).

Observa-se que a maior parte dos empreendimentos existentes que utilizam a biomassa se baseia no uso de óleos vegetais. Esta pode ser uma opção quando a plantação ocorre em áreas já degradadas, o que felizmente não corresponde à maioria da área da região amazônica. Entretanto, esta opção não foi contemplada neste estudo, que analisou apenas a utilização de resíduos de biomassa.

A questão de uso da terra para plantações visando a bioenergia na região se apresenta como bastante controversa, pois pode ser encarada como um incentivo indireto ao desmatamento da Amazônia, já ocorrendo em grande escala. Por este motivo, a seleção dos tipos de biomassa se concentrou no uso de diferentes tipos de resíduos, no contexto da bioeconomia. Mesmo no caso de resíduos de madeira, os mesmos foram considerados apenas para projetos certificados pelo *Forest Stewardship Council* (FSC).

1.2. ABORDAGEM METODOLÓGICA

A possibilidade de uso de uma fonte de energia renovável pode ser determinada através dos potenciais teórico, técnico, econômico e/ou realizável e é aplicável também para seus resíduos (AMARAL, 2019; COELHO *et al.*, 2020; SANTOS, 2017). Para o presente trabalho foi assumida a abordagem pelos potenciais teórico e técnico de cogeração de energia termelétrica que são definidas por Amaral (2019); Coelho *et al.* (2020); Santos (2017) e Resch *et al.* (2008) como:

1. Potencial teórico: limite superior de produção de um determinado recurso energético com base no conhecimento científico atual existente em uma área selecionada.
2. Potencial técnico: são considerados os limites impostos pelas tecnologias empregadas na geração de energia, tais como eficiência dos equipamentos utilizados, área disponível para produção do recurso energético, taxa de coleta e tratamento de resíduos, possibilidades de incrementos tecnológicos na conversão energética etc.

Assim, com o objetivo de aumentar o acesso à energia elétrica de forma sustentável a partir de fontes renováveis, além de substituir os poluentes e ineficientes geradores a diesel, este relatório apresenta os resultados dos potenciais de aproveitamento energético de resíduos de biomassa disponíveis nos municípios que fazem parte dos (251) sistemas isolados

selecionados pela EPE. O levantamento I em questão corresponde à Etapa 8 – Levantamento de Recursos do Projeto Sistemas de Energias do Futuro III (19.2253.3-001.00). Foram levantados os potenciais de resíduos urbanos, agrícolas, de criação animal e de manejo florestal e serrarias, a seguir detalhados. Os resultados indicam perspectivas interessantes de atendimento e aumento na oferta de energia a partir de resíduos de biomassa. Esta opção, além de garantir uma maior oferta de energia, apresenta impactos ambientais e sociais positivos, evitando o descarte inadequado dos mesmos, além de possibilitar a geração de emprego e renda na região.

Os itens a seguir apresentam os processos de conversão energética aplicados neste estudo, bem como as metodologias utilizados no levantamento dos recursos de biomassa e dos potenciais energéticos disponíveis no SISOL. Ao final, é apresentada estimativa de custos do emprego dos processos de conversão analisados.

É importante destacar que a metodologia e os resultados apresentados neste estudo referem-se às estimativas de potencial técnico de geração de energia elétrica para cada biomassa analisada, e não à estudos de caso específicos. Para maiores detalhes seriam necessárias visitas de campo, que não foram realizadas pela equipe do projeto. Portanto, para o cálculo dos potenciais é necessário adotar diversas premissas, conforme descrito em cada metodologia, uma vez que boa parte das informações necessárias não estão disponíveis ou não existem.

1.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, Daniela Higgin. **Potencial de uso da biomassa florestal na geração de energia térmica e elétrica pela indústria do estado do Rio de Janeiro**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019. Disponível em: <https://locus.ufv.br//handle/123456789/27845>. Acesso em: 20 maio 2022.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Matriz por origem de combustível**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://bityli.com/ObWtP>. Acesso em: 18 jul. 2022.

BRANDÃO, Pedro Christo. **Sustentabilidade da produção madeireira e potencial para geração de energia em manejo florestal comunitário, FLONA do Purus, Amazônia Ocidental**. 2009. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

COELHO, Suani Teixeira *et al.* **Atlas de bioenergia do Estado de São Paulo**. São Paulo: [s. n.], 2020.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica EPE 17/18 Potencial Energético de Resíduos Florestais do Manejo Sustentável e de Resíduos da Industrialização da Madeira.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2018.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados - Ciclo 2021.** [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-652/EPE-NT-Planejamento%20SI-Ciclo_2021_r2.pdf>. Acesso em: 3 ago. 2022.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da população residente para os municípios e para as unidades da federação.** 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?edicao=31451&t=resultados>. Acesso em: 14 jul. 2022.

IEMA - INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. **Exclusão Elétrica na Amazônia Legal: quem ainda está sem Acesso à Energia Elétrica?** [S. l.: s. n.], 2020.

MACHADO, Helton Bastos. **Caracterização do potencial madeireiro de uma floresta intensamente explorada no sudeste paraense.** 2021. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, [s. l.], 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufra.edu.br:8080/jspui/handle/123456789/1484>.

MEDEIROS, Dayane Targino de *et al.* Characterization of Amazon woods. **Madera y Bosques**, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 1–12, 2021. Disponível em: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712021000200212&script=sci_arttext.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Amazônia Legal.** [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/ecossistemas-1/biomas/amazonia>. Acesso em: 24 jun. 2022.

PRADO, Rachel Bardy. Serviços Ecossistêmicos: estado atual e Desafios para a pesquisa na Amazônia. **Terceira Margem Amazônia**, [s. l.], v. 6, n. 16, p. 11–22, 2021.

PROJETO MAPBIOMAS. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://mapbiomas.org/>. Acesso em: 30 jun. 2022.

RESCH, Gustav *et al.* Potentials and prospects for renewable energies at global scale. **Energy Policy**, [s. l.], v. 36, n. 11, p. 4048–4056, 2008.

SANTOS, Daniel; SALOMÃO, Rodney; VERÍSSIMO, Adalberto. **Fatos da Amazônia 2021. Amazônia 2030.** [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://amazonia2030.org.br/wp-content/uploads/2021/04/AMZ2030-Fatos-da-Amazonia-2021-3.pdf>.

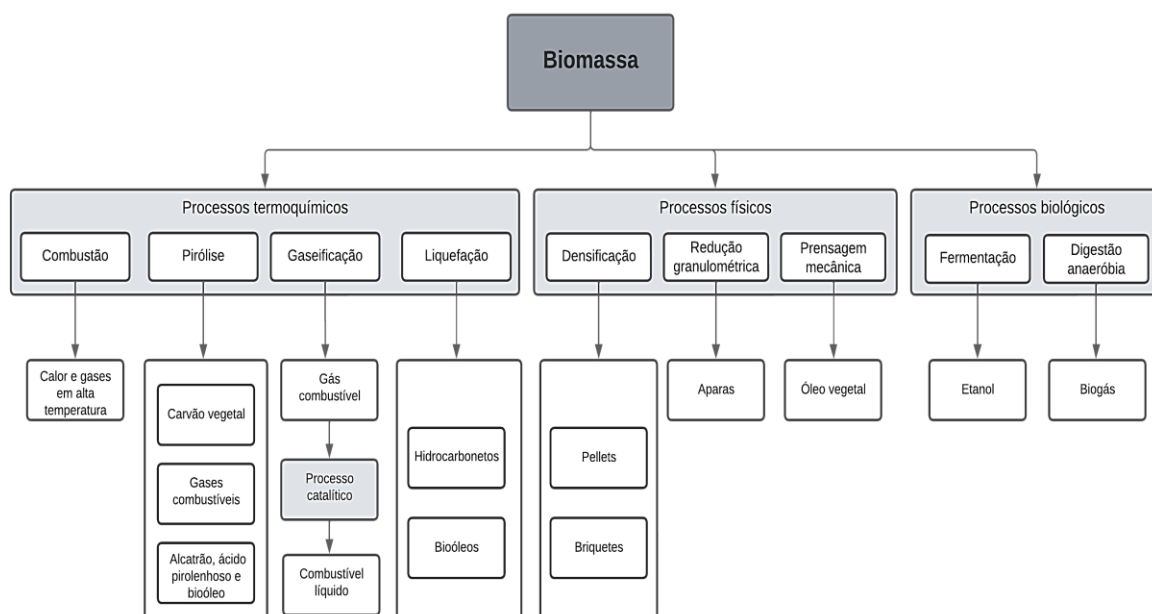
SANTOS, Priscila Alves dos. **Potencial teórico e técnico de geração de energia a partir de biomassa e fotovoltaica para o estado de São Paulo.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO. **Painel de informações sobre saneamento**. [S. l.], 2022. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/>. Acesso em: 12 mar. 2022.

2. PROCESSOS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA

Este item apresenta uma breve revisão dos principais processos de conversão energética das biomassas abordadas no presente trabalho analisando a viabilidade técnica de sua aplicação nos sistemas isolados. Para tal, foram consideradas apenas as tecnologias comercializadas no país. A Figura 1 apresenta as diferentes rotas tecnológicas para obtenção de energia a partir da biomassa indicando seus principais produtos.

Figura 1 - Processos de conversão da biomassa e seus principais produtos



Fonte: Adaptado de Nogueira; Lora (2003).

2.1. GASEIFICAÇÃO

O processo de gaseificação é definido como a combustão parcial de um sólido que ocorre quando o ar, ou mais precisamente o oxigênio, está em quantidade inferior ao que seria necessário para uma queima completa do combustível (DIAS, 2003). Este processo está associado à conversão de combustíveis sólidos em gasosos de média ou baixa capacidade calorífica, por meio de reações químicas que envolvem vapor quente e ar, ou oxigênio, em quantidades inferiores à estequiométrica (MARTINS, 2006).

Embora a madeira seja mais utilizada em processo de gaseificação, outros insumos também apresentam comportamento adequado ao serem utilizados como combustível em gaseificadores. Para isso é necessário que a matéria-prima a ser utilizada seja estudada para adaptar o gaseificador às diferentes características que o material pode apresentar, em

especial, ao teor de cinzas, temperatura ideal, teor de alcatrão e principalmente teor de umidade, pois ela dificulta a ignição do sistema. Dentre os insumos que podem alimentar um sistema de gaseificação estão os resíduos sólidos urbanos (DIAS, 2003). O item 3.2 apresenta exemplos de plantas de gaseificação de RSU no Brasil.

De acordo com Infiesta (2015), a gaseificação dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) ocorre da seguinte maneira:

1. Primeiramente ocorre a recepção dos resíduos e a produção de Combustível Derivado de Resíduos (CDR⁴). Nesta etapa o RSU recebido passa por um processo de desumidificação, trituração e compactação, de forma a se obter um combustível de características padronizadas e específico para o gaseificador, o denominado CDR;
2. A segunda etapa constitui-se da unidade de gaseificação. Nesta etapa o CDR produzido é utilizado como combustível no gaseificador. Durante o processo de gaseificação ocorre a oxidação parcial do CDR a elevadas temperaturas (500 a 1.400°C), com consequente produção de um gás combustível de múltiplas aplicações, denominado gás de síntese (ou *syngas* em inglês);
3. A última etapa do processo corresponde à unidade de geração de energia. Uma das aplicações possíveis do gás de síntese é a geração de energia elétrica por meio de motor ciclo Otto, ou seja, o gás gerado no processo de gaseificação pode ser utilizado como combustível diretamente em um motor ciclo Otto, acoplado a um gerador, para que ocorra a geração de energia elétrica.

Com a complexidade do processo, a eficiência da gaseificação e a composição dos produtos dependem de diversos fatores, tais como: tipo de gaseificador e suas condições de operação, agente gaseificador e uso de vapor de água, composição e tamanho da partícula da matéria orgânica utilizada, entre outros (MIRANDA, 2014; SITUMORANG *et al.*, 2020).

Os principais tipos de equipamentos para gaseificação são os gaseificadores de leito fixo e os gaseificadores de leito fluidizado. Eles são diferenciados pela forma em que os reagentes, ou seja, a biomassa e os agentes gaseificadores, entram em contato no equipamento. Cada

⁴ CDR é uma mistura de diversos materiais sólidos que compõe o RSU que não são possíveis de reciclar, como fraldas e absorventes, Isopor e espumas, plástico filme, borracha, madeira, entre outros (CARBOGAS, 2019).

tipo é mais adequado a uma combinação de propriedades da biomassa, agente gaseificador e destinação do produto.

De acordo com Coelho e Diaz-Chavez (2020), os gaseificadores de leito fixo têm menores custos de investimento e operação mais simples, sendo mais adequados a plantas de pequena e média escala, permitindo, especialmente os de fluxo ascendente, o uso de matéria-prima mais úmida e menos uniforme. Os de leito fluidizado, por sua vez, são mais apropriados para projetos de média a grande escala. Com operação mais delicada e complexa, podem obter níveis de eficiência mais elevados. Segundo revisão de Ruiz *et al.* (2013), os limites de potência dos gaseificadores são de até 1 MW, no caso de leito fixo, e de até 10 MW, para os de leito fluidizado. Entretanto, considerando experiências anteriores da equipe do projeto, aqui foram considerados que os gaseificadores de leito fixo devem ser utilizados apenas até 200 kW de potência e, a partir deste limite, são indicados os gaseificadores de leito fluidizado⁵.

O gás de síntese formado no processo de gaseificação é composto de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), hidrogênio (H₂), metano (CH₄), traços de hidrocarbonetos pesados, água, nitrogênio e várias outras substâncias, como pequenas partículas de coque, cinza, alcatrão, ácidos e óleos, que são considerados contaminantes (INFIESTA, 2015).

O gás combustível (*syngas*) é principalmente utilizado para a produção de eletricidade, que pode ocorrer em duas opções tecnológicas diferentes e atualmente comercializadas. O primeiro utiliza um motor a ciclo Otto, adaptado para *syngas*; a outra opção é o ciclo a vapor (*Rankine*), onde é queimado em caldeiras e o vapor produzido é alimentado nos turbogeradores. Toda a planta pode funcionar em uma operação automática, levando a uma grande eficiência e segurança.

A composição do gás de síntese varia de acordo com o tipo de resíduo e processo utilizado. As estimativas do potencial energético do gás de síntese dependem fortemente da sua composição, visto que o Poder Calorífico Inferior (PCI) do combustível depende do material a ser gaseificado, e do rendimento dos equipamentos de conversão energética considerados (CARNEIRO, 2009).

⁵ Coelho, S. T., Notas de aula. IEE/USP.

O processo de gaseificação de RSU não fornece oxigênio suficiente para a formação de dioxinas e furanos⁶ e, portanto, não há necessidade de sistemas de limpeza para estes poluentes; além disso, em instalações nas quais o gás de síntese é usado para produzir outros produtos ele é extinto rapidamente de modo que não há tempo de permanência na faixa de temperatura na qual estes compostos se formam (GTC, 2011).

As cinzas produzidas a partir da gaseificação são consideradas seguras para ser utilizadas como cobertura diária de aterros, por exemplo, podendo ser utilizadas também para fabricação de cimento, telhas ou jateamento de asfalto (GTC, 2011).

2.2. BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

O processo de biodigestão anaeróbia requer a ausência de oxigênio e a presença de micro-organismos estritamente anaeróbicos. Este processo é a consequência de uma série de interações entre vários grupos de micro-organismos e ocorre em diferentes estágios: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (VERMA, 2002). Trata-se de uma técnica de tratamento de resíduos pois reduz o conteúdo orgânico (medido em demanda bioquímica de oxigênio, DBO, ou demanda química de oxigênio, DQO) de um efluente, ao decompor moléculas orgânicas complexas nos componentes liberados no biogás. Em alguns casos, além do benefício do saneamento, pode-se usar o lodo formado no processo como biofertilizante agrícola.

A tecnologia de biodigestão é mais adequada ao tratamento de substratos considerados “úmidos”. Por isso, as matérias-primas mais comuns de produção de biogás via biodigestão são resíduos de alimentos, esgoto e dejetos animais. Substratos “secos” podem ser convertidos em biogás em sistemas de codigestão com outro substrato. Como substrato principal, substratos “secos” são mais adequados à utilização de outro processo de conversão em energia, como a gaseificação (GASPER; SEARCHINGER, 2018), tecnologia considerada neste estudo para o caso de RSU pós-triagem.

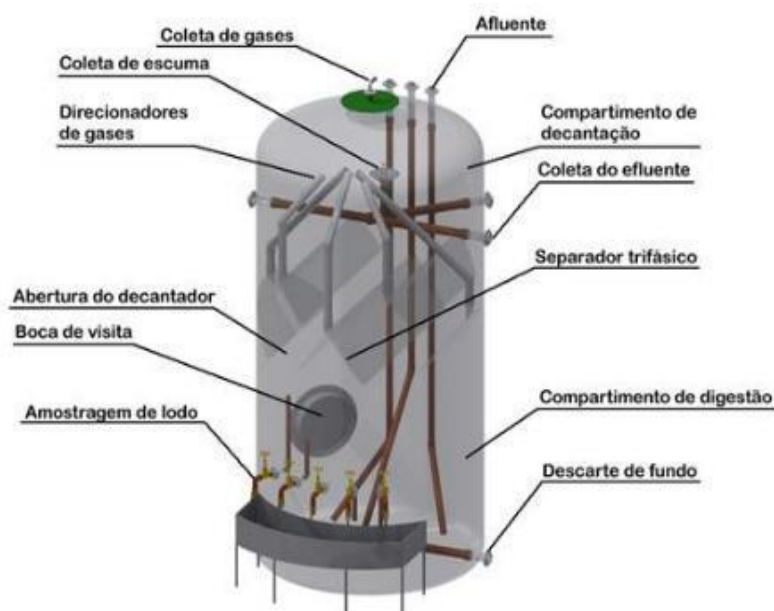
O processo de biodigestão anaeróbia acontece em biodigestores. Há diferentes tipos de biodigestores anaeróbios, que se adequam a cada substrato e tipo de operação segundo fatores técnico-econômicos. Dentre eles destaca-se o biodigestor modelo RAFA (Reator

⁶ Dioxinas e furanos são substâncias cancerígenas e, por isso, são alguns dos contaminantes ambientais que sofrem mais regulamentação (SGS GROUP, 2019).

Anaeróbio de Fluxo Ascendente), cuja sigla original é UASB (do inglês *Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*), tecnologia mais difundida para o tratamento de esgoto sanitário em sistemas anaeróbios no Brasil, podendo também ser utilizado para o tratamento de matéria orgânica presente em resíduos urbanos e rurais.

Os biodigestores UASB são capazes de tratar efluentes com baixo tempo de retenção. A alimentação ocorre pelo fundo do biodigestor, atravessa um leito de biomassa ativa e é descartado no topo do biodigestor, após passar por um sistema de placas defletoras que atuam como separadores trifásicos, separando as fases líquida (efluente tratado), sólida (lodo) e gasosa (biogás). A Figura 2 apresenta o esquema geral do biodigestor UASB.

Figura 2 - Esquema geral do biodigestor UASB.



Fonte: Coelho *et al.* (2018).

O processo de tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU, como sobras de frutas, legumes e cultivos, restos de alimentos, sobras de feiras de rua, etc., está relacionado à redução da contaminação ambiental ocasionada pela disposição inadequada desses resíduos nos ecossistemas, à redução das emissões de metano que contribuem para as mudanças climáticas, à redução da demanda por grandes áreas para aterros sanitários e ainda à geração de coprodutos como o biogás (COELHO *et al.*, 2018).

Conforme a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), os RSU devem passar por um processo de triagem dos compostos nele presente, para que haja a separação dos produtos recicláveis, que podem ser comercializados, e também da matéria orgânica, que pode ser

destinada aos biodigestores anaeróbios onde ocorrerá o tratamento adequado e, conseqüentemente, a produção de biogás. Por este motivo esta tecnologia foi considerada neste estudo.

É importante salientar que o material orgânico presente nos RSU também pode sofrer tratamento aeróbio, que é o caso da compostagem. Entretanto, neste caso não há produção de biogás e, conseqüentemente, não há possibilidade de geração de energia. Por isso, este processo não foi considerado neste estudo.

Em relação ao sistema de biodigestão anaeróbia dos dejetos animais, o tipo de biodigestor mais utilizado é o modelo LAFA (Lagoa Anaeróbia de Fluxo Ascendente), também denominado biodigestor rural ou biodigestor modelo canadense. Este tipo de biodigestor possui base quadrangular escavada no solo, revestida com lona impermeável, geralmente de PVC (Policloreto de vinila), a fim de proteger o solo e o lençol freático de qualquer contaminação. É coberto com uma manta, geralmente de PEAD (Polietileno de Alta Densidade) ou PVC, que funciona como gasômetro, conforme apresentado na Figura 3. Maiores detalhes sobre os tipos de lagoas existentes podem ser verificados na publicação da Probiogás (2015) - Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás.

Figura 3 - Biodigestor modelo LAFA.



Fonte: Coelho *et al.* (2018).

Esta tecnologia é adequada a regiões tropicais, pois o clima externo permite manter a temperatura adequada da biodigestão (COELHO *et al.*, 2018). Também por sua simplicidade

tecnológica, tem sido opção preferencial em muitos casos no Brasil, principalmente para o tratamento de dejetos animais e da vinhaça proveniente do setor sucroalcooleiro.

Outra opção para o tratamento anaeróbio dos dejetos animais é o reator de mistura contínua, denominado CSTR (*Continuous Flow Stirred Tank Reactor*), tecnologia padrão para a digestão anaeróbia de substratos mais densos (Sólidos Totais de 15%), com características favoráveis para bombeamento e mistura. Entretanto, este sistema exige manutenção complexa dos equipamentos, além de possuir maiores custos de operação e manutenção se comparados com os da lagoa (PROBIOGÁS, 2015).

O biogás, produto da biodigestão, é uma mistura de gases cuja composição é variável, dependente do substrato e das condições do processo de biodigestão anaeróbia (como temperatura e pH). De forma geral, os compostos presentes em maior quantidade são o metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2) – cerca de 60% e 35%, respectivamente – com pequenas frações de umidade, sulfeto de hidrogênio (H_2S), entre outros compostos. A Tabela 4 apresenta o intervalo de composição do biogás, conforme Coelho *et al.* (2018).

Tabela 4 - Intervalo de composição do biogás.

Compostos	Concentração (Vol. %)
Metano (CH_4)	55 - 70
Dióxido de Carbono (CO_2)	25 - 40
Sulfeto de Hidrogênio (H_2S)	0,5 - 1
Nitrogênio (N_2)	< 0,001
Amonia (NH_3)	< 0,01
Monóxido de Carbono (CO)	< 0,01

Fonte: Coelho *et al.* (2018).

A Tabela 5 apresenta a composição média do biogás de acordo com alguns tipos de substratos analisados no projeto.

Tabela 5 - Composição média do biogás por tipo de substrato.

Substrato	Composição do biogás		
	CH_4 (%)	CO_2 (%)	H_2S (% ou ppm)
Esgoto sanitário ¹	60 - 85	5 - 15	1.000 – 5.000 ppm
RSU em aterro sanitário ²	45 - 60	40 - 60	0 – 1 %
Fração orgânica do RSU ³	55 - 70	30 - 45	200 – 4.000 ppm
Bovino cultura leiteira ⁴	59,6	39,1	329,3 ppm

Substrato	Composição do biogás		
	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	H ₂ S (% ou ppm)
Abate de aves⁴	68,2	29,6	1897,1 ppm
Terminação de suínos⁴	62,0	37,0	2782,3 ppm

Fonte: ¹PROBIOGÁS (2017); ²Fernandes (2009); ³EPE (2008); ⁴Lins *et al.* (2015)

Por sua contribuição ao efeito estufa, é indesejável liberar o metano presente no biogás diretamente para a atmosfera. Portanto, deve-se impedir que a biodigestão ocorra de forma não-controlada, ou tentar capturar o gás resultante desse processo e fazer sua combustão⁷ para que seja emitido dióxido de carbono.

Ao mesmo tempo, o metano é o componente desejado do biogás, pois é o elemento que fornece o poder calorífico, o tornando um combustível. Com a intenção conjunta de evitar a emissão direta de metano para a atmosfera e de maximizar o conteúdo energético produzido, o ideal é que a digestão anaeróbia seja realizada de maneira controlada, com possibilidade de captura do produto gasoso, o biogás.

O processo de biodigestão anaeróbia, além de produzir o biogás, também produz fertilizante concentrado e de alta qualidade que, dependendo do substrato tratado, pode proporcionar melhorias no manejo da terra e no rendimento das culturas, mantendo os solos saudáveis e produtivos, além de diminuir o consumo de fertilizantes químicos.

2.3. INCINERAÇÃO - CICLOS A VAPOR

A incineração é uma técnica de tratamento térmico de resíduos que pode ser entendida como um processo de combustão controlada com o objetivo principal de redução de volume e recuperação de energia do fluxo de resíduos. A incineração é a técnica *Waste to Energy* (WtE) mais popular, na qual o calor produzido pela combustão pode ser recuperado e convertido em energia elétrica. O conteúdo orgânico dos resíduos é queimado e o calor é produzido, enquanto o conteúdo inorgânico contribui para a formação de cinzas. Os produtos finais da incineração incluem cinzas, calor e gases de combustão

⁷ O potencial de aquecimento global para um período de 100 anos (GWP₁₀₀) é 28 para o CH₄ e 1 para o CO₂, em base mássica (MYHRE *et al.*, 2013). Na combustão completa de 1 kg de CH₄, 2,75 kg de CO₂ são produzidos. Portanto, com a combustão do CH₄ em vez de sua liberação direta para a atmosfera, obtém-se uma redução do impacto climático em uma razão de cerca de 10,2:1 – baseado no referencial GWP₁₀₀.

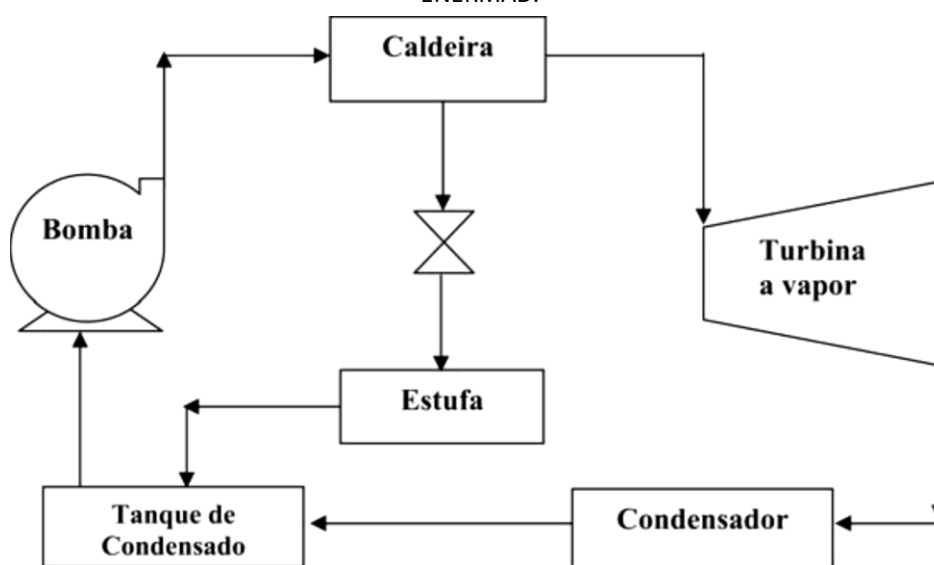
A combustão é um processo de queima direta do combustível e é a tecnologia mais antiga e difundida comercialmente e aplicada em diversos tipos de resíduos lignocelulósicos, tais como a madeira, o bagaço da cana, cascas de arroz, dentre outros resíduos agrícolas (NOGUEIRA; LORA, 2003). A combustão da biomassa se dá pela oxidação total ou parcial do carbono e do hidrogênio, convertendo a energia química destes elementos em energia térmica (BRAND, 2010).

A recuperação energética no processo de incineração se dá em ciclos a vapor, chamados *Rankine*, onde o calor produzido pela queima da biomassa é empregado na geração de vapor, seguido da expansão deste em uma turbina acoplada a um gerador de energia elétrica. O vapor produzido neste ciclo pode ser aplicado, simultaneamente, para obtenção de energia térmica e elétrica a partir de um único combustível caracterizando, assim, o sistema de cogeração (COELHO *et al.*, 2020; WALTER; NOGUEIRA, 2008).

Os sistemas de ciclos a vapor estão disponíveis comercialmente para potências a partir de 200 kW. Estes são considerados de pequeno porte e são uma opção interessante para resíduos em pequena escala, como no caso da biomassa residual de serrarias, contribuindo com a destinação correta e aproveitamento energético destes subprodutos (COELHO *et al.*, 2020).

O projeto pioneiro no Brasil com essa configuração foi desenvolvido pelo antigo Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO/IEE/USP) atual Grupo de Pesquisa em Bioenergia (GBIO/IEE/USP) e foi instalado na região amazônica, na Vila Porto Alegre do Curumu, localizada na Ilha do Marajó, no município de Breves, Pará. O projeto ENERMAD foi elaborado frente a questões sociais e ambientais e visou a geração de energia elétrica em comunidades isoladas, a partir de resíduos florestais (2 t/h de resíduos provenientes da serraria e da fábrica de vassouras), para atender a demanda das atividades produtivas e as residências, além da geração de vapor para agregar valor ao produto da comunidade. (VELÁZQUEZ *et al.*, 2010). A Figura 4 apresenta o fluxograma simplificado do sistema de ciclo a vapor instalado (turbina de 200 kWe, caldeira de 14 bar e condensação atmosférica).

Figura 4 - Fluxograma simplificado de sistema ciclo a vapor com extração na caldeira instalado pelo projeto ENERMAD.



Fonte: Velázquez *et al.* (2010).

Já os sistemas de grande porte são aplicados, majoritariamente, em plantas industriais, em especial no setor sucroalcooleiro e também no de papel e celulose, que utilizam os resíduos de seus processos para o auto suprimento de energia (COELHO *et al.*, 2020).

Para que a implantação do sistema seja técnica e economicamente viável a escolha de um sistema de cogeração é dependente tanto da demanda da energia térmica, quanto da energia elétrica do consumidor (AMARAL, 2019), além disso, cada projeto deverá atender individualmente as particularidades relacionadas a disponibilidade de combustível.

2.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, Daniela Higgin. **Potencial de uso da biomassa florestal na geração de energia térmica e elétrica pela indústria do estado do Rio de Janeiro**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/27845>.

BRAND, Martha Andreia. **Energia de Biomassa Florestal**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2010. ISSN 0100-6762.

CARNEIRO, Priscila Alves. **Análise das tecnologias para gestão e reaproveitamento energético dos resíduos urbanos para reciclagem de plásticos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1781>.

COELHO, Suani Teixeira *et al.* **Atlas de bioenergia do Estado de São Paulo**. São Paulo: [s. n.], 2020.

COELHO, Suani Teixeira (Coord.); GARCILASSO, Vanessa Pecora, FERRAZ JUNIOR, Antônio Djalma Nunes; SANTOS, Marilin Mariano dos; JOPPERT, Caio Luca. **Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano**. São Paulo: IEE-USP, 2018. ISBN: 978-85-86923-53-1.

Disponível em: <http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/?q=pt-br/noticia/e-book-tecnologias-de-produ%C3%A7%C3%A3o-e-uso-de-biog%C3%A1s-e-biometano>.

COELHO, Suani Teixeira; DIAZ-CHAVEZ, Rocio. Best Available Technologies (BAT) for WtE in Developing Countries. *In*: COELHO, Suani Teixeira *et al.* (org.). **Municipal Solid Waste Energy Conversion in Developing Countries**. [S. l.]: Elsevier, 2020. cap 3, p. 63–105. *E-book*.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-813419-1.00003-6>.

DIAS, Mário Sergio Cassoli. **Uso de Pequenos Gaseificadores para Geração de Energia Elétrica e Bombeamento d'água em Localidades Remotas**, 2003. Disponível em <http://luizmeira.com/dados/recicla/gaseificadores.pdf>.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. 2008. **Nota Técnica DEN 06/08 - Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS**. Rio de Janeiro, 2008.

FERNANDES, Juliana Gonçalves. **Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário Experimental**. 2009. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em <https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/516M.PDF>

GASPER, Rebecca; SEARCHINGER, Tim. **The Production and Use of Renewable Natural Gas as a Climate Strategy in the United States**. Working Paper. Washington, DC: World Resources Institute, 2018. Disponível em: <http://www.wri.org/publication/renewable-natural-gas>.

GTC – GASIFICATION TECHNOLOGIES COUNCIL. **Gasification: An Investment in Our Energy Future**, 2011. Disponível em <https://www.globalsyngas.org/>. Acesso em junho de 2022.

INFIESTA, Luciano Reis. **Gaseificação de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Vale do Paranapanema – Projeto CIVAP**. 2015. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

LINS, L. P.; MITO, J. Y. L.; FERNANDES, D. M. Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa. *In*: IV Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais (IV SIGERA), 2015. **Anais [...]** Rio de Janeiro, 2015. Disponível em http://www.sbera.org.br/4sigera/files/4.28_JessicaYukiLimaMito.pdf

MARTINS, Lydimilla Santos. **Geração de Energia Através de Biomassa**. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES: UFES, 2006.

MIRANDA, Luiz Henrique Targa Gonçalves. **Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso no Município de Itanhaém-SP**. 2014. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MYHRE, G. *et al.* (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. *In: Stocker, T. F. et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2013.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; LORA, Electo Eduardo Silva. Processos básicos da conversão dendroenergética. *In: NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; LORA, Electo Eduardo Silva. Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações*. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. cap. 4, p. 49-66. ISBN 85-7193-077-5.

PROBIOGÁS. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás/Probiogás**; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). ISBN 978-85-7958-039-0. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015.

PROBIOGÁS. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto/Probiogás**; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ). 2ª Edição. ISBN 978-85-7958-041-3. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2017.

RUIZ, J. A. *et al.* Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 18, p. 174–183, 2013.

SGS GROUP. **Dioxinas e Furanos**. 2019. Disponível em <https://www.sgsgroup.com.br/pt-br/environment/waste-and-product-safety/laboratory-analysis/specialty-analyses/dioxins-and-furans>.

SITUMORANG, Yohanes Andre *et al.* Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 117, n. October 2019, p. 109486, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109486>.

VELÁZQUEZ, Sílvia Maria Stortini González *et al.* A geração de energia elétrica em comunidades isoladas na Amazônia a partir de biomassa sustentável: Projeto ENERMAD. *In: XIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA - XIII CBE, 2010, Rio de Janeiro, RJ. Anais [...]*. Rio de Janeiro, RJ: [s. n.], 2010. p. 14. Disponível em: http://cenbio.iee.usp.br/download/publicacoes/xiiicbe_enermad.pdf.

VERMA, Shefali. **Biodegradable Organics in Municipal**. 2002. Dissertação (Mestrado em Earth Resources Engineering) – Department of Earth & Environmental Engineering, Columbia University, [s. l.], 2002. Disponível em: <http://gwcouncil.org/wp->

content/uploads/2020/10/Verma_thesis.pdf

WALTER, Arnaldo; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. Sistemas de produção de eletricidade a partir da biomassa. *In*: CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electro Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares (org.). **Biomassa para energia**. 1. ed. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2008. cap. 17, p. 573–605.

3. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS URBANOS (RU)

3.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o panorama geral de aproveitamento energético dos Resíduos Urbanos (RU) dos municípios integrantes dos Sistemas Isolados (SISOL) em território nacional.

Os resíduos urbanos são aqui divididos em duas principais categorias: Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e Esgoto Sanitário. Quanto aos Resíduos Sólidos Urbanos, foram abordadas a conversão da fração não orgânica em eletricidade e a conversão orgânica em biogás, sendo este em energia elétrica.

Sabe-se que grande parte dos resíduos gerados nos municípios abastecidos (ou parcialmente abastecidos) por energia elétrica gerada em sistemas isolados apresentam dificuldades na coleta e destinação adequada dos resíduos. Essas dificuldades são discutidas em maior profundidade no item 8.2 “Barreiras existentes para viabilização dos potenciais”. Apesar disso, este trabalho considera que 100% dos resíduos gerados são coletados e energeticamente aproveitados, visto que se trata de uma estimativa do **potencial teórico** desses municípios⁸.

Este é um problema enfrentado também pelo esgoto sanitário, já que muitos (talvez a maioria) desses municípios não contam com sistemas de coleta e tratamento de esgoto. Assim, da mesma forma que para o RSU, foram calculados os potenciais de geração de biogás proveniente do tratamento de esgoto sanitário e sua conversão em eletricidade considerando que 100% do esgoto é coletado e energeticamente aproveitado.

Já é reconhecido que uma forma de gerenciamento dos resíduos urbanos é o seu aproveitamento energético, que pode contribuir com a geração descentralizada de energia ao passo que promove a utilização de passivos ambientais em ativos energéticos. Visto isso, a seguir são apresentados as metodologias e os principais resultados da estimativa do potencial técnico de geração de eletricidade do RSU e do esgoto sanitário para cada um dos municípios que tem sistema isolado instalado.

⁸Para o cálculo do potencial teórico de aproveitamento energético dos RU foi considerada a população do município como um todo, e não apenas a população do próprio SISOL, devido a indisponibilidade de dados referentes ao número específico de habitantes de cada localidade.

3.2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Segundo a ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (2021), o brasileiro gera em média 1,07 kg de resíduos sólidos por dia. A região Norte, que concentra o maior número de sistemas isolados (98%), é a menor geradora brasileira destes resíduos, representando apenas 7,4% do total gerado no ano de 2020 (aproximadamente 6 milhões de toneladas/ano). Isso significa a geração anual de 328 kg/hab/ano, ou ainda, 0,898 kg/hab/dia.

Porém, a coleta registrada para o mesmo ano soma apenas 4.982.940 toneladas, ou 266,9 kg/hab/ano (0,731 kg/hab/dia); isso significa que apenas 83% dos resíduos sólidos gerados na região Norte possui o serviço de coleta. Ainda, do total coletado, apenas 35,6% são dispostos de forma adequada, de acordo com os princípios da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010). Em sua maioria, o restante (3.209.013 t/ano) ainda é disposto de maneira inadequada, como lixões ou aterros controlados.

A PNRS prevê o aproveitamento energético dos RSU como uma das formas de destinação ambientalmente adequada de resíduos. Além disso, a Política determina que podem ser utilizadas tecnologias de conversão com esta finalidade, desde que comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de gases tóxicos comprovados pelo órgão ambiental (BRASIL, 2010).

Em atendimento à PNRS, existem algumas alternativas de geração de energia a partir dos RSU, tais como o aproveitamento energético do biogás e biometano provenientes do tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU em biodigestores, bem como o aproveitamento do Combustível Derivado de Resíduos (CDR⁹), obtido por meio da separação e trituração da porção não orgânica dos RSU, que é utilizado como combustível no processo da gaseificação – um processo de aproveitamento energético que se mostra adequado para os pequenos e médios municípios (COELHO *et al.*, 2020). Além disso, existe a opção do aproveitamento do biogás e biometano obtidos pela disposição dos RSU em aterros sanitários onde exista a captação do biogás.

O potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente dos RSU depositados em aterro sanitário foi considerado neste estudo; entretanto é importante salientar que os sistemas isolados não possuem infraestrutura adequada para disposição dos

⁹ Neste estudo o CDR é definido como combustível derivado de resíduos sólidos urbanos.

resíduos gerados. Salienta-se ainda que, segundo a Confederação Nacional dos Municípios (CNM), para a viabilização de um aterro sanitário seriam necessários cerca de 100 mil habitantes, o que exclui a maioria dos municípios do SISOL.

Além das opções citadas acima, há ainda a possibilidade de aproveitamento desses resíduos adotando o processo de incineração, que pode ser utilizado no tratamento de resíduos sólidos de origens diversas.

Neste processo ocorre a oxidação térmica dos resíduos, resultando em cinzas, efluentes gasosos e calor. O objetivo e a forma como o processo é conduzido dependem do tipo de resíduo, quantidade e composição. A incineração de resíduos emprega alta temperatura de fornos para queimar correntes de resíduos, que entram em combustão completa. Além disto, o calor proveniente dos gases de exaustão¹⁰ pode ser aproveitado para geração de energia térmica, produzindo vapor por meio de uma caldeira de recuperação, ou para geração de energia elétrica, no qual o vapor produzido é expandido em uma turbina a vapor. Além dos gases, há formação de escória e cinzas, provenientes da queima, que devem ser dispostas em aterros sanitários Classe II ou no caso das escórias, podem ser destinadas para serem usadas na indústria de pavimentação e construção civil (MORGADO; FERREIRA, 2006). Do ponto de vista sanitário, a destruição integral do lixo pela incineração a altas temperaturas é uma das alternativas para o destino final dos resíduos sólidos urbanos. É um método de redução de volume e peso do lixo, através da combustão controlada, porém sempre haverá um resíduo a ser disposto em aterro sanitário, podendo chegar a valores em torno de 20% do peso inicial. Nos últimos anos, o tratamento térmico de resíduos, em particular a incineração, vem sendo tema de grande interesse no país, já que os aterros sanitários estão atingindo sua capacidade máxima de armazenamento ou então ficam distantes, aumentando o custo de transporte e deposição final dos resíduos. Além disto, existe a dificuldade de licenciamento de novos aterros sanitários perante a PNRS.

Neste trabalho, porém, o sistema de incineração dos RSU não foi considerado. No Brasil a incineração é utilizada, majoritariamente, para resolver a questão de disposição final de resíduos perigosos, como os resíduos hospitalares, industriais e químicos. Entretanto, não é possível realizar o aproveitamento energético dos resíduos nestes casos, porém no Estado de

¹⁰ Os gases de exaustão são os gases liberados pela câmara secundária onde ocorre a combustão completa dos resíduos.

São Paulo, está em fase de implantação a URE Barueri¹¹ que irá processar em torno de 300 mil toneladas de resíduos sólidos por ano, valorizando o lixo de aproximadamente 850 mil habitantes, transformando-os em energia suficiente para suprir a demanda de cerca de 320 mil pessoas.

Apesar de apresentar algumas vantagens, como a redução do volume de resíduos destinados a aterros sanitários e a recuperação de energia, a incineração ainda enfrenta grandes barreiras no Brasil. As plantas de incineração de RSU necessitam de sistemas de limpeza sofisticados para os gases gerados na combustão do material, uma vez que a natureza dos resíduos pode gerar substâncias de alta toxicidade, como dioxinas e furanos. Por esse motivo a incineração apresenta grande rejeição da sociedade brasileira. Além disso, é um sistema que possui investimentos iniciais elevados devido a sua alta complexidade tecnológica e, conseqüentemente, o custo de geração também é elevado, o que exigiria consórcios entre municípios para viabilizar o empreendimento.

Soma-se a estes fatores ainda, que os sistemas de incineração existentes são de grande porte, exigindo grandes quantidades de resíduos sólidos urbanos (cerca de 500 t/dia de RSU), o que dificulta sua implementação em municípios de pequeno porte, como o caso dos sistemas analisados deste estudo, principalmente devido as suas características (grandes distâncias entre as localidades e baixa densidade demográfica)¹². Além disso, o transporte do RSU do sistema isolado até o local onde estaria implementado o sistema de incineração, é praticamente impossível, pois além do transporte ser precário poderia exigir, muitas vezes, transporte fluvial do RSU, que também sofre rejeição por parte das prefeituras devido aos maiores riscos de acidentes.

Quanto à tecnologia de gaseificação, como discutido no Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2020), são duas as empresas que possuem sistemas para comercialização no Brasil, sendo elas a WEG S.A. e a Carbogás Energia Ltda., ambas para o tratamento de CDR.

¹¹ <https://urebarueri.com.br>

¹² É importante destacar que para a geração de grandes quantidades de RSU, conforme citado do texto (cerca de 500 t/dia), é necessária uma população superior a 500 mil habitantes. Embora alguns municípios analisados neste estudo como Macapá, Belém e Porto Velho possuam mais de 500 mil habitantes, sabe-se que os sistemas isolados existentes nesses municípios não atingem essa população. Por esses motivos citados, este estudo não contemplou o potencial de aproveitamento energético dos RSU a partir da incineração.

O sistema WEG consiste em um gaseificador de leito fixo, com capacidade de tratamento a partir de 144 toneladas de RSU por dia, e geração de 2 MW. Já a empresa Carbogás desenvolveu um gaseificador de leito fluidizado, que opera um sistema piloto de 1 MWth, gerando 200 kW (elétrico) em um motor ciclo Otto¹³, em sua sede localizada em Mauá/SP. Além dessa, a empresa está instalando uma segunda planta, em Boa Esperança (MG) que tem a capacidade de tratar 56 t/dia de RSU e gerar 1 MW (elétrico), além de mais uma em Extrema (MG).

Enfatiza-se que uma planta de gaseificação necessita uma unidade de preparação do material a ser gaseificado, cuja finalidade é, principalmente, a separação de materiais metálicos e adequação da granulometria à necessidade do processo (trituração).

Enfatiza-se ainda que os exemplos citados acima servem para demonstrar que a tecnologia de gaseificação não se trata apenas de uma tecnologia em escala laboratorial; a tecnologia é comercial e é passível de ser implantada, por exemplo, em sistemas isolados. Esta tecnologia não requer expertise significativa, conforme demonstrado no projeto GASEIFAMAZ¹⁴ (Comparação entre Tecnologias de Gaseificação de Biomassa Existentes no Brasil e no Exterior e Formação de Recursos Humanos na Região Norte) desenvolvido pelo CENBIO (atual GBIO/IEE/USP).

O projeto em questão teve como objetivo a geração de energia elétrica em comunidade isolada na região amazônica a partir da gaseificação de resíduos de madeira e da agricultura local, com o uso de motores de combustão interna, além da formação de recursos humanos na região, pela capacitação de pessoal na operação e manutenção da tecnologia utilizada no projeto, fabricada pelo *Indian Institute of Science* (IISc), o que reforça a questão de não ser uma tecnologia complexa de ser operacionalizada. Além desta, as plantas de gaseificação de RSU em implantação, como a de Boa Esperança em MG, contemplam a capacitação de pessoal.

¹³ De acordo com a empresa Carbogás, para a geração de 200 kWe, estima-se o consumo de 10 a 12 toneladas por dia de RSU.

¹⁴ Maiores detalhes sobre o Projeto GASEIFAMAZ podem ser verificados no site do GBIO/IEE/USP (<http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/?q=node/307>)

3.2.1 METODOLOGIA

O potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pelos resíduos urbanos nos municípios que não pertencem ao sistema interligado nacional (SIN), foi calculado com base na metodologia utilizada para a elaboração do Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2020), modificando premissas e incluindo algumas considerações descritas ao longo do texto.

No cenário descrito no item 3.2.1.1 considera-se que todo o resíduo sólido urbano gerado pelo município é enviado a aterros sanitários. Já os cenários mencionados nos itens 3.2.1.2 e 3.2.1.3 consideram que os RSU passam previamente por uma triagem, onde a fração orgânica é separada da fração não orgânica. A primeira é enviada a sistemas de digestão anaeróbia, enquanto a segunda é encaminhada para os processos de preparação do CDR e gaseificação.

O Quadro 1 apresenta as metodologias utilizadas neste trabalho para identificar o potencial do aproveitamento dos RSU em municípios supridos parcial ou totalmente por sistemas isolados. A seguir são descritas as metodologias de cada item.

Quadro 1 - Metodologias utilizadas para identificar o potencial do aproveitamento dos RSU em municípios supridos parcial ou totalmente por SISOL nos dois cenários considerados.

Cenário 1	Cenário 2
RSU coletado → aterro sanitário → digestão anaeróbia → produção de eletricidade a partir do biogás gerado pelo processo de decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente no RSU.	RSU coletado → triagem separando a porção orgânica da porção não orgânica e porção para reciclagem → A matéria orgânica vai para o processo de biodigestão enquanto a porção não orgânica é destinada para o processo de gaseificação.
O potencial energético do RSU é estimado considerando que todo resíduo gerado é coletado e enviado para disposição em aterro sanitário. O aterro por sua vez conta com sistemas de captura e limpeza do biogás onde é retirado a umidade, particulados e gases de enxofre. O biogás após limpo é direcionado para um sistema motogerador a ciclo Otto onde é gerada a energia elétrica.	O potencial energético do RSU é calculado baseando-se nos requisitos da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), onde a fração orgânica do RSU é separada da fração não orgânica. Este processo denomina-se triagem, que pode ser realizado manualmente, além da implantação de coleta seletiva. A matéria orgânica é enviada para um sistema de tratamento em biodigestores, produzindo biogás, que pode ser aproveitado para a geração de energia elétrica. A porção residual da separação feita na etapa de triagem (fração não orgânica) é então destinada para o tratamento térmico. Para este documento, foi adotado o processo a gaseificação como a tecnologia principal para a conversão do RSU em energia. O processo consiste em

Cenário 1	Cenário 2
	converter previamente o RSU em Combustível Derivado de Resíduos (CDR), adequando os materiais às características físico-química necessárias para o processo de gaseificação. O CDR é então gaseificado, resultando em um gás, chamado de gás de síntese ou <i>syngas</i> , que por sua vez é utilizado para alimentar um sistema motogerador, onde é gerada a energia elétrica.
A metodologia é discutida no item 3.2.1.1	A metodologia é discutida nos itens 3.2.1.2 e 3.2.1.3
Os resultados são apresentados no item 3.2.2.1	Os resultados são apresentados nos itens 3.2.2.2 e 3.2.2.3

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

É importante salientar que o Observatório dos Lixões¹⁵, publicado pela Confederação Nacional de Municípios (CNM, 2023), apresenta o mapa georreferenciado da disposição de RSU no Brasil, onde é possível verificar a existência de aterros sanitários, aterros controlados e lixões existentes no país. Entretanto, em muitos municípios, principalmente os localizados nas regiões Norte e Nordeste, não há informação sobre a destinação do RSU. Além disso, a maioria dos sistemas isolados analisados neste estudo, que possuem informações disponíveis no Observatório dos Lixões, têm como destino de seu RSU os aterros controlados ou os lixões, sistemas inadequados de disposição de RSU onde não há captação de biogás com consequente aproveitamento energético.

A Tabela 6 apresenta a disposição de RSU nos municípios que possuem os sistemas isolados analisados neste estudo.

Tabela 6 - Disposição de RSU nos municípios que possuem sistemas isolados.

UF	Nº municípios	Nº SISOL	Nº de municípios que possuem SISOL por destinação de RSU		
			Aterro sanitário	Lixão ou Aterro controlado	Não informado
Acre	7	7	0	5	2
Amazonas	60	97	3	19	38
Amapá	6	25	0	2	4
Mato Grosso	1	1	0	1	0
Pará	18	21	0	4	14
Pernambuco	1	1	0	0	1
Rondônia	11	22	8	2	1
Roraima	12	77	1	7	4
TOTAL	116	251	12	40	64

¹⁵ Observatório dos Lixões - O mapa georreferenciado da disposição de RSU no Brasil está disponível em <http://lixoes.cnm.org.br/>

Fonte: Elaboração própria com base em dados de CNM (2023).

Observa-se na Tabela 6 que dos 116 municípios analisados, apenas 12 possuem aterro sanitário, 40 possuem lixão ou aterro controlado e 64 não possuem informação sobre a destinação do RSU.

Pelos motivos apresentados acima, para que fosse possível estimar o potencial de geração de energia a partir do biogás proveniente de RSU, optou-se pelos dois cenários mencionados no Quadro 1.

3.2.1.1 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA DISPOSIÇÃO DE RSU EM ATERRO SANITÁRIO

O potencial de geração de energia elétrica está diretamente relacionado com a quantidade de resíduos gerados em cada município. Para obter esse valor, dados como o número de habitantes e a geração média de RSU per capita foram obtidos de bases governamentais. A população total de cada município foi obtida pelo IBGE (2022), ano base 2021. Foi considerada a população total dos municípios (rural + urbana), pois informações desagregadas sobre a população urbana e rural são as do censo 2010, consideradas muito defasadas.

Em relação à geração média de RSU *per capita*, esta foi obtida do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) no relatório “Diagnóstico Temático - Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos”, publicado em 2021, ano de referência 2020 (SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO, 2021a). O valor médio utilizado representa a média *per capita* de RSU coletada em relação à população urbana dos estados, conforme apresentado na Tabela 7.

Tabela 7 - Média per capita coletada de RSU em relação à população urbana dos estados, em 2020.

UF	Geração média
	(kg/hab/dia)
Acre	1,18
Amazonas	1,09
Amapá	0,61
Mato Grosso	0,96
Pará	1,12
Pernambuco	1,14
Rondônia	0,83
Roraima	0,76

Fonte: Adaptado de SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO (2021a).

Outra hipótese adotada foi o percentual de coleta de RSU. Segundo o Sistema Nacional de Informação Sobre Saneamento (SNIS), apenas 80,7% da população domiciliar da Região Norte (que concentra a maior parte dos sistemas isolados) conta com a coleta de RSU (SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO, 2022). Porém, por se tratar da estimativa do potencial total de geração de energia a partir do RSU, considerou-se teoricamente que 100% do total dos resíduos gerados são coletados em cada município estudado¹⁶.

A Equação 1 apresenta o cálculo da quantidade de RSU produzido/coletado em cada município analisado neste estudo.

$$RSU = (n_{hab}^o \times GM_{res} \times \%coleta \times 365) \times 1000^{-1} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

RSU = Total coletado de RSU por município em toneladas por ano (t/ano).

n_{hab}^o = Número total de habitantes residentes no município (hab).

GM_{res} = Geração média per capita de RSU (kg/hab/dia).

$\%coleta$ = Porcentagem coletada de resíduos gerados em cada município (foi considerado um percentual de 100%)

365 = Dias por ano (dia/ano)

1000 = Conversão de kg para tonelada

Para a quantificação da geração de metano (CH_4) a partir de RSU depositados em aterros sanitários, foi adotada a metodologia do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (PIPATTI; VIEIRA, 2006)¹⁷. Essa metodologia também foi utilizada pelo Atlas de Bioenergia do

¹⁶ É importante destacar que o SNIS não apresenta dados desagregados para os sistemas isolados. Neste estudo, para estimar o potencial de geração de energia elétrica a partir dos RSU dos municípios, considerou-se teoricamente o melhor cenário, ou seja, o cenário ideal, que é de 100% de RSU coletado e sendo destinado de forma adequada (aterro sanitário e tratamento da fração orgânica).

¹⁷ Para a estimativa de potencial de geração de energia elétrica a partir de RSU em aterro sanitário, utilizou-se a metodologia do IPCC (2006) - Módulo 5 – Resíduos, do Guia do IPCC, Volume 2: Geração de Resíduos. Esta metodologia sugere algumas premissas, como: carbono orgânico degradável (DOC), fator de correção de metano e fração de DOC degradada

Estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2020), onde a composição gravimétrica do RSU é utilizada para obter o total de carbono orgânico degradável presente nos resíduos. O Carbono Orgânico Degradável (DOC) é, segundo Pipatti; Vieira (2006), o teor de carbono contido nos resíduos biodegradáveis, como restos de comida, papel, resíduos de poda, e outros materiais putrescíveis. Dessa forma, foi utilizada a Equação 2.

$$DOC = \sum (DOC_i \times W_i) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

DOC = Fração de carbono orgânico degradável no RSU (tC/tRSU)

DOC_i = Fração de carbono orgânico degradável no tipo de resíduo i

W_i = Fração do tipo resíduo i por categoria de resíduo

Neste estudo foi considerada a composição gravimétrica média dos RSU coletados no Brasil, de acordo com os dados do Plano Nacional dos Resíduos Sólidos (PLANARES), visto a falta de valores específicos na bibliografia para os municípios aqui estudados (BRASIL, 2022)¹⁸. A composição gravimétrica, e a fração de carbono orgânico degradável obtido em cada tipo de resíduo estão descritas na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição gravimétrica média dos RSU no Brasil e os valores de DOC¹⁹.

Resíduo	Composição (%)	DOC*
	(%)	
Matéria orgânica	45,3	15
Papel, papelão, plástico, metal e vidro	39,2	20
Outros (rejeitos)	15,5	0
Total	100	-

* Média fração de carbono orgânico degradável

Fonte: Brasil (2022) e Pipatti; Vieira (2006).

¹⁸ É importante destacar que não há informações disponíveis sobre a composição gravimétrica específica por região. Na falta dessas informações geralmente utiliza-se dados médios do Brasil. De acordo com o PLANARES (BRASIL, 2022), a gravimetria nacional foi estimada com base na média ponderada a partir da geração total de RSU por faixa de renda dos municípios e respectivas composições, levando-se em consideração a população e geração per capita.

¹⁹ Tendo em vista as características culturais de cada região, a composição de cada município (sistema isolado) pode ser diferente da utilizada neste estudo.

Com os valores de DOC dos RSU gerados em cada município, é possível calcular a geração de metano proveniente dos RSU depositados em aterro sanitário, de acordo com a Equação 3.

$$L_0 = MCF \times DOC \times DOC_f \times F \times (16/12) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

L_0 = Potencial de geração de metano de RSU depositado em aterro sanitário ($\text{Nm}^3\text{CH}_4/\text{tRSU}$)

MCF = Fator de correção de metano (foi considerado igual a 1 para aterro bem gerenciado, de acordo com Pipatti; Vieira (2006))

DOC = Fração de carbono orgânico degradável no RSU (tC/tRSU)

DOC_f = Fração do DOC degradada (t/tRSU) (foi considerado igual a 0,50, de acordo com Pipatti; Vieira (2006))

F = Porcentagem de metano presente no biogás de aterro sanitário (50% de acordo com Melo, 2022)

$(16/12)$ = Conversão de carbono (C) em metano (CH_4)

Assim como no Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2020), este estudo avalia a produção de metano considerando o potencial gerado ao longo de um ano de disposição. O cálculo não considera os resíduos depositados anteriormente.

É importante salientar que os regimes de chuva na região norte são mais intensos, o que pode afetar a geração de biogás no aterro sanitário. O aumento da umidade influencia negativamente a velocidade de degradação da matéria orgânica e, consequentemente, diminui a geração do biogás. Por outro lado, nas estações secas do ano, alguns aterros utilizam a técnica de recirculação do chorume captado, a fim de manter a umidade dos resíduos adequada para a atuação dos microrganismos.

Os aterros sanitários devem atender normas ambientais e operacionais específicas para minimizar os impactos negativos. Após a compactação do resíduo, a cobertura deve ser adequada a fim de impedir a entrada de água proveniente de escoamento superficial, bem como a entrada de oxigênio e a fuga de biogás para a atmosfera. Geralmente essa cobertura é feita com material impermeável, como por exemplo manta geotêxtil. A infiltração de oxigênio também interfere na produção de biogás, pois retardaria o processo de decomposição anaeróbia, fase em que o metano é produzido. Além disso, para evitar o

excesso de água pluvial, são colocadas tubulações ao redor das células do aterro, que permitem interceptar e desviar o escoamento dessas águas até lagoas, para posterior utilização, evitando sua infiltração na massa de lixo.

Salienta-se ainda que devido à falta de informações específicas sobre construção e operacionalização de cada aterro sanitário existente, assumiu-se que o biogás do aterro sanitário contém 50% de metano, conforme apresentado por Melo (2022) em seu estudo sobre o potencial de aproveitamento energético de biogás de aterro sanitário utilizando o LandGEM (*Landfill Gas Generation*), software de domínio público desenvolvido pela USEPA (*United States Environmental Protection Agency*) para estimar emissões de CH₄, CO₂, compostos orgânicos não metanogênicos e poluentes perigosos de aterros sanitários de RSU (MELO, 2022). Com base nessas premissas, foi calculada a quantidade de biogás produzida em cada município (em Nm³/ano)²⁰.

Em função das características do aterro, não é possível a coleta de 100% do biogás gerado no processo de decomposição anaeróbia. Estima-se que 25% do biogás produzido no interior do aterro sanitário seja emitido diretamente para a atmosfera (vazamentos). Este estudo assume, então, que apenas 75% do biogás produzido no aterro será passível de aproveitamento energético (LEME, 2010).

Portanto, o potencial de captação de biogás total por município do sistema isolado nacional (em Nm³/ano) pode ser obtido multiplicando a quantidade total de RSU produzida (RSU) de cada município, pelo potencial de geração de metano a partir do RSU (L_0) e pela capacidade de aproveitamento do biogás produzido no aterro, divididos pela porcentagem de metano presente no biogás de aterro sanitário (F), conforme apresentado na Equação 4. Importante salientar que este estudo considerou que todo o RSU gerado foi encaminhado para aterro sanitário. Assim:

$$Biogás_{captado} = (RSU \times L_0 \times 0,75) \times F^{-1} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

²⁰ Destaca-se que a metodologia e os resultados apresentados neste estudo referem-se às estimativas de potencial técnico de geração de energia elétrica para cada biomassa analisada, e não à estudos de caso específicos. Para maiores detalhes seriam necessárias visitas de campo, que não foram realizadas pela equipe do projeto. Portanto, para o cálculo dos potenciais é necessário adotar diversas premissas, conforme descrito em cada metodologia, uma vez que boa parte das informações necessárias não estão disponíveis ou não existem

$Biogás_{captado}$ = Volume de biogás captado em aterro sanitário, em cada município (Nm^3 biogás captado/ano)

RSU = Quantidade de RSU produzido/coletado (tRSU/ano)

L_0 = Potencial de geração de metano de RSU depositado em aterro sanitário (Nm^3CH_4 /tRSU)

F = Porcentagem de metano presente no biogás de aterro sanitário (50% de acordo com Melo, 2022)

0,75 = Capacidade de captação do biogás de aterro sanitário

Considerando o biogás captado ($Biogás_{captado}$) e a utilização de motores ciclo Otto comercialmente disponíveis no Brasil, é possível avaliar o potencial de geração de energia elétrica através do aproveitamento do biogás proveniente dos RSU produzidos em aterros sanitários. Para isso é necessário o conhecimento do percentual de metano presente no biogás, o poder calorífico inferior (PCI) do metano e a eficiência na conversão energética dos motores de ciclo Otto, conforme Equação 5. Este último parâmetro foi assumido com base em tecnologias e equipamentos comerciais existentes. Assim:

$$EE = \frac{Biogás_{captado} \times Conc_{CH_4} \times PCI_{CH_4} \times Ef_{ele}}{1000} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

EE = Potencial de geração de energia elétrica por ano a partir do biogás gerado em aterros sanitários, em cada município (MWh/ano)

$Biogás_{captado}$ = Volume de biogás captado em aterro sanitário em cada município (Nm^3 biogás captado/ano);

$Conc_{CH_4}$ = Concentração de metano presente no biogás de aterro sanitário (50% de acordo com Melo, 2022)

PCI_{CH_4} = Poder Calorífico Inferior do metano ($kWh_{th}/Nm^3 CH_4$) (neste estudo utilizou-se o fator de $9,97 kWh/m^3 CH_4$, conforme apresentado por Bueno *et al.* (2016))

Ef_{ele} = Eficiência de conversão energética para motor ciclo Otto a biogás (foram utilizados fatores de 0,35 para vazões de biogás de até $5.000 Nm^3$ /dia e de 0,42 para vazões acima $5.000 Nm^3$ /dia, conforme metodologia fornecida pela ABIOGAS (2018))

1000 = Conversão de kWh para MWh

O cálculo da potência disponível a partir do biogás proveniente da disposição de RSU em aterro sanitário foi efetuado pela Equação 6.

$$P = \frac{EE}{(FC \times TO)} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

P = Potencial elétrico anual (MW)

EE = Potencial de geração de energia elétrica por ano a partir do biogás gerado em aterros sanitários, em cada município (MWh/ano)

FC = Fator de capacidade (%) (Considerou-se 85% de fator de capacidade)

TO = Tempo de operação do sistema (h/ano)

3.2.1.2 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA FRAÇÃO ORGÂNICA DO RSU (WtE)

Este cenário considera que todo o RSU (100%) gerado dentro de cada município é encaminhado para uma triagem, onde a porção orgânica é separada da porção não orgânica. A matéria orgânica é enviada então para o tratamento em biodigestores, gerando biogás, que pode ser utilizado para geração de energia elétrica.

Para a estimativa do potencial de geração de energia elétrica a partir da biodigestão anaeróbia da fração orgânica do RSU em biodigestor UASB, primeiramente é necessário contabilizar a geração total de RSU por município. Para isso, foram adotadas as premissas e metodologia descritas acima.

A composição gravimétrica dos resíduos aqui estudados segue também os mesmos percentuais adotados no item anterior e apresentados na Tabela 8. Portanto, é adotado o valor de 45,3% de matéria orgânica para estimar o potencial de produção de biogás em cada município.

O total de matéria orgânica obtido em cada município pode ser calculado pela Equação 7.

$$MO_{RSU} = RSU \times \%MO \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

MO_{RSU} = Quantidade de matéria orgânica presente no RSU (t/ano)

RSU = Quantidade de RSU coletado (t/ano)

$\%MO$ = Porcentagem de matéria orgânica presente no RSU (45,3% conforme Brasil (2022))

Segundo Achinas; Achinas; Euverink (2017) são produzidas 101,5 Nm³ de biogás por tonelada de resíduo, com um percentual de metano de 55%. Essas premissas foram utilizadas para o cálculo do volume de biogás produzido a partir do tratamento anaeróbico da parcela de matéria orgânica contidas no RSU (MO_{RSU}) em biodigestor UASB, conforme Equação 8.

$$V_{biogás} = MO_{RSU} \times F_{MO} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido (Nm³/ano)

MO_{RSU} = Quantidade de matéria orgânica presente no RSU (t/ano)

F_{MO} = Fator de produção de biogás a partir do tratamento anaeróbico da matéria orgânica do RSU (101,5 Nm³ de biogás por tonelada de resíduo, conforme Achinas; Achinas; Euverink (2017))²¹

Para o cálculo do potencial de geração de energia elétrica em motor ciclo Otto a partir do aproveitamento do biogás gerado no tratamento anaeróbico da matéria orgânica de RSU foi utilizada a Equação 9.

$$EE = \frac{V_{biogás} \times Conc_{CH_4} \times PCI_{CH_4} \times Ef_{ele}}{1000} \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

²¹ É importante destacar que não foram encontrados dados nacionais para este fator de produção de biogás a partir do tratamento anaeróbico da fração orgânica de RSU. O fator de 101,5 Nm³ de biogás por tonelada de resíduo utilizado neste estudo refere-se a estudos com RSU na Europa (Achinas; Achinas; Euverink, 2017). De acordo com Soares (2021), a Kompogas, empresa internacional fabricante de biodigestores, sugere, como média, o valor de 120 m³ de biogás por tonelada de material orgânico. Outras referências, como Ayodele et al 2018, apresentam o fator de 80 a 120 m³ de biogás por tonelada de material orgânico. Portanto, optou-se por utilizar o fator apresentado por Achinas; Achinas; Euverink, 2017 por ser mais conservador (praticamente a média dos valores apresentados por Ayodele et al 2018). Para se obter fatores reais/nacionais de produção de biogás por tonelada de matéria orgânica de RSU, seria necessário a realização de análises laboratoriais, além de estudos de caso específicos, o que não fazia parte do escopo desta parte do projeto.

EE = Potencial de geração de energia elétrica por ano a partir do biogás gerado do tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU (MWh/ano)

$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido (Nm^3 biogás /ano);

$Conc_{CH_4}$ = Concentração de metano presente no biogás do tratamento anaeróbio da fração orgânica do RSU (55% conforme Achinas; Achinas; Euverink (2017))

PCI_{CH_4} = Poder Calorífico Inferior do metano ($kWh_{th}/Nm^3 CH_4$) (neste estudo utilizou-se o fator de $9,97 kWh/m^3 CH_4$, conforme apresentado por Bueno *et al.* (2016))

Ef_{ele} = Eficiência de conversão energética para motor ciclo Otto a biogás (foram utilizados fatores de 0,35 para vazões de biogás de até $5.000 Nm^3$ /dia e de 0,42 para vazões acima $5.000 Nm^3$ /dia, conforme metodologia fornecida pela ABIOGAS (2018))

1000 = Conversão de kWh para MWh

O cálculo da potência disponível a partir do biogás proveniente da biodigestão anaeróbia da fração orgânica dos RSU foi efetuado conforme a Equação 6, apresentada no item 3.2.1.1.

3.2.1.3 ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO ELÉTRICA A PARTIR DO TRATAMENTO TÉRMICO DOS RSU (WtE)

Para a estimativa da geração elétrica a partir do tratamento térmico dos RSU, as premissas de números de habitantes por municípios e a geração *per capita* de RSU assumidas no item 3.2.1.1 foram mantidas. Neste ponto, é importante salientar que a porção orgânica do RSU gerado já foi tratado anteriormente (item 3.2.1.2). Portanto, este item refere-se apenas ao aproveitamento energético da fração não orgânica dos RSU.

Nesse sentido, após a separação do material orgânico e não orgânico, foi considerado que 16,8% do RSU corresponde a fração dos recicláveis (como plásticos e derivados, papel e papelão), enquanto a porção orgânica soma 45,3%. Portanto, neste item serão considerados os restantes dos materiais (37,9%) como matéria-prima para processos termoquímicos, utilizando tecnologias *Waste to Energy (WtE)*, em particular o processo de gaseificação²², conforme metodologia utilizada pelo Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO *et al.* 2020).

Como discutido anteriormente, a gaseificação é o processo de combustão incompleta, gerando um gás de baixo poder calorífico (principalmente constituído por H_2 e CO), chamado

²² Conforme discutido anteriormente, neste documento não foi considerado o aproveitamento energético a partir do processo de incineração, devido aos custos e particularidades do estudo.

gás de síntese (ou *syngas*). Este gás de síntese pode ser utilizado na geração de energia elétrica através da utilização de um grupo motogerador (ciclo Otto). Em particular, segundo Coelho *et al.* (2020), gaseificadores de leito fixo são indicados para populações acima de 5 mil habitantes, proporcionando uma potência instalada acima de 75 kW, enquanto os de leito fluidizado são indicados para municípios com população entre 60 mil e 1 milhão de habitantes, proporcionando uma potência instalada entre 1 MW e 10 MW, conforme apresentado na Tabela 9. Não se tem informações de tecnologias para aproveitamento energético de RSU provenientes de municípios com menos de 5 mil habitantes. Entretanto, a planta-piloto de gaseificação da empresa Carbogás em Mauá tem potência elétrica de 200 kW, o que sinaliza que potências desta escala podem ser consideradas.

Tabela 9 - Potência instalada e tecnologia indicada para diferentes faixas populacionais para aproveitamento energético de RSU (*WtE*).

População (habitantes)	Potência instalada por tecnologia
≥ 1.000.000	≥ 10 MW (incineração)
≥ 60.000	≥ 1 MW ≤ 10 MW (gaseificação por leito fluidizado)
≥ 5.000	≥ 75 kW (gaseificação por leito fixo)

Fonte: Coelho *et al.* (2020).

Segundo o Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2020), em sistemas de gaseificação é necessária a transformação do RSU em CDR. Neste processo, o CDR equivale a aproximadamente 60% do total de RSU. Isso se à secagem, separação e trituração (procedimentos necessários para a transformação). Ainda, segundo o Atlas, o *syngas* resultante do processo do CDR com 25% de umidade apresenta um PCI de 3.225 kcal/kg. Assim, a energia de entrada no sistema pode ser obtida pela Equação 10.

$$Ee = V_{res} \times PCI_{res} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

Ee = Energia de entrada (kcal/h)

V_{res} = Volume de RSU (kg/h)

PCI_{res} = Poder Calorífico Inferior do RSU (kcal/kg) (3.225 kcal/kg, conforme Coelho *et al.*, 2020)

Assim como no Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2020), foi considerado uma eficiência de conversão de CDR em *syngas* de 70%, e o PCI do *syngas* de 1.160 kcal/Nm³. Dessa forma, a vazão de *syngas* pode ser obtida pela Equação 11.

$$Q = Ee \times (PCI_{syngas})^{-1} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

Q = Vazão do *syngas* (Nm³/h)

Ee = Energia de entrada (kcal/h)

PCI_{syngas} = Poder Calorífico Inferior do *syngas* (kcal/Nm³) (1.160 kcal/Nm³, conforme Coelho *et al.*, 2020)

O gás de síntese produzido é então enviado ao motogerador ciclo Otto (diesel, preferencialmente *dual-fuel*), com eficiência do motor de 28% e fator de disponibilidade de 95% (COELHO *et al.*, 2020). Assim, a potência elétrica do *syngas* no motogerador pode ser obtido pela Equação 12.

$$P = (Q \times PCI_{syngas} \times \eta \times FD_{motor}) \times F_{conversão}^{-1} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

P = Potência disponível (MW);

Q = Vazão do *syngas* (Nm³/h);

PCI_{syngas} = Poder Calorífico inferior do *syngas* (kcal/Nm³) (1.160 kcal/Nm³, conforme Coelho *et al.*, 2020);

η = Eficiência do motor ciclo diesel (%) (28%, conforme Coelho *et al.*, 2020)

FD_{motor} = Fator de disponibilidade do motor (%) (95%, conforme Coelho *et al.*, 2020)

$F_{conversão}$ = 860.000 (kcal/h para MW)

A estimativa da geração de energia elétrica do RSU através do processo de gaseificação foi obtida pela Equação 13.

$$EE = P \times FC \times TO \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

EE = Energia elétrica disponível (MWh/ano).

P = Potência disponível (MW).

FC = Fator de capacidade (%) (assumiu-se um fator de capacidade de 87%).

TO = Tempo de operação do motor (h/ano)

3.2.2 RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir foram calculados para todos os municípios que contém sistemas isolados a partir de dados compilados em agosto de 2022. Cabe ressaltar que a conexão de um SISOL ao SIN é um processo dinâmico, portanto os resultados necessitam revisão periódica.

3.2.2.1 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA DISPOSIÇÃO DE RSU EM ATERRO SANITÁRIO

A Tabela 10 apresenta os resultados dos potenciais de biogás e energia elétrica pela disposição de RSU em aterros sanitários, considerando 100% de coleta dos resíduos gerados, para os dez principais municípios com maior potencialidade de aproveitamento energético de RSU em aterro sanitário. A Tabela 11 apresenta os potenciais obtidos a partir da disposição de RSU em aterro sanitário de todos os municípios analisados neste estudo, somados por estado.

Tabela 10 - Dez principais municípios com maior potencialidade de aproveitamento energético de RSU de aterro sanitário, considerando 100% de coleta dos resíduos gerados.

UF	Município	População 2021 (hab)	Resíduos Gerados e Coletados (t/ano)	Potencial de Produção de Biogás (Nm ³ biogás/ano)	Potencial de Biogás Captado (Nm ³ biogás/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
Pará	Belém	1.506.420	615.824	83.822.466	62.866.849	131.624	17,68
Rondônia	Porto Velho	548.952	166.305	22.636.475	16.977.356	35.545	4,77
Roraima	Boa Vista	436.591	121.110	16.484.839	12.363.629	25.886	3,48
Amapá	Macapá	522.357	116.303	15.830.462	11.872.846	24.858	3,34
Amazonas	Parintins	116.439	46.325	6.305.526	4.729.144	9.901	1,33
Pará	Itaituba	101.541	41.510	5.650.096	4.237.572	8.872	1,19
Amazonas	Itacoatiara	104.046	41.395	5.634.407	4.225.805	8.848	1,19
Amazonas	Manacapuru	99.613	39.631	5.394.347	4.045.760	8.471	1,14
Acre	Cruzeiro do Sul	89.760	38.660	5.262.125	3.946.594	8.263	1,11
Amazonas	Coari	86.713	34.499	4.695.772	3.521.829	7.374	0,99
TOTAL 10 + MUNICÍPIOS		3.612.432	1.261.562	171.716.514	128.787.386	269.642	36,21
TOTAL SISOL		6.372.708	2.293.926	312.235.995	234.176.996	460.780	62,00

Fonte: Elaboração própria (2022).

Nota: Os resultados apresentados são referentes à totalidade do município onde estão localizados os sistemas isolados. Vale ressaltar que pode ocorrer mais de um SISOL por município. O Anexo I apresenta a lista de localidades em cada município.

Tabela 11 - Potencial de biogás e energia elétrica pela disposição de RSU em aterros sanitários, considerando 100% de coleta dos resíduos gerados.

UF	População 2021 (hab)	Geração per capta (kg/hab/dia)	Resíduos Gerados e Coletados (t/ano)	Potencial de Produção de Biogás (Nm ³ biogás/ano)	Potencial de Biogás Captado (75%) (Nm ³ biogás/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
Acre	216.221	1,18	93.126	12.675.824	9.506.868	18.635	2,50
Amazonas	1.926.279	1,09	766.370	104.313.862	78.235.396	147.981	19,87
Amapá	651.498	0,61	145.056	19.744.187	14.808.140	29.980	4,03
Mato Grosso	41.117	0,96	14.407	1.961.051	1.470.789	2.566	0,34
Pará	2.064.371	1,12	843.915	114.868.806	86.151.605	174.602	23,45
Pernambuco	3.453	1,14	1.437	195.568	146.676	256	0,03
Rondônia	857.182	0,83	259.683	35.346.586	26.509.939	52.177	7,00
Roraima	612.587	0,76	169.932	23.130.110	17.347.583	34.581	4,64
TOTAL SISOL	6.372.708	-	2.293.926	312.235.995	234.176.996	460.780	62,00

*Gerado e coletado, considerando 100%.

Fonte: Elaboração própria (2022).

3.2.2.2 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DA FRAÇÃO ORGÂNICA DO RSU (WtE)

A Tabela 12 apresenta os resultados dos potenciais de biogás e energia elétrica provenientes do tratamento anaeróbio da fração orgânica do RSU resultante do processo de triagem, para os dez principais municípios com maior potencialidade desse tipo de aproveitamento. A Tabela 13 apresenta os potenciais obtidos a partir do tratamento da fração orgânica de RSU de todos os municípios analisados neste estudo, somados por estado.

Tabela 12 - Dez principais municípios com maior potencialidade de aproveitamento energético de RSU pelo processo de biodigestão da fração orgânica.

UF	Município	População 2021 (hab)	Resíduos Gerados e Coletados (t/ano)	Matéria Orgânica do RSU (t/ano)	Potencial de Produção de Biogás (m3 biogás/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
Pará	Belém	1.506.420	615.824	278.968	28.315.302	65.212	8,76
Rondônia	Porto Velho	548.952	166.305	75.336	7.646.621	17.611	2,37
Roraima	Boa Vista	436.591	121.110	54.863	5.568.593	12.825	1,72
Amapá	Macapá	522.357	116.303	52.685	5.347.544	12.316	1,65
Amazonas	Parintins	116.439	46.325	20.985	2.130.012	4.906	0,66
Pará	Itaituba	101.541	41.510	18.804	1.908.607	4.396	0,59
Amazonas	Itacoatiara	104.046	41.395	18.752	1.903.308	4.383	0,59
Amazonas	Manacapuru	99.613	39.631	17.953	1.822.215	3.497	1,47
Acre	Cruzeiro do Sul	89.760	38.660	17.513	1.777.551	3.412	0,46
Amazonas	Coari	86.713	34.499	15.628	1.586.236	3.044	0,41
TOTAL 10+ MUNICÍPIOS		3.612.432	1.261.562	571.488	58.005.989	131.601	17,67
TOTAL SISOL		6.372.708	2.293.926	1.039.149	105.473.593	222.702	29,91

Fonte: Elaboração própria (2022).

Nota: Os resultados apresentados são referentes à totalidade do município onde estão localizados os sistemas isolados. Vale ressaltar que pode ocorrer mais de um SISOL por município. O Anexo I apresenta a lista de localidades em cada município.

Tabela 13 - Potencial de biogás e energia elétrica pela biodigestão da fração orgânica do RSU somando por estado as cidades que possuem sistemas isolados.

UF	População 2021 (hab)	Geração per capta (kg/hab/dia)	Resíduos Gerados e Coletados (t/ano)	Matéria Orgânica do RSU (t/ano)	Potencial de Produção de Biogás (m ³ biogás/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
Acre	216.221	1,18	93.126	42.186	4.281.905	8.218	1,10
Amazonas	1.926.279	1,09	766.370	347.166	35.237.314	69.177	9,30
Amapá	651.498	0,61	145.056	65.710	6.669.604	14.853	2,00
Mato Grosso	41.117	0,96	14.407	6.527	662.445	1.271	0,20
Pará	2.064.371	1,12	843.915	382.293	38.802.784	86.073	11,60
Pernambuco	3.453	1,14	1.437	651	66.063	127	0,02
Rondônia	857.182	0,83	259.683	117.637	11.940.108	25.851	3,47
Roraima	612.587	0,76	169.932	76.979	7.813.372	17.133	2,30
TOTAL	6.372.708	-	2.293.926	1.039.149	105.473.593	222.702	29,91

Fonte: Elaboração própria (2022).

3.2.2.3 POTENCIAL GERAÇÃO ELÉTRICA A PARTIR DO TRATAMENTO TÉRMICO DOS RSU (*WtE*)

Como explicado anteriormente, neste cenário, o RSU passa por uma triagem, onde ocorre a separação da porção orgânica (que será tratada pelo processo de biodigestão) e da porção de plásticos e derivados (destinados a reciclagem). A porção de não orgânicos e não recicláveis restante, passará então pelo processo de gaseificação. Os principais resultados dessa simulação estão descritos na

Tabela 14 e

Tabela 15.

A

Tabela 14 apresenta os dez principais municípios com os maiores potenciais de aproveitamento de RSU por gaseificação. A

Tabela 15 apresenta os principais resultados dos potenciais de geração de eletricidade a partir da gaseificação do RSU de todos os municípios analisados neste estudo, somados por estado.

A

Tabela 16 apresenta os 10 municípios com maior potencial de geração de energia a partir do tratamento da fração orgânica dos RSU + gaseificação de RSU.

Tabela 14 - Dez principais municípios com maior potencialidade de aproveitamento energético de RSU por gaseificação.

UF	Município	População 2021	Geração per capita	RSU	Matéria Orgânica RSU	Reciclagem (16,8%)	RSU para Gaseificação	Potencial de Geração de Energia Elétrica	Potência Elétrica Disponível
				Gerado/Coletado 2021					
				(A)	(B)	(C)	(A)-[(B)+(C)]		
		(hab)	(kg/hab/dia)	(t/ano)	(t/ano)	(t/ano)		(MWh/ano)	(MW)
Pará	Belém	1.506.420	1,12	615.824	278.968	103.459	233.397	202.548	26,60
Rondônia	Porto Velho	548.952	0,83	166.305	75.336	27.939	63.030	54.699	7,20
Roraima	Boa Vista	436.591	0,76	121.110	54.863	20.347	45.901	39.834	5,20
Amapá	Macapá	522.357	0,61	116.303	52.685	19.539	44.079	38.253	5,00
Amazonas	Parintins	116.439	1,09	46.325	20.985	7.783	17.557	15.237	2,00
Pará	Itaituba	101.541	1,12	41.510	18.804	6.974	15.732	13.653	1,80
Amazonas	Itacoatiara	104.046	1,09	41.395	18.752	6.954	15.689	13.615	1,80
Amazonas	Manacapuru	99.613	1,09	39.631	17.953	6.658	15.020	13.035	1,70
Acre	Cruzeiro do Sul	89.760	1,18	38.660	17.513	6.495	14.652	12.715	1,70
Amazonas	Coari	86.713	1,09	34.499	15.628	5.796	13.075	11.347	1,50
TOTAL 10 + MUNICÍPIOS		3.612.432	-	1.261.562	571.488	211.942	478.132	414.935	54,40
TOTAL GERAL		6.372.708	-	2.293.926	1.039.149	385.380	869.398	754.485	99,00

Fonte: Elaboração própria (2022).

Tabela 15 - Potencial de energia elétrica pela gaseificação de RSU considerando, em cada estado, as cidades que possuem sistemas isolados.

UF	População 2021	Geração per capta	RSU Gerado/Coletado 2021	Matéria Orgânica RSU	Reciclagem (16,8%)	RSU para Gaseificação	Potencial de Geração de Energia Elétrica	Potência Elétrica Disponível
			(A)	(B)	(C)	(A)-[(B)+(C)]		
	(hab)	(kg/hab/dia)	(t/ano)	(t/ano)	(t/ano)	(t/ano)		
Acre	216.221	1,18	93.126	42.186	15.645	35.295	30630	4,00
Amazonas	1.926.279	1,09	766.370	347.166	128.750	290.454	252063	33,10
Amapá	651.498	0,61	145.056	65.710	24.369	54.976	47710	6,30
Mato Grosso	41.117	0,96	14.407	6.527	2.420	5.460	4739	0,60
Pará	2.064.371	1,12	843.915	382.293	141.778	319.844	277568	36,40
Pernambuco	3.453	1,14	1.437	651	241	545	473	0,06
Rondônia	857.182	0,83	259.683	117.637	43.627	98.420	85411	11,20
Roraima	612.587	0,76	169.932	76.979	28.549	64.404	55891	7,30
TOTAL	6.372.708	-	2.293.926	1.039.149	385.380	869.398	754.485	99,00

Fonte: Elaboração própria (2022).

Tabela 16 - Dez principais municípios com maior potencial de aproveitamento energético de RSU considerando o tratamento da fração orgânica e a gaseificação do CDR.

UF	Município	Gaseificação		Biodigestão da fração orgânica		Total	
		Potencial de Geração de Energia Elétrica	Potência Elétrica Disponível	Potencial de Geração de Energia Elétrica	Potência Elétrica Disponível	Potencial de Geração de Energia Elétrica*	Potência Elétrica Disponível
		(MWh/ano)	(MW)	(MWh/ano)	(MW)	(MWh/ano)	(MW)
Pará	Belém	202.548	26,6	65.212	8,8	267.760	35,4
Rondônia	Porto Velho	54.699	7,2	17.611	2,4	72.309	9,6
Roraima	Boa Vista	39.834	5,2	12.825	1,7	52.659	6,9
Amapá	Macapá	38.253	5,0	12.316	1,7	50.568	6,7
Amazonas	Parintins	15.237	2,0	4.906	0,7	20.142	2,7
Pará	Itaituba	13.653	1,8	4.396	0,6	18.049	2,4
Amazonas	Itacoatiara	13.615	1,8	4.383	0,6	17.998	2,4
Amazonas	Manacapuru	13.035	1,7	3.497	1,5	16.532	3,2
Acre	Cruzeiro do Sul	12.715	1,7	3.412	0,5	16.127	2,2
Amazonas	Coari	11.347	1,5	3.044	0,4	14.391	1,9
Total 10+		414.935	54,0	131.601	17,7	546.536	71,7
Total SISOL		754.485	99,0	222.702	29,9	977.188	128,9

* Gaseificação + biodigestão.

Fonte: Elaboração própria (2022).

3.3. RESÍDUOS DE TRATAMENTO DE ESGOTO

A coleta e o tratamento de esgoto são pontos essenciais que promovem a saúde pública e a manutenção dos recursos naturais. Segundo a Lei Federal do Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007)²³ o tratamento de esgoto é primordial para reduzir a poluição e contaminação de recursos hídricos.

A região Norte do Brasil, possui apenas 7,3 mil km de rede pública de esgotos, o que representa apenas 2% em relação ao total do país. Em 2020, na região foram coletados 95,9 milhões de metros cúbicos de esgoto, e segundo diagnóstico do SNIS, 82,6 milhões obtiveram tratamento (SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO, 2021b). As redes de esgoto abrangem 13,1% da população total da região Norte, e apenas 17,2% da população urbana, isso significa que apenas 2,3 milhões de habitantes na região possuem acesso ao saneamento básico, conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 - Índice de atendimento urbano com rede de esgoto nos estados que possuem municípios na condição de Sistema Isolado Nacional.

UF	% por estado em 2020
Acre	15,7
Amazonas	16,8
Amapá	7,7
Mato Grosso	43,2
Pará	10,7
Pernambuco	35,7
Rondônia	7,8
Roraima	80,7

Fonte: Adaptado de SNIS - Sistema Nacional de Informação Sobre Saneamento (2021b).

3.3.1 METODOLOGIA

Para os cálculos a seguir adotou-se a metodologia desenvolvida pelo Atlas de Bioenergia do estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2020), adaptada para a região. As modificações e particularidades são descritas no decorrer do texto.

Para os cálculos dos potenciais de geração de biogás e energia elétrica nos municípios analisados neste trabalho, considerou-se teoricamente que 100% do esgoto produzido em

²³ http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/L11445compilado.htm

cada município foi coletado e encaminhado para tratamento por meio da biodigestão anaeróbia²⁴.

Para o cálculo do total de esgoto gerado anualmente pela população, utilizou-se o número de habitantes, de acordo com o IBGE (2022), e a geração per capita média de esgoto no Brasil, conforme norma NBR 7229/93 (ABNT, 1993), tal como representado na Equação 14.

$$EC = N_{hab} \times GM_{esgoto} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

EC = Volume de esgoto coletado/tratado por ano, em cada município (m³/ano)

N_{hab} = Número de habitantes do ano de 2021 informado pelo Instituto Brasileiro de Geografia Estatística (IBGE, 2022)

GM_{esgoto} = Geração per capita média de esgoto no Brasil, fornecido pela NBR 7229/93 (ABNT, 1993), de 160 l/dia (58,4 m³/ano)

Para a quantificação do volume de metano (CH₄) gerado anualmente no processo de biodigestão do esgoto sanitário, foi adotada a metodologia da ABiogás (2018), conforme Equação 15.

$$V_{CH_4} = EC \times DQO_{média} \times P_{CH_4} \times Ef_{rem} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

V_{CH_4} = Volume de metano produzido por ano por município (Nm³/ano)

EC = Volume de esgoto coletado/tratado por ano, em cada município (m³/ano)

$DQO_{média}$ = Demanda química de oxigênio média do esgoto sanitário (gDQO/m³esgoto) (considerou-se 449,7 gDQO/m³ esgoto, de acordo com Silva (2015))

P_{CH_4} = Potencial de geração de metano (Nm³CH₄/kg DQO removida) (considerou-se 0,1115 Nm³CH₄/kg DQO removida, de acordo com SABESP – Companhia de Saneamento Básico de São Paulo (2018))

²⁴ Considerando a dificuldade em obtenção de dados desagregados, para estimar o potencial de geração de energia elétrica a partir do esgoto sanitário, considerou-se teoricamente o melhor cenário, ou seja, o cenário ideal, que é de 100% de esgoto coletado nos municípios e sendo destinado de forma adequada para o tratamento anaeróbio.

Ef_{rem} = Eficiência de remoção de DQO (considerou-se o valor de 0,755, de acordo com SABESP – Companhia de Saneamento Básico de São Paulo (2018))

O total de biogás produzido na biodigestão anaeróbia do esgoto sanitário, considerando o uso de biodigestor UASB, pode então ser obtido pela Equação 16.

$$V_{biogás} = \frac{V_{CH_4}}{\% \text{ metano biogás}} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido por ano por município (Nm^3 biogás/ano)

V_{CH_4} = Volume de metano produzido por ano por município (Nm^3 /ano)

$\% \text{ metano biogás}$ = Porcentagem de metano (CH_4) contido no biogás proveniente do tratamento de esgoto (considerou-se o valor de 0,7 de acordo com SABESP – Companhia de Saneamento Básico de São Paulo (2018))

É possível calcular o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás gerado no tratamento de esgoto em cada município. Considerou-se a utilização do biogás em motores de ciclo Otto para a geração de energia, conforme a Equação 17.

$$EE = \frac{(V_{biogás} \times Conc_{CH_4} \times PCI_{CH_4} \times Ef_{ele})}{1000} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

EE = Potencial geração de energia elétrica por ano a partir do biogás gerado no tratamento de esgoto, em cada município (MWh/ano)

$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido, em cada município (Nm^3 biogás produzido/ano)

$Conc_{CH_4}$ = Concentração de metano presente no biogás da biodigestão anaeróbia do esgoto sanitário (70% conforme SABESP – Companhia de Saneamento Básico de São Paulo (2018))

PCI_{CH_4} = Poder Calorífico Inferior do metano (kWh_{th}/Nm^3CH_4) (neste estudo utilizou-se o fator de 9,97 $kWh/m^3 CH_4$, conforme apresentado por Bueno *et al.* (2016))

$E_{f_{ele}}$ = Eficiência de conversão energética para motor ciclo Otto a biogás (neste estudo utilizou-se os fatores de 0,35 para vazões de biogás de até 5.000 Nm³/dia e de 0,42 para vazões acima 5.000 Nm³/dia, conforme ABIOGAS (2018))

1000 = Conversão de kWh para MWh

O cálculo da potência disponível a partir do biogás proveniente da biodigestão anaeróbia do esgoto sanitário foi efetuado conforme a Equação 6, apresentada no item 3.2.1.1.

3.3.2 RESULTADOS

A seguir são apresentados os principais resultados para o potencial de aproveitamento energético do tratamento de esgoto em sistemas isolados. A

Tabela 18 apresenta os dez principais municípios com os maiores potenciais de aproveitamento energético do biogás proveniente do tratamento de esgoto sanitário, considerando a coleta de 100% do esgoto produzido, encaminhado para a biodigestão anaeróbia. A

Tabela 19 apresenta os principais resultados dos potenciais de biogás e energia elétrica a partir do tratamento de esgoto sanitário de todos os municípios analisados neste estudo, somados por estado.

Tabela 18 - Dez principais municípios com maior potencialidade de aproveitamento energético do biogás proveniente do tratamento anaeróbio do esgoto sanitário.

UF	Município	População 2021 (hab)	Total Esgoto Produzido em (m³/ano)	Potencial de Geração de Metano (CH ₄) (Nm³/ano)	Potencial de Produção de Biogás (Nm³ biogás/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
Pará	Belém	1.506.420	87.974.928	3.330.455	4.757.793	13.946	1,90
Rondônia	Porto Velho	548.952	32.058.797	1.213.646	1.733.780	4.235	0,60
Amapá	Macapá	522.357	30.505.649	1.154.848	1.649.783	4.030	0,50
Roraima	Boa Vista	436.591	25.496.914	965.233	1.378.905	3.368	0,50
Amazonas	Parintins	116.439	6.800.038	257.428	367.754	898	0,10
Amazonas	Itacoatiara	104.046	6.076.286	230.029	328.613	803	0,10
Pará	Itaituba	101.541	5.929.994	224.491	320.701	783	0,10
Amazonas	Manacapuru	99.613	5.817.399	220.229	314.612	768	0,10
Acre	Cruzeiro do Sul	89.760	5.241.984	198.445	283.493	692	0,10
Amazonas	Coari	86.713	5.064.039	191.709	273.870	669	0,10
TOTAL 10 + MUNICÍPIOS		3.612.432	210.966.029	7.986.514	11.409.305	30.913	4,05
TOTAL GERAL		6.372.708	372.166.147	14.089.046	20.127.208	51.488	6,91

Fonte: Elaboração própria (2022).

Nota: Os resultados apresentados são referentes à totalidade do município onde estão localizados os sistemas isolados. Vale ressaltar que pode ocorrer mais de um SISOL por município. O Anexo I apresenta a lista de localidades em cada município.

Tabela 19 - Potencial de geração de biogás e energia elétrica provenientes do tratamento anaeróbio do esgoto sanitário, somando por estado as cidades que possuem sistemas isolados.

UF	População 2021	Esgoto gerado e coletado	Potencial de Geração de Metano (CH ₄)	Potencial de Produção de Biogás	Potencial de Geração de Energia Elétrica	Potência Elétrica Disponível
	(hab)	(m ³ /ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ biogás/ano)	(MWh/ano)	(MW)
Acre	216.221	12.627.306	478.030	682.900	1.668	0,22
Amazonas	1.926.279	112.494.694	4.258.697	6.083.853	14.861	2,00
Amapá	651.498	38.047.483	1.440.359	2.057.655	5.026	0,68
Mato Grosso	41.117	2.401.233	90.903	129.862	317	0,04
Pará	2.064.371	120.559.266	4.563.997	6.519.995	18.250	2,45
Pernambuco	3.453	201.655	7.634	10.906	27	0,00
Rondônia	857.182	80.059.429	1.895.093	2.707.276	6.613	0,89
Roraima	612.587	35.775.081	1.354.333	1.934.761	4.726	0,63
TOTAL	6.372.708	372.166.147	14.089.046	20.127.208	51.488	6,91

Fonte: Elaboração própria (2022).

3.4. CASO ESPECÍFICO DE FERNANDO DE NORONHA

O caso de Fernando de Noronha foi incluído nas estimativas de potencial, apesar de não pertencer à Amazônia Legal, por se tratar de um sistema isolado específico e significativo. Fernando de Noronha é um arquipélago pertencente ao estado de Pernambuco, situado a 545 km da costa pernambucana.

Aproximadamente 90% da energia elétrica consumida na Ilha é produzida por um gerador a diesel. Segundo WWF (2020), no ano de 2018 a ilha consumiu 18.590 MWh. Isso equivale a em média 554 mil litros de diesel por mês, a um custo mensal de 3 milhões de reais ou ainda 2,00 R\$/kWh gerado, o que corresponde ainda a emissão de 1,170 milhão de kgCO₂. Essa usina (UTE Tubarão) possui uma potência outorgada de (4.759 kW)²⁵. O restante do consumo (10%) é gerado por painéis fotovoltaicos²⁶.

A ilha conta com duas usinas solar, a Usina Solar Noronha I, com potência instalada de 400 kWp e a Usina Solar Noronha II, com potência instalada de 550 kWp. A usina solar Noronha I gera aproximadamente 600 MWh/ano, enquanto a Usina Solar Noronha II gera aproximadamente 800 MWh/ano²⁷.

A energia elétrica gerada abastece a população residente e flutuante da localidade. Nesse sentido, a população residente foi estimada em 3.140 habitantes para o ano de 2021 (IBGE, 2022); porém, por se tratar de um local basicamente turístico, existe uma população flutuante, estimada para o mesmo ano em 114.108 pessoas.

No ano de 2021, a Agência Estadual de Meio Ambiente contratou o Instituto Tecnológico de Pernambuco para a elaboração de um estudo para revisar a capacidade máxima de turistas na ilha (capacidade de carga). Este estudo, o mais recente realizado, estabeleceu um limite máximo de capacidade de 89 mil turistas por ano, ou 244 turistas por dia, em média (MARINHO, 2021). Esse número é consideravelmente inferior ao apresentado no último ano, cuja média foi de 313 pessoas por dia²⁸. Isso faz com que a produção de lixo aumente

²⁵ <https://bit.ly/2IGf4Q0>

²⁶ https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/geracao_de_energia_fernando_de_noronha_versao_web_1.pdf

²⁷ <https://www.neoenergia.com/pt-br/sustentabilidade/Paginas/fernando-de-noronha.aspx#:~:text=Localizada%20no%20Comando%20da%20Aeron%C3%A1utica,gera%20aproximadament e%20600%20MWh%2Fano.>

²⁸ https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/plano-de-manejo/Portaria-plano-de-manejo/plano_de_manejo_apa_fernando_de_noronha_rocas_sao_pedro_sao_paulo.pdf

consideravelmente nos períodos de mais fluxo de turistas, o que faz com que medidas de tratamento sejam urgentes e extremamente necessárias.

Segundo o site Ambiente Brasil, no ano de 2019 foram geradas na Ilha cerca de 220 toneladas de lixo por mês, o que varia muito de acordo com a alta ou baixa temporada turística. Ainda segundo o site, a localidade não tem espaço ou infraestrutura adequada para lidar com esses resíduos e, devido a fragilidade ambiental da ilha, não é possível implantar um aterro sanitário.

A ilha conta com uma usina de triagem, que separa o material orgânico, reciclável e não-reciclável. O material orgânico segue para o processo de compostagem, enquanto os materiais recicláveis e não-recicláveis restantes são conduzidos de barco até Recife, onde são destinados a empresas de reciclagem e a aterros sanitários, respectivamente.

Esse método de manejo dos RSU na ilha envolve elevados custos de transporte, mão-de-obra etc. Cerca de 40% da taxa de proteção ambiental paga pelos turistas é destinada ao processo de limpeza urbana e gerenciamento dos resíduos.

Uma usina de gaseificação poderia favorecer e otimizar o manejo desses resíduos, visto que além de fornecer uma alternativa aos resíduos gerados, ainda poderia gerar energia elétrica para abastecimento da própria ilha, porém, o potencial aqui calculado mostrou que o aproveitamento dos RSU poderia produzir 599 MWh/ano, o que corresponde a apenas 3,22% da demanda registrada no ano de 2018 (Tabela 20). O estudo da WWF (2020) apontou que esse potencial seria ainda menor, de 308 MWh/ano, o que seria suficiente para suprir apenas 1,5% do consumo energético previsto para o ano de 2019 (EPE,2021).

Tabela 20 - Potencial de aproveitamento energético dos RSU do município de Fernando de Noronha, Pernambuco.

Energia Elétrica Disponível por ano a partir do biogás na decomposição da fração orgânica (MWh/ano)	Energia Elétrica Disponível por ano a partir do RSU gaseificado (MWh/ano)
127	472

Fonte: Elaborado pelos autores.

Observa-se que seria possível gerar 3,22% da demanda de energia da ilha por meio do tratamento dos RSU (biodigestão anaeróbia da fração orgânica + gaseificação). Em que pese ao baixo percentual em relação à demanda de energia, destaca-se que o aproveitamento do RSU para a geração de energia elétrica local evitaria emissões de CO₂ devido ao transporte

desse resíduo para destinação final em Recife. Somado a isso, também haveria uma redução das emissões de CO₂ referentes ao transporte do diesel utilizado nos grupos motogeradores.

Em que pese o aproveitamento do RSU para geração de energia elétrica ser uma maneira de reduzir o passivo ambiental produzido pelos resíduos e aumentar a oferta de energia, independente da viabilidade econômica, o fato do Arquipélago de Noronha ser uma APA Federal e possuir uma Unidade de Conservação, dificulta muito o processo de licenciamento para implantação de unidades de tratamento de resíduos com geração de energia.

3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOGAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano - PNBB**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/01/PNBB_Versao_Final.pdf.

ABNT. **NBR 7229: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos**. [S. l.: s. n.], 1993.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. [S. l.: s. n.], 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 12 mar. 2022.

ACHINAS, Spyridon; ACHINAS, Vasileios; EUVERINK, Gerrit Jan Willem. A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. **Engineering**, [s. l.], v. 3, n. 3, p. 299–307, 2017.

AMBIENTE BRASIL. **Para onde vai o lixo de Fernando de Noronha**. Disponível em: <https://noticias.ambientebrasil.com.br/clipping/2019/01/24/149942-para-onde-vai-o-lixo-de-fernando-de-noronha.html>. Acesso em 19 de julho de 2022.

AYODELE, T.R.; OGUNJUYIGBE, A.S.O.; ALAO, M.A. (2018). Economic and environmental assessment of electricity generation using biogas from organic fraction of municipal solid waste for the city of Ibadan, Nigeria. *Journal of Cleaner Production*. Volume 203, 1 December 2018, Pages 718–735. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.282>.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. SECRETARIA DE QUALIDADE AMBIENTAL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Planares**. Brasília, DF: MMA, 2022. *E-book*. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/plano_nacional_de_residuos_solidos_vdefeso-1.pdf. Acesso em: 18 maio 2022.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.305**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 2 fev. 2022.

BUENO, Fernanda de Souza *et al.* Avaliação da produção de biogás e do potencial energético dos resíduos orgânicos provenientes do Restaurante Universitário da EACH – USP. *In*: PBL 2016 INTERNATIONAL CONFERENCE, 2016, São Paulo. **Proceedings** [...]. São Paulo: [s. n.], 2016. Disponível em:

https://www.academia.edu/35892669/AVALIAÇÃO_DA_PRODUÇÃO_DE_BIOGÁS_E_DO_POTENCIAL_ENERGÉTICO_DOS_RESÍDUOS_ORGÂNICOS_PROVENIENTES_DO_RESTAURANTE_UNIVERSITÁRIO_DA_EACH_USP.

COELHO, Suani Teixeira *et al.* **Atlas de bioenergia do Estado de São Paulo**. São Paulo: [s. n.], 2020.

CNM - CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS. **Observatório dos Lixões** - Diagnóstico Municipal para a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Mapa georreferenciado da Disposição de RSU. 2023. Disponível em <http://lixoes.cnm.org.br/>.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Sistemas Isolados Fernando de Noronha Identificação das Alternativas de Suprimento - Avaliação de médio e longo prazo**. 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-638/NT-EPE-DEE-DEA-DPG-001-2021_Identifica%C3%A7%C3%A3o%20Potencial%20Noronha.pdf. Acesso em jun. 2022.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da população residente para os municípios e para as unidades da federação**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?edicao=31451&t=resultados>. Acesso em: 14 jul. 2022.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Module 5 – Waste / Chapter 2: Waste Generation, Composition and Management Data, and Chapter 3: Solid Waste Disposal, 2006. Disponível em <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>.

LEME, Marcio Montagnana Vicente. **Avaliação das Opções Tecnológicas para Geração de Energia a Partir dos Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010. Disponível em: <https://repositorio.unifei.edu.br/jspui/handle/123456789/1468>. Acesso em: 19 maio 2022.

MARINHO, A.C.; **Governo encomenda estudo que vai estabelecer limite de visitação a Fernando de Noronha**. Disponível em: <https://g1.globo.com/pe/peernambuco/blog/viver-noronha/post/2021/08/13/fernando-de-noronha-encomenda-estudo-que-vai-estabelecer-limite-de-visitacao-a-ilha.ghtml>. Acesso em 19 de junho de 2022.

MELO, Dayane Oliveira Santos. **Gerenciamento dos resíduos sólidos orgânicos domiciliares de São Carlos-SP**: análise do potencial de aproveitamento energético de biogás oriundo de aterro sanitário e biometanizadores. 2022. Dissertação (Mestrado. Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022. Disponível em <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-19122022-174303/publico/DissertacaoDayaneOliveiraSantosMeloVersaoCorrigida.pdf>

MORGADO, T. C.; FERREIRA, O. M. **Incineração de resíduos sólidos urbanos, aproveitamento na cogeração de energia** - estudo para a região metropolitana de Goiânia. Universidade Católica de Goiás – Departamento de Engenharia – Engenharia Ambiental. Goiânia, 2006.

PIPATTI, Riitta; VIEIRA, Sonia Maria Manso. Waste. *In: EGDELSTON, Simon et al. (org.). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006. *E-book*. Disponível em: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_Volume5/V5_4_Ch4_Bio_Treat.pdf. Acesso em: 23 abr. 2022.

SABESP – COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DE SÃO PAULO. **Estimativas de emissões de metano na Sabesp, 2018**. [S. l.: s. n.], 2018.

SILVA, Thaisa Carolina Ferreira. **Utilização de biogás de estações de tratamento de esgoto para fins energéticos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-20052015-182523/>. Acesso em: 13 maio 2022.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico Temático Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos**. Brasília, DF: [s. n.], 2021. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_RS_SNIS_2021.pdf.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto - Visão Geral Ano de Referência 2020**. Brasília, DF: [s. n.], 2021. Disponível em: www.snis.gov.br.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÃO SOBRE SANEAMENTO. **Painel de informações sobre saneamento**. [S. l.], 2022. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/>. Acesso em: 12 mar. 2022.

SOARES, F. R. (2021). Produção de biogás a partir do aproveitamento energético dos resíduos orgânicos. Artigos de Opinião - Energia e Biogás. Disponível em <https://energiaebiogas.com.br/aproveitamento-energetico-dos-residuos-organicos>.

WWF BRASIL. **Geração de energia em Fernando de Noronha: Alternativas para a diminuição de emissões de CO₂ no transporte e eletricidade Brasil**. 2021. Disponível em: https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/geracao_de_energia_fernando_de_noronha_versao_web_1.pdf. Acesso em jul. 2022.

4. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS (Rag)

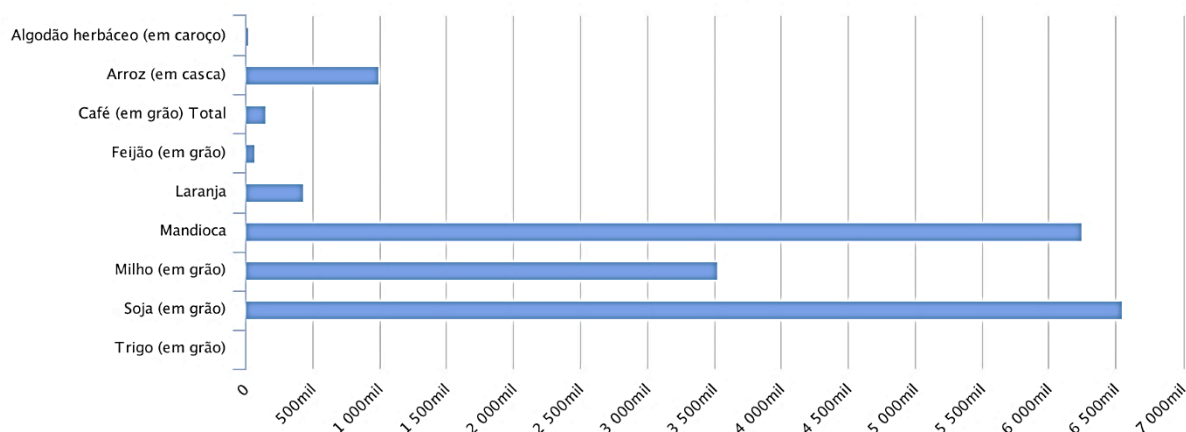
Este capítulo apresenta o panorama geral de aproveitamento energético dos resíduos agrícolas dos municípios integrantes dos Sistemas Isolados (SISOL) em território nacional.

O Gráfico 3 apresenta as principais culturas agrícolas da Região Norte, de acordo com o IBGE (2022). Dessa figura percebe-se que as culturas de mandioca, soja e milho são as mais significativas e, portanto, aquelas que podem gerar maiores quantidades de resíduos para o aproveitamento energético.

Destaca-se, segundo o IBGE (2020), que a soja tem apresentado um crescimento significativo, passando de uma área plantada de 500 mil ha em 2009 para 2,07 milhões de ha em 2020 na região.

Entretanto, neste estudo, as culturas foram ampliadas para incluir aquelas específicas regionalmente, como detalhado adiante.

Gráfico 3 - Quantidade produzida das principais culturas agrícolas (em toneladas) na Região Norte no ano de 2020.



Fonte: IBGE (2022).

Para o desenvolvimento deste trabalho selecionou-se os principais resíduos agrícolas disponíveis nos municípios integrantes do SISOL, conforme apresentado a seguir.

É importante ressaltar que a maioria dos resíduos agrícolas analisados neste estudo são provenientes de plantações para subsistência local nos sistemas isolados. Sendo assim, apesar de apresentarem baixas quantidades, esses resíduos provenientes da colheita e/ou beneficiamento das culturas agrícolas podem ser aproveitados para a geração de energia.

Ressalta-se ainda que para o cálculo do potencial de oferta de energia elétrica dos resíduos agrícolas analisados neste estudo, considerou-se o sistema convencional de turbina

a vapor Ciclo *Rankine*. Neste caso não foi considerado o processo de biodigestão anaeróbia destes resíduos, pois existem resíduos com características físico-químicas que dificultam o seu aproveitamento pelo processo de biodigestão (materiais fibrosos e gorduras). Além disso, para um melhor desempenho do processo de biodigestão anaeróbia, haveria necessidade de misturar os resíduos agrícolas com outros tipos de resíduos, como os provenientes de criação animal, por exemplo. Neste caso, seria necessário também determinar o percentual de mistura de cada tipo de resíduo, para cada cultura. Devido a particularidade desses resíduos, optou-se por determinar o potencial energético apenas pelo processo de combustão (ciclo *Rankine*). É importante notar que a disponibilidade da tecnologia de pequeno porte é a partir de 200 kWe, que correspondem às menores turbinas a vapor comercializadas no país pela empresa WEG.

O item a seguir apresenta a metodologia utilizada para a determinação do potencial de geração de energia proveniente da utilização dos resíduos agrícolas analisados neste estudo.

4.1. METODOLOGIA

Para o cálculo do potencial energético disponível a partir de resíduos agrícolas nos municípios que são abastecidos dentro do contexto dos Sistemas Isolados (SISOL), foram levantados dados como a área plantada, tipo de cultura e rendimentos do processamento industrial de cada cultura, disponibilizados pela Instituto Brasileiro de Geografia Estatística, na base de dados da Produção Agrícola Municipal (PAM), ano base 2020 (IBGE, 2022).

As lavouras são divididas em permanentes e temporárias e, dentro destas, foram consideradas as principais culturas (em toneladas) de cada município fornecidas pelo IBGE. Assim, após selecionadas as principais culturas, identificou-se potencial de aproveitamento a partir das lavouras de abacaxi, açaí, arroz em casca, batata-doce, cana-de-açúcar, feijão (em grão), malva (fibra), mandioca, melancia, milho (em grão), soja (em grão), açaí, banana (cachos), café (em grão), coco-da-baía, laranja, limão, mamão e maracujá.

Dessas culturas analisadas, as de batata-doce, abacaxi, malva, maracujá, melancia e mamão foram excluídas das considerações, visto suas particularidades, já que alguns dos resíduos de colheitas são deixados exclusivamente no campo para ciclagem de nutrientes, outras são destinadas à alimentação animal. Portanto, de todas as culturas representativas, foram selecionadas para o cálculo do potencial de aproveitamento energético dos resíduos provenientes da colheita e/ou beneficiamento das seguintes culturas: laranja, limão, milho, café, feijão, soja, açaí, arroz, mandioca, banana, cana-de-açúcar e coco-da-baía.

Sabe-se que o potencial depende, entre outros fatores, da disponibilidade do material e da sazonalidade das culturas, porém, essa consideração não foi analisada neste estudo, por se tratar do cálculo do potencial técnico das culturas agrícolas nos municípios dos sistemas isolados. Além disso, também não foram considerados outros possíveis usos desses resíduos.

O potencial também irá depender da eficiência de conversão termoelétrica. Para este estudo, foram consideradas as mesmas premissas utilizadas pelo Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2020), no qual foi considerada uma eficiência de conversão termoelétrica (η) de 15% para capacidade instalada de pequeno porte (entre 200 kW e 2MW) e, para potências acima de 2MW, foi considerado o rendimento termelétrico (η) de 30%. Além disso, assume-se o Fator de Capacidade (FC) de 80%, em ambos os cenários, o que resulta em um tempo total de operação anual de 7.008 horas. Esses dados são utilizados para identificar o potencial de oferta de energia elétrica de cada cultura agrícola, considerando o sistema convencional de turbina a vapor ciclo *Rankine*²⁹.

Para o cálculo da potência disponível a partir do aproveitamento de cada cultura foi utilizada a Equação 18

$$P = \frac{EE}{(FC \times TO)} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

P = Potência disponível (MW)

EE = Potencial de geração de energia elétrica por ano a partir de cada resíduo agrícola, em cada município (MWh/ano)

FC = Fator de capacidade (%) (Considerou-se 80% de fator de capacidade)

TO = Horas de operação do sistema (h/ano) (8.760 h/ano, considerando 100% do tempo de operação do sistema).

Para o caso específico de Fernando de Noronha, não foi considerado o aproveitamento de resíduos agrícolas pois, de acordo com os dados disponibilizados pelo IBGE, não existem culturas agrícolas no arquipélago.

²⁹ O Fator de Capacidade (FC) utilizado reflete o tempo de parada dos equipamentos para manutenção de acordo com as tecnologias adotadas. Este valor está de acordo com a metodologia adotada em Coelho *et al.* (2021). Apesar dos cálculos serem realizados de forma individual, a proposta é que a usina opere ao longo do ano.

Os fatores de geração de resíduos para cada cultura e a metodologia correspondente para identificação do potencial para a geração de energia elétrica podem ser verificados nos itens a seguir.

4.1.1 RESÍDUOS DA PODA DE LARANJA E LIMÃO (GALHOS)

Neste item considerou-se os mesmos fatores para as culturas de limão e laranja. Considera-se que para cada hectare plantado, cerca de 3,5 toneladas de galhos podem estar disponíveis anualmente (FERRER *et al.*, 2006; VELÁZQUEZ-MARTÍ *et al.*, 2013). Para o presente estudo foi considerado o aproveitamento integral do resíduo (100%) e poder calorífico inferior (PCI) dos galhos de 3.100 kcal/kg (3,61 MWh_{th}/t de biomassa) (EPE, 2018).

O potencial de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento da poda da cultura de laranja e/ou limão pode ser obtido pela Equação 19.

$$EE = ha_{laranja/limão} \times t_{res} \times PCI_{res} \times \eta \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

EE = Energia elétrica disponível (MWh)

$ha_{laranja/limão}$ = Hectares de laranja/limão plantados (ha)

t_{res} = Tonelada de poda gerada (t/ha) (3,5 t/ha, conforme Ferrer *et al.*, 2006; Velázquez-Martí *et al.*, 2013)

PCI_{res} = Poder calorífico inferior da poda (galhos) (MWh_{th}/t de resíduo) (3,61 MWh_{th}/t de resíduo, conforme EPE, 2018)

η = Eficiência de conversão termoelétrica do sistema (%)

4.1.2 RESÍDUOS DA COLHEITA E BENEFICIAMENTO DO MILHO (PALHA, FOLHA, COLMO E SABUGO)

Os valores para a colheita e beneficiamento do milho foram baseados nos mesmo utilizados pelo Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2020). Os resíduos da colheita do milho incluem basicamente a palha, a folha e o colmo. Esses resíduos somam aproximadamente 78% do peso do grão (BOSE; FILHO, 1984; CARVALHO, 1992).

Ainda, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014) é recomendado que 60% do total de resíduos gerados na colheita, sejam deixados no campo, para manutenção do solo. Ainda, o poder calorífico inferior (PCI) da palha, colmo e folha foi considerado de 3.808

kcal/kg, o que equivale a 4,42 MWh_{th} por tonelada de biomassa (PAULA *et al.*, 2011). Dessa forma, o potencial de geração de energia elétrica a partir da palha, folha e colmo foi obtida pela Equação 20.

$$EE = t_{\text{milho em grão}} \times \%_{\text{res}} \times \%_{\text{disp}} \times PCI_{\text{res}} \times \eta \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

EE = Energia elétrica disponível (MWh)

$t_{\text{milho em grão}}$ = Toneladas de milho em grão (t)

$\%_{\text{res}}$ = Porcentagem de palha, colmo e folha aproveitada (%) (78% do peso do grão, conforme Bose; Filho, 1984; Carvalho, 1992)

$\%_{\text{disp}}$ = Disponibilidade de aproveitamento dos resíduos (%) (aproveitamento de 40%, já que 60% dos resíduos são deixados no campo, conforme EPE, 2014)

PCI_{res} = Poder calorífico inferior (MWh_{th}/t de resíduo) (4,42 MWh_{th} /t de resíduo, conforme de Ramos e Paula *et al.*, 2011)

η = Eficiência de conversão elétrica do sistema (%)

A potência disponível a partir dos resíduos da colheita do milho (palha, colmo e folha) foi calculada pela Equação 18, apresentada no item 4.1 deste relatório.

Além dos resíduos da colheita, também temos os resíduos do beneficiamento do milho, sendo o principal resíduo o sabugo que representa 22% do peso do grão (BOSE; FILHO, 1984; CARVALHO, 1992). Ao contrário dos resíduos da colheita, os resíduos do beneficiamento podem ser 100% aproveitados. O PCI do sabugo é de 3.988 kcal/kg (4,63 MWh_{th}/t de biomassa) (SILVA; CARDOSO SOBRINHO; SAIKI, 2004).

A Equação 21 apresenta o cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir a partir do sabugo de milho.

$$EE = t_{\text{milho em grão}} \times \%_{\text{res}} \times PCI_{\text{res}} \times \eta \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

EE = Energia elétrica disponível (MWh)

$t_{\text{milho em grão}}$ = Toneladas de milho em grão (t)

$\%_{res}$ = Porcentagem de sabugo aproveitado (%) (22% do peso do grão, conforme Bose; Filho, 1984; Carvalho, 1992)

PCI_{res} = Poder calorífico inferior do sabugo (MWh_{th}/t de resíduo) (4,63 MWh_{th}/t de sabugo, conforme Silva; Cardoso Sobrinho; Saiki, 2004)

η = Eficiência de conversão elétrica do sistema (%)

A potência disponível a partir dos resíduos do beneficiamento do milho (sabugo) foi calculada pela Equação 18, apresentada no item 4.1 deste relatório.

4.1.3 RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DO CAFÉ (CASCA)

Segundo Coelho *et al.* (2020) a casca do café apresenta pouco emprego na alimentação animal e, desta forma, foi considerado que a totalidade da casca gerada seria utilizada para o aproveitamento energético. Durante o beneficiamento³⁰, a casca representa 50% do peso do grão de café (BÁRTHOLO *et al.*, 1989; CARVALHO, 1992), com PCI de 3.100 kcal/kg (3,61 MWh_{th}/t de casca) (CAIELLE, 1984). Assim, o potencial de geração de energia elétrica a partir da utilização da casca do café pode ser calculado pela Equação 22.

$$EE = t_{café\ em\ grão} \times \%_{res} \times PCI_{res} \times \eta \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

EE = Energia elétrica disponível (MWh)

$t_{café\ em\ grão}$ = Toneladas de café em grão (t)

$\%_{res}$ = Porcentagem de casca aproveitada (%) (50% do peso do grão, conforme Bártholo *et al.*, 1989; Carvalho, 1992)

PCI_{res} = Poder calorífico inferior da casca (MWh_{th}/t de casca) (3,61 MWh_{th}/t de casca de café, conforme Caielle, 1984)

η = Eficiência de conversão elétrica do sistema (%)

A potência disponível a partir dos resíduos do beneficiamento do café foi calculada pela Equação 18, apresentada no item 4.1 deste relatório.

³⁰ Considerando-se que o beneficiamento ocorre no mesmo município.

4.1.4 RESÍDUOS DA COLHEITA DO FEIJÃO (PALHA)

Adotou-se os mesmos parâmetros utilizados para o desenvolvimento do Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2020). Segundo Carvalho (1992) e Silva (1981) é recomendado que 60% da palha produzida no momento da colheita do feijão seja deixada no campo, portanto considera-se o potencial de aproveitamento de 40%. Além disso a palha representa 53% do peso do grão. O PCI da palha é de 3.343 kcal/kg (3,88 MWh_{th}/t de palha) (EPE, 2014).

O potencial de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento da palha do feijão pode ser obtido pela Equação 23.

$$EE = t_{\text{feijão em grão}} \times \%_{\text{res}} \times \%_{\text{disp}} \times PCI_{\text{res}} \times \eta \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

EE = Energia elétrica disponível (MWh)

$t_{\text{feijão em grão}}$ = Toneladas de feijão em grão (t)

$\%_{\text{res}}$ = Porcentagem de palha aproveitada (%) (53% do peso do grão, conforme Carvalho, 1992 e Silva, 198)

$\%_{\text{disp}}$ = Disponibilidade de aproveitamento dos resíduos (%) (aproveitamento de 40%, já que 60% dos resíduos são deixados no campo, conforme Carvalho, 1992 e Silva, 198)

PCI_{res} = Poder calorífico inferior da palha (MWh_{th}/t de resíduo) (3,88 MWh_{th}/t de palha, conforme EPE, 2014)

η = Eficiência de conversão elétrica do sistema (%)

A potência disponível a partir dos resíduos da colheita do feijão (palha) foi calculada pela Equação 18, apresentada no item 4.1 deste relatório.

4.1.5 RESÍDUOS DA COLHEITA DA SOJA (PALHA)

Segundo Coelho *et al.* (2020) recomenda-se deixar 70% da palha no campo, portanto este trabalho assume que 30% da palha gerada pode ser utilizada para aproveitamento energético. Segundo Bose; Filho (1984) e Carvalho (1992), o peso da palha da soja corresponde a 120% do peso do grão. O PCI da palha é de 3.487 kcal/kg (4,05 MWh_{th}/t de palha) (EPE, 2014).

O potencial de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento da palha da soja pode ser obtido pela Equação 24.

$$EE = t_{soja\ em\ gr\tilde{a}o} \times \%_{res} \times \%_{disp} \times PCI_{res} \times \eta \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

EE = Energia elétrica disponível (MWh)

$t_{soja\ em\ gr\tilde{a}o}$ = Toneladas de soja em grão (t)

$\%_{res}$ = Porcentagem de palha aproveitada (%) (120% do peso do grão, conforme Bose; Filho, 1984 e Carvalho, 1992)

$\%_{disp}$ = Disponibilidade de aproveitamento dos resíduos (%) (aproveitamento de 30%, já que 70% dos resíduos são deixados no campo, conforme Coelho *et al.*, 2020)

PCI_{res} = Poder calorífico inferior da palha (MWh_{th}/t de resíduo) (4,05 MWh_{th}/t de palha, conforme EPE, 2014)

η = Eficiência de conversão elétrica do sistema (%)

A potência disponível a partir dos resíduos da colheita de soja (palha) foi calculada pela Equação 18, apresentada no item 4.1 deste relatório.

4.1.6 RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DO AÇAÍ (SEMENTE)

De acordo com Alves; Vasconcelos (2021), os resíduos da colheita do açaí (cacho) podem ser deixados dentro da área de produção, onde serão reincorporados ao solo. Portanto, 100% dos resíduos da colheita do açaí são deixados no campo e não foram considerados neste estudo. Desta forma, considerou-se apenas os resíduos do beneficiamento do açaí (semente), adotando a hipótese de que o processo ocorre no mesmo município. Segundo Carvalho; Müller (2005), o fruto do açaí é composto por 73,6% semente e 26,4% polpa (em peso). O poder calorífico da semente do açaí é de 17.896,42 kJ/kg (4,97 MWh_{th}/t de semente) (PASSINHO *et al.*, 2019). Considerou-se que a totalidade das sementes pode ser aproveitada para fins energéticos.

O potencial de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento das sementes de açaí pode ser obtido pela Equação 25.

$$EE = t_{semente\ açaí} \times \%_{res} \times PCI_{res} \times \eta$$

Equação 25

Onde:

EE = Energia elétrica disponível (MWh)

$t_{semente\ açaí}$ = Toneladas de sementes de açaí (t)

$\%_{res}$ = Porcentagem de semente aproveitada (%) (73,6% do peso do fruto, conforme Carvalho; Müller, 2005)

PCI_{res} = Poder calorífico inferior da semente (MWh_{th}/t de semente) (4,97 MWh_{th}/t de semente, conforme Passinho *et al.*, 2019)

η = Eficiência de conversão elétrica do sistema (%)

A potência disponível a partir dos resíduos do beneficiamento do açaí (semente) foi calculada pela Equação 18, apresentada no item 4.1 deste relatório.

4.1.7 RESÍDUOS DA COLHEITA E BENEFICIAMENTO DE ARROZ (PALHA E CASCA)

O resíduo gerado na colheita de arroz é a palha. Considerou-se a geração de 1,24 toneladas de palha por tonelada de arroz colhido (base seca) (EPE, 2014). Segundo Koopmans e Koppejan (1997) apud (EPE, 2014) o PCI da palha de arroz é de 16,0 MJ/kg (4,44 MWh_{th}/t de palha). Recomenda-se deixar cerca de 60% da palha no campo (EPE, 2014), ou seja, considera-se neste estudo o aproveitamento de 40% da palha gerada.

O potencial de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento da palha do arroz pode ser obtido pela Equação 26.

$$EE = t_{arroz} \times t_{palha/t\ arroz} \times \%_{disp} \times PCI_{res} \times \eta$$

Equação 26

Onde:

EE = Energia elétrica disponível (MWh)

t_{arroz} = Tonelada de arroz (t)

$t_{palha/t\ arroz}$ = tonelada de palha por tonelada de arroz (1,24 conforme EPE, 2014)

$\%_{disp}$ = Disponibilidade de aproveitamento dos resíduos (%) (aproveitamento de 40%, já que 60% dos resíduos são deixados no campo, conforme EPE, 2014)

PCI_{res} = Poder calorífico inferior da palha (MWh_{th}/t de resíduo) (4,44 MWh_{th}/t de palha, conforme EPE, 2014)

η = Eficiência de conversão elétrica do sistema (%)

A potência disponível a partir dos resíduos da colheita de arroz (palha) foi calculada pela Equação 18, apresentada no item 4.1 deste relatório.

No processo de beneficiamento do arroz, obtém-se a casca como resíduo, considerando que o processo ocorre no mesmo município. Segundo Nogueira; Lora (2014) são produzidas cerca de 0,18 tonelada de casca para cada tonelada de arroz, com um poder calorífico inferior (PCI) de 16,0 MJ/kg de casca (4,44 MWh_{th}/t de casca).

Neste estudo, será usado o mesmo fator de disponibilidade adotado na Nota Técnica DEA 15/14 Inventário Energético de Resíduos Rurais (EPE, 2014) de 50% da casca, considerando que a outra metade já é utilizada para fins térmicos na planta de beneficiamento de arroz. Dessa forma, o potencial de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento da casca do arroz pode ser obtido pela Equação 27.

$$EE = t_{arroz} \times t_{casca/t\ arroz} \times \%_{disp} \times PCI_{res} \times \eta \quad \text{Equação 27}$$

Onde:

EE = Energia elétrica disponível (MWh)

t_{arroz} = Tonelada de arroz (t)

$t_{casca/t\ arroz}$ = Tonelada de casca por tonelada de arroz (0,18 conforme Nogueira; Lora, 2014)

$\%_{disp}$ = Disponibilidade de aproveitamento dos resíduos (%) (aproveitamento de 50%, já que 50% da casca possui aproveitamento para fins térmicos, conforme EPE, 2014)

PCI_{res} = Poder calorífico inferior da casca (MWh_{th}/t de resíduo) (4,44 MWh_{th}/t de palha, conforme EPE, 2014)

η = Eficiência de conversão elétrica do sistema (%)

A potência disponível a partir dos resíduos do beneficiamento do arroz (casca) foi calculada pela Equação 18, apresentada no item 4.1 deste relatório.

4.1.8 RESÍDUOS DA COLHEITA DA MANDIOCA (PARTE AÉREA DA PLANTA)

No caso da mandioca, são aproveitadas as raízes da planta para consumo, enquanto os resíduos provenientes da colheita referem-se à parte aérea da planta, que pode ser utilizada para fins energéticos.

Segundo EPE (2014) é estimado que a produção seja de 0,65 toneladas de biomassa na base seca (da parte aérea) por tonelada de mandioca produzida. Foi considerado um percentual de aproveitamento dos resíduos de 40%, já que é recomendado deixar no campo cerca de 60% dos resíduos para reciclagem de nutrientes e proteção do solo. O poder calorífico considerado foi de 16,0 MJ/kg (4,72 MWh_{th}/t) (EPE, 2014).

O potencial de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento da parte aérea da cultura da mandioca pode ser obtido pela Equação 28.

$$EE = t_{mandioca} \times t_{resíduo/t\ mandioca} \times \%_{disp} \times PCI_{res} \times \eta \quad \text{Equação 28}$$

Onde:

EE = Energia elétrica disponível (MWh)

$t_{mandioca}$ = Toneladas de mandioca colhida (t)

$t_{resíduo/t\ mandioca}$ = Tonelada de resíduo por tonelada de mandioca (0,65 toneladas de biomassa na base seca (da parte aérea) por tonelada de mandioca produzida)

$\%_{disp}$ = Disponibilidade de aproveitamento dos resíduos (%) (aproveitamento de 40%, já que 60% dos resíduos são deixados no campo, conforme EPE, 2014)

PCI_{res} = Poder calorífico inferior do resíduo (MWh_{th}/t) (4,72 MWh_{th}/t de resíduo, conforme Feltran *et al.*, 2016)

η = Eficiência de conversão elétrica do sistema (%)

A potência disponível a partir dos resíduos da colheita da mandioca foi calculada pela Equação 18, apresentada no item 4.1.14.1 deste relatório.

4.1.9 RESÍDUOS DA COLHEITA DA BANANA (FOLHAS E PSEUDOCAULE)

Na colheita da banana, os frutos são colhidos, enquanto o pseudocaule, folhas e o próprio fruto que não possui a qualidade desejada pelos agricultores são descartados. Esses resíduos geralmente são deixados no próprio campo, para manter a umidade e devolver nutrientes ao solo. Entre as possibilidades de aproveitamento desses resíduos está a produção de ração animal e a produção de briquetes (MAIA, 2013).

De acordo com informação contida no trabalho de Fernandes *et al.* (2011) para cada tonelada de banana colhida, são geradas, aproximadamente, quatro toneladas de resíduos

lignocelulósicos (sendo 3 toneladas de pseudocaule, 160 kg de engaço, 480 kg de folhas e 400 kg de cascas).

Nesse tipo de resíduo, é importante lembrar que é essencial que haja uma secagem prévia a fim de aproveitá-los energeticamente. As folhas de bananeira, por exemplo, podem ter umidade inicial acima de 43% e do pseudocaule de 90% (MAIA, 2013). Quando secos, esses resíduos podem apresentar PCI de 15,6 MJ/kg (4,33 MWh_{th}/t) para a folha e 12,2 MJ/kg (3,38 MWh_{th}/t) para o pseudocaule. Esses valores foram considerados para o cálculo do potencial energético desses resíduos³¹. Além disso, foi considerado o aproveitamento de 40% desses resíduos, considerando que 60% serão deixados no campo para manutenção das condições do solo.

Assim, o potencial energético do aproveitamento das folhas das bananeiras pode ser obtido pela Equação 29.

$$EE = t_{banana} \times t_{folhas/t\ banana} \times (1 - \%U) \times \%_{disp} \times PCI_{res} \times \eta \quad \text{Equação 29}$$

Onde:

EE = Energia elétrica disponível (MWh)

t_{banana} = Toneladas de banana colhida (t)

$t_{folhas/t\ banana}$ = Tonelada de resíduo por tonelada de banana (1 t de resíduo (folhas, engaço e cascas) por tonelada de banana)

$\%U$ = Percentual de umidade do resíduo (43% de umidade, conforme Maia, 2013)

$\%_{disp}$ = Disponibilidade de aproveitamento dos resíduos (%) (aproveitamento de 40%, já que 60% dos resíduos são deixados no campo)

PCI_{res} = Poder calorífico inferior do resíduo (MWh_{th}/t) (4,33 MWh_{th}/t, conforma Maia, 2013)

η = Eficiência de conversão elétrica do sistema (%)

A potência disponível a partir dos resíduos da colheita da banana (folhas + engaço + casca) foi calculada pela Equação 18, apresentada no item 4.1 deste relatório.

³¹ Considerando que 75% dos resíduos possuem umidade inicial de 90%, e 25% dos resíduos possuem umidade de 43%.

O potencial energético do aproveitamento do pseudocaule das bananeiras pode ser obtido pela Equação 30.

$$EE = t_{banana} \times t_{pseudo-caule/t\ banana} \times (1 - \%U) \times \%_{disp} \times PCI_{res} \times \eta \quad \text{Equação 30}$$

Onde:

EE = Energia elétrica disponível (MWh)

t_{banana} = Toneladas de banana colhida (t)

$t_{pseudo-caule/t\ banana}$ = Tonelada de resíduo por tonelada de banana (3 t de resíduo (pseudocaule) por tonelada de banana)

$\%U$ = Percentual de umidade do resíduo (90% de umidade, conforme Maia, 2013)

$\%_{disp}$ = Disponibilidade de aproveitamento dos resíduos (%) (aproveitamento de 40%, já que 60% dos resíduos são deixados no campo, conforme EPE, 2014)

PCI_{res} = Poder calorífico inferior do resíduo (MWh_{th}/t) (3,38 MWh_{th}/t, conforma Maia, 2013)

η = Eficiência de conversão elétrica do sistema (%)

A potência disponível a partir dos resíduos da colheita da banana (pseudocaule) foi calculada pela Equação 18, apresentada no item 4.1 deste relatório.

4.1.10 RESÍDUOS DO BENEFICIAMENTO DO COCO-DA-BAÍÁ (CASCA)

Segundo Rocha *et al.* (2010) a casca do coco pode ser aproveitada de diversas formas, tais como assentos e revestimentos interno de veículos, mantas e telas de proteção para o solo, vassouras e cordas, substrato agrícola, telhas, isolante térmico e acústico e para a produção de briquetes. Quanto ao aproveitamento energético, alguns estudos fazem essas avaliações.

Marcelino (2017) encontrou o valor de PCI de 13,90 MJ/kg para a casca do coco, o que significa um valor de 3,86 MWh_{th}/t. Segundo Rocha *et al.* (2010), as cascas representam de 80 a 85% do seu peso inicial. Portanto, para o cálculo do potencial energético das cascas dessa cultura considerou-se o valor de 85%. Além disso, foi considerado que 100% das cascas serão destinadas ao aproveitamento energético.

O potencial energético do aproveitamento da casca do coco-da-baía pode ser obtido pela Equação 31.

$$EE = t_{\text{coco-da-baía}} \times \%_{\text{res}} \times \%_{\text{disp}} \times PCI_{\text{res}} \times \eta \quad \text{Equação 31}$$

Onde:

EE = Energia elétrica disponível (MWh)

$t_{\text{coco-da-baía}}$ = Toneladas de coco-da-baía colhido (t)

$\%_{\text{res}}$ = Porcentagem de resíduos aproveitados (%) (85% do peso inicial, conforme Rocha *et al.*, 2010)

$\%_{\text{disp}}$ = Disponibilidade de aproveitamento dos resíduos (%) (100% de resíduo aproveitado)

PCI_{res} = Poder calorífico inferior do resíduo (MWh_{th}/t) (3,86 MWh_{th}/t de casca do coco, conforme Marcelino, 2017)

η = Eficiência de conversão elétrica do sistema (%)

A potência disponível a partir dos resíduos do coco-da-baía (casca) foi calculada pela Equação 18, apresentada no item 4.1 deste relatório.

4.1.11 RESÍDUOS DA COLHEITA DA CANA-DE-AÇÚCAR (PALHA)

Neste item foram considerados apenas os resíduos da colheita da cana-de-açúcar, já que o bagaço, a torta de filtro e a vinhaça são resíduos industriais que, geralmente, já possuem aproveitamento na própria unidade de processamento para geração de calor de processo e bioeletricidade no caso do bagaço, e na fertirrigação no caso da vinhaça, nas usinas de produção de açúcar e etanol.

Segundo o Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2020), é recomendado manter de 50 a 60% da palha no campo e para o cálculo deste trabalho foi considerado o percentual de aproveitamento de 40% (COELHO *et al.*, 2020). Segundo Linero (2017) uma tonelada de cana produz 280 kg de palha, com 50% de umidade, além disso, expõe que a palha possui um PCI da ordem de 3,6 MWh_{th}/t.

O potencial energético do aproveitamento da palha da cana-de-açúcar pode ser obtido pela Equação 32.

$$EE = t_{\text{cana-de-açúcar}} \times t_{\text{palha/t cana colhida}} \times (1 - \%U) \times \%_{\text{disp}} \times PCI_{\text{res}} \times \eta \quad \text{Equação 32}$$

Onde:

EE = Energia elétrica disponível (MWh)

$t_{\text{cana-de-açúcar}}$ = Toneladas de cana-de-açúcar colhida (t)

$t_{palha/t\ cana\ colhida}$ = Tonelada de palha por tonelada de cana colhida (280 kg de palha por tonelada de cana colhida)

$\%U$ = Percentual de umidade do resíduo (50% de umidade, conforme Linero, 2017)

$\%_{disp}$ = Disponibilidade de aproveitamento dos resíduos (%) (aproveitamento de 40%, já que 60% dos resíduos são deixados no campo, conforme Coelho *et al.*, 2020)

PCI_{res} = Poder calorífico inferior do resíduo (MWh_{th}/t) (3,6 MWh_{th}/t , conforme Linero, 2017)

η = Eficiência de conversão elétrica do sistema (%)

A potência disponível a partir dos resíduos da colheita da cana-de-açúcar (palha) foi calculada pela Equação 18, apresentada no item 4.1 deste relatório.

4.2. RESULTADOS

A seguir são apresentadas as tabelas dos potenciais de geração de eletricidade a partir dos resíduos de colheita e/ou beneficiamento de cada cultura agrícola analisada neste estudo (Tabela 20 a

Tabela 27), representando os principais municípios que possuem viabilidade técnica de aproveitamento energético dos resíduos³². A Tabela 28 apresenta o potencial energético total, considerando-se a soma de todos os resíduos disponíveis nos municípios). Os valores para cada cultura e de todos os municípios estão em planilha anexa a este produto.

Tabela 21 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos da colheita e beneficiamento do milho (sabugo + palha), por município que possui potencial de aproveitamento da fonte.

UF	Município	Milho em grão produzido (t/ano)	Resíduo total (sabugo + palha) (t/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
AC	Feijó	6.450	3.431	4.639	0,60
AC	Tarauacá	5.805	3.088	2.088	0,30
MT	Colniza	8.567	4.558	6.162	0,90
RO	Alta Floresta D'Oeste	16.267	8.654	11.701	1,60
RO	Chupinguaia	83.893	44.631	60.344	8,40
RO	Espigão D'Oeste	5.482	2.916	1.972	0,30
RO	Porto Velho	96.076	51.112	69.107	9,70

³² A viabilidade técnica considerada neste estudo refere-se aos municípios que apresentam potencial acima de 200 kW.

UF	Município	Milho em grão produzido (t/ano)	Resíduo total (sabugo + palha) (t/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
RR	Alto Alegre	16.200	8.618	11.653	1,60
RR	Boa Vista	12.000	6.384	8.632	1,20
RR	Bonfim	40.950	21.785	29.455	4,10
Total 10+		291.690	155.179	205.751	29,36
Total SISOL		322.575	171.610	213.761	30,50

Fonte: Elaboração própria (2022).

Nota: Os resultados apresentados são referentes à totalidade do município onde estão localizados os sistemas isolados. Vale ressaltar que pode ocorrer mais de um SISOL por município. O Anexo I apresenta a lista de localidades em cada município.

Tabela 22 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos do beneficiamento do café (casca), por município que possui potencial de aproveitamento da fonte.

UF	Município	Café produzido (t/ano)	Resíduo casca (t/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
RO	Alta Floresta D'Oeste	15.356	7.678	8.315	1,19
RO	Buritis	11.334	5.667	6.137	0,88
Total SISOL		44.615	22.307	18.937	2,70

Fonte: Elaboração própria (2022).

Nota: Os resultados apresentados são referentes à totalidade do município onde estão localizados os sistemas isolados. Vale ressaltar que pode ocorrer mais de um SISOL por município. O Anexo I apresenta a lista de localidades em cada município.

Tabela 23 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos da colheita da soja (palha), por município que possui potencial de aproveitamento da fonte.

UF	Município	Soja Produção (t/ano)	Resíduo (t/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
AM	Humaitá	8.000	2.880	1.750	0,25
AP	Macapá	19.958	7.185	8.730	1,25
RO	Chupinguaia	122.200	43.992	53.450	7,63
RO	Cujubim	69.188	24.908	30.263	4,32
RO	Machadinho D'Oeste	50.433	18.156	22.059	3,15
RO	Porto Velho	57.187	20.587	25.014	3,57
RR	Alto Alegre	67.500	24.300	29.525	4,21
RR	Boa Vista	19.950	7.182	8.726	1,25
RR	Bonfim	46.880	16.877	20.505	2,93
Total SISOL		475.722	171.260	202.951	28,96

Fonte: Elaboração própria (2022).

Nota: Os resultados apresentados são referentes à totalidade do município onde estão localizados os sistemas isolados. Vale ressaltar que pode ocorrer mais de um SISOL por município. O Anexo I apresenta a lista de localidades em cada município.

Tabela 24 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos do beneficiamento do açaí (semente), por município que possui potencial de aproveitamento da fonte.

UF	Município	Açaí produzido (t/ano)	Resíduo (t/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
AM	Codajás	60.000	44.160	65.843	9,40
AM	Humaitá	3.180	2.340	1.745	0,25
PA	Anajás	48.000	35.328	52.674	7,52
PA	Gurupá	3.040	2.237	1.668	0,24
PA	Muaná	17.500	12.880	19.204	2,74
PA	Oeiras do Pará	32.487	23.910	35.650	5,09
PA	São Sebastião da Boa Vista	17.345	12.766	19.034	2,72

UF	Município	Açaí produzido (t/ano)	Resíduo (t/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
RR	Caroebe	3.200	2.355	1.756	0,25
Total SISOL		203.327	149.649	204.869	29,23

Fonte: Elaboração própria (2022).

Nota: Os resultados apresentados são referentes à totalidade do município onde estão localizados os sistemas isolados. Vale ressaltar que pode ocorrer mais de um SISOL por município. O Anexo I apresenta a lista de localidades em cada município.

Tabela 25 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos da colheita e beneficiamento do arroz (palha e casca) por município que possui potencial de aproveitamento da fonte.

UF	Município	Arroz produzido (t/ano)	Resíduo (t/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
RO	Cujubim	7.000	4.102	5.464	0,72
RO	Porto Velho	36.465	21.368	28.463	4,06
RR	Amajari	6.120	3.586	4.777	0,34
RR	Bonfim	35.000	20.510	27.319	3,60
RR	Normandia	22.110	12.956	17.258	2,27
RR	Uiramutã	14.950	8.761	11.669	1,54
Total SISOL		135.576	79.448	90.556	12,92

Fonte: Elaboração própria (2022).

Nota: Os resultados apresentados são referentes à totalidade do município onde estão localizados os sistemas isolados. Vale ressaltar que pode ocorrer mais de um SISOL por município. O Anexo I apresenta a lista de localidades em cada município.

Tabela 26 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos da colheita da banana (folhas e pseudocaule), por município que possui potencial de aproveitamento da fonte.

UF	Município	Banana produzida (t/ano)	Resíduo (t/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
AC	Feijó	6.800	2.366	1.421	0,20
AC	Tarauacá	9.500	3.306	1.985	0,28
AM	Eirunepé	10.500	3.654	4.387	0,63
AM	Manicoré	18.200	6.334	7.605	1,09
AM	Novo Aripuanã	7.200	2.506	1.504	0,21
PA	Itaituba	17.640	6.139	7.371	1,05
RO	Buritis	14.625	5.090	6.111	0,87
RO	Porto Velho	9.547	3.322	1.995	0,28
RR	Caroebe	20.700	7.204	8.650	1,23
RR	São João da Baliza	9.960	3.466	2.081	0,30
Total SISOL		240.616	83.992	62.279	8,89

Fonte: Elaboração própria (2022). Nota: Os resultados apresentados são referentes à totalidade do município onde estão localizados os sistemas isolados. Vale ressaltar que pode ocorrer mais de um SISOL por município. O Anexo I apresenta a lista de localidades em cada município.

Tabela 27 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos da colheita da mandioca (parte aérea da planta), por município que possui potencial de aproveitamento da fonte.

UF	Município	Mandioca produzida (t/ano)	Resíduo (t/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
AC	Cruzeiro do Sul	64.000	16.640	23.562	3,36
AC	Feijó	54.000	14.040	19.881	2,84
AC	Jordão	15.050	3.913	5.541	0,79
AC	Marechal Thaumaturgo	52.000	13.520	19.144	2,73
AC	Porto Walter	18.700	4.862	6.885	0,98
AC	Tarauacá	65.600	17.056	24.151	3,45
AM	Alvarães	51.586	13.412	18.992	2,71
AM	Autazes	59.400	15.444	21.869	3,12
AM	Borba	14.000	3.640	5.154	0,74
AM	Carauari	14.400	3.744	5.302	0,76
AM	Coari	10.000	2.600	1.841	0,26
AM	Eirunepé	13.320	3.463	4.904	0,70
AM	Guajará	9.480	2.465	1.745	0,25
AM	Humaitá	45.000	11.700	16.567	2,36
AM	Itacoatiara	13.158	3.421	4.844	0,69
AM	Jutaí	8.700	2.262	1.601	0,23
AM	Lábrea	15.552	4.044	5.726	0,82
AM	Manacapuru	158.563	41.226	58.377	8,33
AM	Manaquiri	9.900	2.574	1.822	0,26
AM	Manicoré	70.000	18.200	25.771	3,68
AM	Maués	22.200	5.772	8.173	1,17
AM	Nhamundá	8.760	2.278	1.613	0,23
AM	Nova Olinda do Norte	17.000	4.420	6.259	0,89
AM	Novo Aripuanã	10.700	2.782	1.970	0,28
AM	Parintins	27.840	7.238	10.250	1,46
AM	Pauini	7.800	2.028	1.436	0,20
AM	Silves	9.050	2.353	1.666	0,24
AM	Tapauá	31.680	8.237	11.663	1,66
AM	Tefé	97.500	25.350	35.896	5,12
AM	Uarini	69.200	17.992	25.477	3,64
AP	Laranjal do Jari	8.741	2.273	1.609	0,23
AP	Macapá	9.435	2.453	1.737	0,25
AP	Mazagão	8.792	2.286	1.618	0,23
AP	Oiapoque	20.548	5.342	7.565	1,08
MT	Colniza	14.400	3.744	5.302	0,76
PA	Aveiro	15.000	3.900	5.522	0,79
PA	Itaituba	20.000	5.200	7.363	1,05
PA	Jacareacanga	27.000	7.020	9.940	1,42
PA	Juruti	120.000	31.200	44.179	6,30
PA	Oeiras do Pará	37.807	9.830	13.919	1,99
PA	Prainha	27.000	7.020	9.940	1,42

UF	Município	Mandioca produzida (t/ano)	Resíduo (t/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
RO	Alta Floresta D'Oeste	11.320	2.943	2.084	0,30
RO	Buritis	16.000	4.160	5.891	0,84
RO	Campo Novo de Rondônia	17.400	4.524	6.406	0,91
RO	Guajará-Mirim	11.200	2.912	2.062	0,29
RO	Machadinho D'Oeste	28.500	7.410	10.493	1,50
RO	Porto Velho	157.428	40.931	57.959	8,27
RO	Vale do Anari	9.750	2.535	1.795	0,26
RR	Caroebe	14.560	3.786	5.360	0,76
RR	Uiramutã	14.950	3.887	5.504	0,79
Total SISOL		1.848.300	480.500	618.540	88,26

Fonte: Elaboração própria (2022).

Nota: Os resultados apresentados são referentes à totalidade do município onde estão localizados os sistemas isolados. Vale ressaltar que pode ocorrer mais de um SISOL por município. O Anexo I apresenta a lista de localidades em cada município.

Das culturas analisadas verifica-se que se avaliadas em separado, as culturas de laranja, limão, feijão, coco-da-baía e cana-de-açúcar não forneceriam matéria-prima suficiente para aproveitamento energético e por esse motivo não estão apresentadas nas tabelas acima. Porém, no cenário onde todos os resíduos disponíveis nos municípios são somados e aproveitados para produção de energia, essas culturas podem contribuir, como apresentado na tabela abaixo (Tabela 28)

Tabela 28 - Potencial de geração de eletricidade a partir dos resíduos da colheita e/ou beneficiamento das culturas agrícolas por município que possui potencial de aproveitamento, considerando a somatória de todas as culturas analisadas.

UF	Município	Potencial Térmico de Cada Cultura ¹ (MW _{th})												Potencial Térmico Total ²	Potencial de Geração de Energia Elétrica ³	Potência Elétrica Disponível Total ⁴
		Can- de- açúcar	Coco- da- baía	Banana	Mandioca	Arroz	Açaí	Soja	Feijão	Café	Milho	Limão	Laranja	(MW _{th})	(MWh/ano)	(MW)
AC	Cruzeiro do Sul	0,03	0,11	0,77	11,21	0,11	0,00	0,00	0,03	0,00	0,49	0,01	0,04	90,25	26.892	3,84
AC	Feijó	0,01	0,02	1,35	9,46	0,13	0,00	0,00	0,01	0,01	2,21	0,01	0,02	54,56	27.839	3,97
AC	Jordão	0,01	0,00	0,26	2,64	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,29	0,01	0,01	38,27	6.801	0,97
AC	Marechal Thaumaturgo	0,02	0,01	0,30	9,11	0,07	0,00	0,00	0,03	0,00	0,40	0,00	0,01	32,48	20.907	2,98
AC	Porto Walter	0,01	0,01	0,33	3,27	0,03	0,00	0,00	0,01	0,00	0,12	0,00	0,01	28,36	7.977	1,14
AC	Santa Rosa do Purus	0,01	0,01	0,42	0,98	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,01	0,01	25,96	1.693	0,24
AC	Tarauacá	0,02	0,01	1,89	11,49	0,16	0,00	0,00	0,01	0,00	1,99	0,01	0,03	23,96	32.810	4,68
AM	Alvarães	0,00	0,00	0,06	9,03	0,00	0,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	22,24	20.298	2,90
AM	Apuí	0,00	0,06	0,13	1,02	0,06	0,00	0,00	0,00	0,07	0,48	0,01	0,02	21,14	1.933	0,28
AM	Autazes	0,00	0,00	0,49	10,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,05	19,26	23.108	3,30
AM	Boca do Acre	0,00	0,00	0,53	0,49	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,44	0,01	0,00	17,67	1.653	0,24
AM	Borba	0,00	0,00	0,21	2,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,02	17,00	5.698	0,81
AM	Carauari	0,01	0,00	0,13	2,52	0,03	0,05	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	15,92	5.818	0,83
AM	Careiro	0,00	0,09	0,55	1,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	15,61	2.040	0,29
AM	Coari	0,01	0,00	0,22	1,75	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,05	0,02	0,01	13,24	4.897	0,70
AM	Codajás	0,00	0,00	0,18	0,96	0,00	31,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	12,79	68.281	9,74
AM	Eirunepé	0,28	0,02	2,09	2,33	0,10	0,06	0,00	0,02	0,00	0,11	0,00	0,01	12,72	10.583	1,51
AM	Envira	0,00	0,03	0,66	0,46	0,12	0,00	0,00	0,01	0,01	0,19	0,00	0,01	12,31	1.560	0,22
AM	Guajará	0,02	0,00	0,14	1,66	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	11,99	1.978	0,28
AM	Humaitá	0,02	0,01	0,54	7,88	0,02	1,66	1,66	0,01	0,00	0,16	0,01	0,01	10,99	25.198	3,60
AM	Itacoatiara	0,00	0,07	0,24	2,30	0,00	0,32	0,00	0,03	0,00	0,05	0,04	0,23	10,56	6.903	0,98

UF	Município	Potencial Térmico de Cada Cultura ¹ (MW _{th})												Potencial Térmico Total ²	Potencial de Geração de Energia Elétrica ³	Potência Elétrica Disponível Total ⁴
		Cana- de- açúcar	Coco- da- baía	Banana	Mandioca	Arroz	Açaí	Soja	Feijão	Café	Milho	Limão	Laranja	(MW _{th})	(MWh/ano)	(MW)
AM	Itapiranga	0,00	0,01	0,24	1,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	9,94	1.620	0,23
AM	Jutaí	0,00	0,00	0,17	1,52	0,04	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,65	1.872	0,27
AM	Lábrea	0,00	0,00	0,49	2,72	0,00	0,18	0,00	0,04	0,00	0,11	0,00	0,00	9,49	7.463	1,06
AM	Manacapuru	0,00	0,00	0,48	27,77	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	9,25	59.624	8,51
AM	Manaquiri	0,00	0,01	0,27	1,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,02	0,16	9,16	4.717	0,67
AM	Manicoré	0,00	0,01	3,62	12,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	9,00	33.473	4,78
AM	Maués	0,04	0,02	0,24	3,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	8,42	8.861	1,26
AM	Nhamundá	0,01	0,00	0,06	1,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	8,24	1.714	0,24
AM	Nova Olinda do Norte	0,00	0,00	0,16	2,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	7,60	6.643	0,95
AM	Novo Aripuanã	0,00	0,00	1,43	1,87	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	7,44	7.789	1,11
AM	Parintins	0,01	0,00	0,51	4,88	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,00	7,26	11.464	1,64
AM	Pauini	0,00	0,00	0,39	1,37	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,08	0,01	0,00	6,70	1.969	0,28
AM	Rio Preto da Eva	0,00	0,02	0,62	0,13	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,54	6,33	1.533	0,22
AM	São Sebastião do Uatumã	0,00	0,01	0,09	1,17	0,00	0,09	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	5,61	1.487	0,21
AM	Silves	0,00	0,00	0,06	1,58	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	5,45	1.797	0,26
AM	Tapauá	0,00	0,01	0,24	5,55	0,00	0,88	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	5,03	14.090	2,01
AM	Tefé	0,00	0,08	0,11	17,07	0,00	0,36	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,04	4,57	37.151	5,30
AM	Uarini	0,00	0,01	0,02	12,12	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,30	25.873	3,69
AP	Laranjal do Jari	0,01	0,00	0,24	1,53	0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	0,04	0,00	0,12	4,21	2.063	0,29
AP	Macapá	0,04	0,00	0,29	1,65	0,02	0,00	4,15	0,01	0,00	0,04	0,00	0,13	4,09	13.307	1,90
AP	Mazagão	0,01	0,00	0,26	1,54	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,08	3,79	2.043	0,29
AP	Oiapoque	0,01	0,00	0,42	3,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,05	3,71	8.606	1,23
AP	Vitória do Jari	0,01	0,00	0,13	1,13	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,05	3,71	1.428	0,20
MT	Colniza	0,15	0,00	0,32	2,52	0,04	0,00	0,00	0,07	1,16	2,93	0,01	0,05	3,55	15.266	2,18

UF	Município	Potencial Térmico de Cada Cultura ¹ (MW _{th})												Potencial Térmico Total ²	Potencial de Geração de Energia Elétrica ³	Potência Elétrica Disponível Total ⁴
		Cana- de- açúcar	Coco- da- baía	Banana	Mandioca	Arroz	Açaí	Soja	Feijão	Café	Milho	Limão	Laranja	(MW _{th})	(MWh/ano)	(MW)
PA	Anajás	0,00	0,00	0,31	0,60	0,00	25,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,46	54.577	7,79
PA	Aveiro	0,01	0,06	0,60	2,63	0,03	0,17	0,00	0,01	0,00	0,18	0,01	0,02	3,40	7.791	1,11
PA	Gurupá	0,01	0,00	0,03	0,84	0,06	1,59	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	3,28	5.369	0,77
PA	Itaituba	0,01	0,06	3,51	3,50	0,01	0,05	0,00	0,03	0,00	0,23	0,04	0,16	3,23	15.987	2,28
PA	Jacareacanga	0,01	0,03	0,52	4,73	0,27	0,02	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	3,16	11.794	1,68
PA	Juruti	0,00	0,00	0,03	21,01	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,03	44.451	6,34
PA	Muaná	0,00	0,05	0,00	0,07	0,00	9,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,88	19.450	2,78
PA	Oeiras do Pará	0,00	0,00	0,25	6,62	0,06	16,96	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,05	2,85	50.379	7,19
PA	Porto de Moz	0,02	0,27	0,14	1,31	0,06	1,13	0,00	0,00	0,00	0,08	0,01	0,01	2,77	6.373	0,91
PA	Prainha	0,01	0,17	0,14	4,73	0,18	0,75	0,00	0,00	0,01	0,98	0,28	0,19	2,71	15.638	2,23
PA	São Sebastião da Boa Vista	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	9,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,55	19.266	2,75
RO	Alta Floresta D'Oeste	0,01	0,02	0,37	1,98	0,26	0,00	0,28	0,24	3,96	5,57	0,01	0,02	2,38	26.747	3,82
RO	Buritis	0,00	0,00	2,91	2,80	0,01	0,13	0,00	0,02	2,92	0,19	0,01	0,01	2,33	18.921	2,70
RO	Campo Novo de Rondônia	0,00	0,01	0,57	3,05	0,15	0,00	0,11	0,00	0,27	0,41	0,00	0,00	2,32	9.609	1,37
RO	Chupinguaia	0,01	0,00	0,07	0,31	0,00	0,00	25,42	0,00	0,03	28,70	0,00	0,00	2,24	114.717	16,37
RO	Cujubim	0,00	0,00	0,17	0,75	2,60	0,00	14,39	0,00	0,20	1,13	0,01	0,00	2,20	40.483	5,78
RO	Espigão D'Oeste	0,00	0,04	0,11	0,93	0,03	0,01	0,56	0,01	0,51	1,88	0,05	0,16	2,14	9.036	1,29
RO	Guajará-Mirim	0,01	0,02	0,10	1,96	0,01	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,01	0,00	2,13	4.506	0,64
RO	Machadinho D'Oeste	0,02	0,01	0,78	4,99	0,00	0,00	10,49	0,00	0,57	0,12	0,01	0,02	1,96	35.746	5,10
RO	Pimenta Bueno	0,00	0,05	0,15	1,23	0,02	0,00	0,38	0,00	0,02	0,31	0,01	0,01	1,94	4.616	0,66
RO	Porto Velho	0,10	0,20	1,90	27,57	13,54	0,60	11,90	0,05	1,29	32,87	0,13	0,10	1,94	189.748	27,08
RO	São Francisco do Guaporé	0,00	0,00	0,01	0,17	1,21	0,00	0,94	0,00	0,25	0,89	0,00	0,00	1,88	7.278	1,04
RO	Vale do Anari	0,01	0,00	0,19	1,71	0,21	0,02	0,33	0,00	0,16	0,21	0,01	0,00	1,87	5.987	0,85
RR	Alto Alegre	0,00	0,00	0,35	1,26	0,78	0,00	14,04	0,11	0,00	5,54	0,08	0,08	1,84	46.767	6,67

UF	Município	Potencial Térmico de Cada Cultura ¹ (MW _{th})												Potencial Térmico Total ²	Potencial de Geração de Energia Elétrica ³	Potência Elétrica Disponível Total ⁴
		Can- de- açúcar	Coco- da- baía	Banana	Mandioca	Arroz	Açaí	Soja	Feijão	Café	Milho	Limão	Laranja	(MW _{th})	(MWh/ano)	(MW)
RR	Amajari	0,00	0,00	0,22	0,23	2,27	0,02	0,00	0,00	0,00	0,11	0,01	0,02	1,78	6.056	0,86
RR	Boa Vista	0,01	0,00	0,83	0,61	0,56	0,00	4,15	0,01	0,00	4,11	0,13	0,14	1,71	22.196	3,17
RR	Bonfim	0,00	0,00	0,40	1,07	12,99	0,00	9,75	0,00	0,00	14,01	0,02	0,02	1,63	80.448	11,48
RR	Caracaráí	0,00	0,00	0,20	0,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,36	0,38	1,61	5.013	0,72
RR	Caroebe	0,00	0,02	4,11	2,55	0,00	1,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	1,57	17.695	2,52
RR	Mucajaí	0,00	0,00	0,64	0,70	0,01	0,05	0,29	0,00	0,00	0,36	0,01	0,07	1,54	4.476	0,64
RR	Normandia	0,00	0,09	0,24	0,79	8,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,01	0,01	1,50	19.949	2,85
RR	Pacaraima	0,00	0,00	0,37	1,10	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	1,48	1.580	0,23
RR	Rorainópolis	0,03	0,06	0,63	1,06	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,14	0,18	1,03	1,46	7.144	1,02
RR	São João da Baliza	0,00	0,05	1,98	0,04	0,00	0,14	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,09	1,41	4.874	0,70
RR	Uiramutã	0,00	0,00	0,03	2,62	5,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	1,36	17.321	2,47
Total SISOL		1,02	1,85	45,14	312,17	50,24	103,47	98,87	0,86	11,48	109,98	1,66	4,63	741,38	1.528.713	218,14

Fonte: Elaboração própria (2022).

Nota:

- 1) Potencial Térmico de cada cultura (MW_{th}): calculado a partir do poder calorífico inferior (MWh_{th}/t), do total de resíduos de cada cultura produzidos por ano (t/ano) e número de horas de operação (7.008 h/ano), considerando o fator de capacidade de 85%.
- 2) Potencial Térmico Total (MWh_{th}): calculado a partir dos potenciais térmicos de cada cultura.
- 3) Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano): considera o potencial de geração elétrica calculado ao longo do ano (7.008 h/ano).
- 4) Potência Disponível (MW): leva em consideração o rendimento de conversão para eletricidade de cada tecnologia, de acordo com o porte.

Em geral, verifica-se que as potencialidades energéticas dos resíduos agrícolas nos municípios em questão são reduzidas. Importante reforçar que aqui foram consideradas as culturas existentes em áreas agrícolas em todo o município, e não apenas na área da comunidade isolada, em vista da indisponibilidade de dados desagregados por sistema isolado. Esse fato faz com que o potencial na comunidade provavelmente será ainda mais baixo. Além disso, a maioria dos cultivos realizados pelas comunidades integrantes dos SISOL se destina à sua própria subsistência, gerando baixos níveis de resíduos.

Outro fator relevante é a distribuição heterogênea das áreas agrícolas na região, o que pode inviabilizar o transporte até o ponto de destino para o aproveitamento energético. Isso faz com que os resultados aqui apresentados sejam uma estimativa para o município como um todo, e com provavelmente perspectiva reduzida de aproveitamento em curto e médio prazo.

Algumas alternativas já estão sendo implantadas no que diz respeito à utilização de biomassa para a geração de energia. O estado de Roraima, por exemplo, possui um histórico da produção de palma de dendê e o município de Rorainópolis prevê a geração de 10,98 MW utilizando o óleo de palma como biocombustível para a geração de energia, contando com um plantio de 2,3 mil hectares, próprios e em parceria com agricultura familiar (DINELLI, 2020).

A Brasil Biofuels (BFF), também no estado de Roraima, possui uma área de cultivo de 5,4 mil hectares em São João da Baliza (RR), e pretende ter uma potência instalada de 17,60 MW, aproveitando tanto o óleo vegetal quanto os resíduos da biomassa. O empreendimento oferta mais de 450 postos de trabalho direto, e possui normas rígidas para a expansão das áreas de plantio, no que diz respeito a proibição de utilização de áreas de floretas nativas (JORNAL RORAISUL, 2022).

Considerando essa mesma relação (de 5,4 mil hectares para uma capacidade instalada de 17,6 MW) e tendo em vista que o estado de Roraima ainda conta com cerca de 700 mil hectares de terra já degradadas que podem ser utilizadas para o plantio da palma (JORNAL RORAISUL, 2022), temos que a potência instalada poderia chegar a até 2.281,48 MW.

Entretanto, como mencionado na Introdução, esta opção de plantações para produção de bioenergia não foi contemplada neste estudo, uma vez que as questões de mudança de uso da terra (desmatamento) na região amazônica são bastante controversas. Pode-se de fato pensar em utilizar áreas degradadas para plantações de bioenergia, mas sempre haverá a discussão sobre o uso mais adequado destas áreas, dentro da discussão energia x alimento

(*food x fuel*). Esta discussão sobre aspectos de sustentabilidade não foi considerada em detalhes por fugir ao escopo do trabalho, ficando seus objetivos focados no uso energético de resíduos, dentro do conceito de Bioeconomia.

4.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Sérgio de Melo; VASCONCELOS, Marcus Arthur Marçal de. **Aproveitamento dos cachos e frutos não selecionados**. [S. l.], 2021. Disponível em:

<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/acai/pos-producao/tecnologia-pos-colheita/aproveitamento-dos-cachos-e-frutos-nao-selecionados>. Acesso em: 12 maio 2022.

BÁRTHOLO, Gabriel Ferreira *et al.* Cuidados na colheita, no preparo e no armazenamento do café. **Informe Agropecuário. Café: normas e coeficientes técnicos**, [s. l.], v. 14, n. 162, p. 33–44, 1989.

BOSE, Max L. V.; FILHO, João G. Martins. O papel dos Resíduos Agroindustriais na Alimentação de Ruminantes. **Informe Agropecuário**, [s. l.], v. 10, n. 119, p. 3–7, 1984.

CAIELLE, Edgard L. Uso da Palha de Café na Alimentação de Ruminantes. **Informe Agropecuário**, [s. l.], v. 10, n. 119, p. 36–38, 1984.

CARVALHO, F. C. Disponibilidade de resíduos agroindustriais e do beneficiamento de produtos agrícolas. *In*: SIMPÓSIO UTILIZAÇÃO DE SUBPRODUTOS AGROINDUSTRIAIS E RESÍDUOS DE COLHEITA NA ALIMENTAÇÃO DE RUMINANTES, 1992, São Carlos. **Anais [...]** São Carlos, 1992. p. 7–28.

CARVALHO, José Edmar Urano; MÜLLER, Carlos Hans. Biometria e Rendimento Percentual de Polpa de Frutas Nativas da Amazônia. **Comunicado Técnico 139-EMBRAPA**, [s. l.], p. 1–3, 2005. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/404792/1/com.tec.139.pdf>. Acesso em: 12 maio 2022.

COELHO, Suani Teixeira *et al.* **Atlas de bioenergia do Estado de São Paulo**. São Paulo: [s. n.], 2020.

DINELLI, Thamy. **Energia com biocombustível do óleo de palma em Rorainópolis é aposta para 2021**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://energiasroraima.com.br/energia-com-biocombustivel-do-oleo-de-palma-em-rorainopolis-e-aposta-para-2021/>. Acesso em: 11 jul. 2022.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica DEA 15/14 Inventário Energético de Resíduos Rurais**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2014.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica EPE 17/18 Potencial Energético de Resíduos Florestais do Manejo Sustentável e de Resíduos da Industrialização da Madeira**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2018.

FELTRAN, José Carlos *et al.* **Potencial da cultura da mandioca para bioenergia** (Charleston Gonçalves & Luiza M. Capanema, Org.) **O Agrônomo**: Série Técnica APTA. Campinas: [s. n.], 2016. Disponível em: <http://oagronomico.iac.sp.gov.br/?p=27>. Acesso em: 18 maio 2022.

FERNANDES, E. R. K. *et al.* Avaliação do potencial para o reaproveitamento de resíduos da bananicultura por pirólise. *In*: II SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS E AGROINDUSTRIAIS, 2011, Foz do Iguaçu. **Anais [...]** Foz do Iguaçu, 2011. p. 1–4. Disponível em: <http://www.sbera.org.br/2sigera/obras/t145.pdf>.

FERRER, E. *et al.* Estudio sobre la incorporación de los restos de poda de cítricos en diferentes municipios de la provincia de Valencia. **Levante Agrícola**, [s. l.], n. 379, p. 24–28, 2006.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **PAM - Produção Agrícola Municipal**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques>. Acesso em: 18 jul. 2022.

JORNAL RORAI SUL. **BALIZA - Agroindústria gera emprego e desenvolvimento na região Sul - RORAI SUL**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://roraisul.com.br/baliza-agroindustria-gera-emprego-e-desenvolvimento-na-regiao-sul/>. Acesso em: 18 jul. 2022.

LINERO, Francisco Antonio Barba. Aproveitamento da palha de cana – Desafios, Benefícios e Perspectivas. *In*: 14º SEMINÁRIO INTERNACIONAL EM LOGÍSTICA AGROINDUSTRIAL, 2017, Piracicaba. **Anais [...]** Piracicaba, 2017.

MAIA, Bianca Goulart de Oliveira. **Valorização de resíduos da bananicultura e da rizicultura na produção de briquetes**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade da Região de Joinville, Joinville, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/286446506_Valorizacao_de_residuos_da_rizicultura_e_bananicultura_na_producao_de_briquetes.

MARCELINO, Marcela Magalhães. **Biomassa residual do coco para obtenção de energia e intermediários químicos via gaseificação: caracterização, modelagem e simulação**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2017. Disponível em: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/24412>

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; LORA, Electo Eduardo Silva. **Wood energy: principles and applications**. Itajubá, MG: Núcleo de Excelência em Geração Termoelétrica Distribuída – NEST, 2014.

PASSINHO, Mohara Silva *et al.* Uso da semente de açaí como alternativa energética na indústria de beneficiamento de polpa de açaí. **Enciclopédia Biosfera**, [s. l.], v. 16, n. 29, 2019.

PAULA, Luana Elisa de Ramos e *et al.* Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **CERNE**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 237–246, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/cerne/a/CY478JQ7bpBT36MwW7CGCgj/?lang=en>. Acesso em: 18 jul.

ROCHA, Fernanda Barreto de Almeida *et al.* Gestão de resíduos como ferramenta aplicada ao beneficiamento do coco verde. *In: XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 2010, São Carlos. **Anais [...]** São Carlos, 2010. [s. n.]. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2010_tn_sto_121_788_17278.pdf.

SILVA, José F. C. Restos culturais e industriais na alimentação de ruminantes. **Informe Agropecuário**, [s. l.], v. 7, n. 78, p. 40–47, 1981.

SILVA, Jadir N.; CARDOSO SOBRINHO, José; SAIKI, Emílio T. Utilização de biomassa na secagem de produtos agrícolas via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos. **Engenharia Agrícola**, [s. l.], v. 24, n. 2, p. 405–411, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/eagri/a/g8SY3Tss3FqctQXdGFth5Kd/?lang=pt>. Acesso em: 18 jun. 2022.

VELÁZQUEZ-MARTÍ, B. *et al.* Prediction and evaluation of biomass obtained from citrus trees pruning. **Journal of Food, Agriculture and Environment**, [s. l.], v. 11, n. 3–4, p. 1485–1491, 2013. Disponível em: www.world-food.net. Acesso em: 18 jul. 2022.

5. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS ANIMAIS (RA)

Este item apresenta o panorama geral de aproveitamento energético dos resíduos animais dos municípios integrantes dos Sistemas Isolados (SISOL) em território nacional.

A pecuária pode causar danos ambientais importantes quando as atividades não são desenvolvidas de forma ambientalmente correta. Dentre os potenciais impactos pode-se destacar: altas taxas de desmatamento de áreas para o cultivo de pastagens; degradação do solo e perda de nutrientes devido ao pisoteio intensivo dos animais; compactação do solo, dificultando a infiltração de água; contaminação de lençol freático; além da produção e emissão de gases de efeito estufa (GEE).

Os dejetos provenientes da pecuária são aqueles resultantes da atividade biológica dos animais, como esterco e urina, além da água de higienização dos sistemas de criação. Este tipo de resíduo é considerado como importante matéria-prima para a produção de biogás, com consequentemente geração de energia, podendo ser importante no suprimento energético da zona rural.

O tratamento dos resíduos provenientes das criações animais torna-se uma necessidade principalmente devido ao alto teor de matéria orgânica presente nos mesmos. Caso esses resíduos não tenham o tratamento adequado, os riscos ao meio ambiente são significativos, causando poluição dos corpos hídricos e eutrofização do solo, entre outros.

O adequado tratamento destes dejetos pode ser realizado por meio da biodigestão anaeróbia, permitindo a produção de biogás, que pode ser utilizado para a geração de energia elétrica, conforme discutido anteriormente.

No entanto, muitas unidades de criação são isoladas, o que pode dificultar o tratamento dos dejetos para a geração de biogás e energia. Além disso, a viabilidade de projetos deste tipo depende muito da quantidade de dejetos produzidos por cada unidade, problema que talvez possa ser solucionado com a integração de diversos produtores. Outra grande dificuldade está relacionada ao principal sistema de criação, que é de forma extensiva, no qual os dejetos permanecem no campo, servindo de adubo e, portanto, não são possíveis de serem coletados e tratados (COELHO *et al.*, 2020).

O método de criação intensiva se caracteriza no confinamento do animal, geralmente alimentado com ração e água. O objetivo desse método é aumentar a produtividade dos animais em espaço reduzido e por menor tempo. Entretanto, a criação intensiva também está

atrelada a impactos negativos ao meio ambiente devido à geração de resíduos líquidos e ao acúmulo de dejetos com altas concentrações de carga orgânica, que podem causar poluição local, com consequências em toda a área de influência indireta, principalmente pela contaminação de recursos hídricos. Por isso, o correto manejo e tratamento desses resíduos é importante tanto para o meio ambiente quanto para a vida da população (COELHO *et al.*, 2018).

O item a seguir apresenta a metodologia utilizada para a determinação do potencial de geração de energia proveniente da utilização dos dejetos animais analisados neste estudo: aves, suínos, bovinos e bubalinos.

5.1. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi baseada nos mesmos conceitos utilizados para o potencial energético de resíduos animais do Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2020). O levantamento de informações sobre o número de cabeças de cada criação animal mostrou que a maioria dos rebanhos nesses municípios é para a subsistência; visto isso, não foram considerados os resíduos de abate, apenas os dejetos da criação dos animais.

Além disso, não há dados informando especificamente o número de animais em cada comunidade; os dados disponíveis informam o número de animais por município. Dessa forma, o potencial aqui calculado considerou a população total de animais nos municípios onde existe sistema isolado instalado. Considera-se que os dejetos da criação de animais nesses municípios serão recolhidos e destinados para aproveitamento energético utilizando o processo de biodigestão anaeróbia. Outras hipóteses foram admitidas a fim de estabelecer o potencial teórico do aproveitamento desses resíduos, e estão descritas a seguir.

5.1.1 DEJETOS DA AVICULTURA

Os dados de número de cabeças de aves nos municípios estudados foram obtidos da Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM) do IBGE, entretanto os últimos dados disponíveis têm 2020 como ano base (IBGE, 2020). Estão divididos em efetivo de “galináceos total” (que inclui galinhas, galos, frangas, frangos e pintos) e “galináceos galinha”. Neste último, foi considerado que todas as galinhas são galinhas poedeiras, portanto foi subtraído do total de galináceos o total de galinhas para determinação da quantidade de “aves de corte”.

Foi considerado que todas as aves de corte são criadas em regime de confinamento. Considerou-se que os frangos chegam no aviário no 3º dia e são abatidos no 47º dia (dedicados ao mercado nacional), com peso inicial de 0,039 kg e final de 2,421 kg (AVILA *et al.*, 2017; PERESIN *et al.*, 2015 apud COELHO *et al.*, 2020).

Quanto as aves poedeiras, foi considerado que vivem em regime de confinamento, iniciando o ciclo de produção na 20ª semana de vida e descartada na 90ª semana de vida, com o peso inicial de 1,662 kg e final de 2,385 kg (COELHO *et al.*, 2020; MITO *et al.*, 2018).

Importante ressaltar que essa consideração de que todas as aves estão sendo criadas em regime de confinamento pode não condizer com a realidade, visto que a produção nessas comunidades possa ser apenas para subsistência. Além disso, os cálculos englobam o número total de animais do município e não apenas os animais da localidade isolada e isso se deve ao fato de não haver dados disponíveis do número de animais nessas comunidades.

A determinação do tempo de abate é importante, pois está diretamente relacionado a quantidade de dejetos gerados ao longo da vida do animal. Para aves de corte são considerados dejetos, as fezes, urina, pena, ração e cama de aviário. No caso das aves poedeiras considera-se como dejetos as fezes e urina (COELHO *et al.*, 2020). Os valores de produção média de dejetos de aves por kg de animal vivo por dia e por tipo de criação foram calculados utilizando os mesmos valores que os utilizados no Atlas de Bioenergia do estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2020), de 0,085 kg/dia para aves de corte e 0,064 kg/dia para galinhas poedeiras.

5.1.2 DEJETOS DA SUINOCULTURA

O número de suínos foi obtido da Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM) do IBGE, com os dados de 2020 como base (IBGE, 2020). Como considerações, foi utilizada a premissa de que todas as criações de suínos dos municípios estudados estão em regime de confinamento. Segundo a ASAE - *American Society of Agricultural Engineers* (2003), a taxa de geração de dejetos é de, em média, 0,084 kg de dejetos para cada kg de animal vivo por dia.

A taxa de crescimento foi calculada com os valores de Mito *et al.* (2018) que considera o peso inicial de 3kg, peso final médio de 73,25 kg e ciclo de vida de 160 dias (da creche até a terminação). Para a determinação do potencial de geração de biogás dos dejetos foi utilizada a metodologia de Coelho *et al.* (2020).

5.1.3 DEJETOS DA BOVINOCULTURA

Geralmente, para o cálculo dos dejetos gerados pela criação de bovinos são considerados dois grandes grupos: gado leiteiro e gado de corte, porém, devido a realidade dessas comunidades isoladas, o aproveitamento dos resíduos animais pode ser particularmente difícil, isso porque a maioria dos animais existentes nessas localidades são para subsistência, com pouca (ou nenhuma) coleta de material. Além disso, a criação de bovinos, em sua maioria, é dada de forma extensiva, o que impede o aproveitamento dos resíduos desse animal.

Aqui foi calculado o potencial teórico, considerando que os animais estão em regime de confinamento, porém, sabe-se que esta pode não ser a realidade; portanto, o aproveitamento desse potencial não é previsto em curto e médio prazo. Além disso, foi calculado o potencial energético do aproveitamento dos resíduos com o número total de indivíduos (animais) do município, devido à inexistência de dados mais específicos que mostrem o número exato de animais nas comunidades.

5.1.3.1 GADO LEITEIRO

Para o cálculo do potencial energético do aproveitamento de dejetos do gado leiteiro foram consideradas o número de vacas ordenhadas de acordo com a Pesquisa da Pecuária Municipal (IBGE, 2020).

Dois sistemas de confinamento foram utilizados, gado leiteiro confinado e semiconfinado. Este corresponde as vacas, em sistema extensivo, que são ordenhadas diariamente, e por isso, permanecem certo tempo no curral. Aqui, foram consideradas duas ordenhas por dia, de aproximadamente duas horas.

A metodologia de cálculo seguiu as bases estabelecidas no Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO *et al.*, 2020). Considera-se um peso médio de 664 kg por animal em regime de confinamento e 596 kg aos animais em regime semiconfinado (CARVALHO, 2000). Segundo Schneider *et al.* (2012) a geração de dejetos/kg de animal vivo é de 0,086.

Para identificar qual rebanho encontra-se em regime de confinamento e qual encontra-se em regime semiconfinado, utilizou-se a premissa estabelecida por Assis *et al.* (2005), Coelho *et al.* (2020) e Johann (2010) que determinam que vacas em sistema de confinamento produzem em média 4.500 litros de leite por ano. Assim, baseado no número de vacas ordenhadas e no total de leite produzido, obtido da Pesquisa trimestral do leite do IBGE (IBGE,

2022), podemos calcular a produtividade média por cabeça. Verificou-se que apenas dois municípios apresentaram valores superiores a 4.500 litros de leite por dia por animal, sendo estas as cidades de Campo Novo de Rondônia e Machadinho D'Oeste, ambas localizadas no estado de Rondônia. Para estas cidades, portanto, assumiu-se a premissa que os animais estão em regime de confinamento total.

5.1.3.2 GADO DE CORTE

O número de bovinos de corte foi calculado pela diferença entre o número de bovinos totais e o número de vacas ordenhadas (leiteiras, calculadas anteriormente). Os valores foram obtidos de acordo com a Pesquisa da Pecuária Municipal (IBGE, 2020).

Quanto ao gado de corte, assim como no gado leiteiro, foi utilizada a metodologia de Coelho *et al.* (2020), admitindo um sistema de criação de 30 meses em sistema extensivo. A terminação é feita num período de 100 dias em sistema de confinamento, iniciando o período com 300 kg e finalizando-o com 450 kg.

O número de cabeças bovinas foi obtido através da exclusão do número de cabeças de vacas leiteiras (utilizadas no cálculo anterior) do número de cabeças totais divulgadas pelo IBGE (2020). Segundo Schneider *et al.* (2012) o fator de geração de dejetos é de 0,058 kg/kg de animal vivo por dia. Destaca-se mais uma vez, que se trata de um potencial teórico, visto que o sistema de produção de gado de corte nessas localidades é extensivo, o que inviabiliza o recolhimento e aproveitamento do esterco.

5.1.4 DEJETOS DA BUBALINOCULTURA

Para a determinação de aproveitamento energético a partir dos dejetos da bubalinocultura algumas considerações foram feitas devido à falta de metodologia e/ou dados disponíveis para o cálculo do biogás produzido. Segundo Jorge ([s. d.]), a produção de esterco gira em torno de 9 toneladas por animal por ano, o que significa a geração média de 24,66 kg por dia, que foi considerado durante um período de confinamento de 100 dias anteriores ao abate.

Para o restante das variáveis necessárias para efetuar os cálculos, foram considerados os mesmos parâmetros utilizados para o cálculo dos bovinos por falta de informações na bibliografia. Além disso, sabe-se que a parte da população de bubalinos são búfalas leiteiras, porém, devido a inexistência de dados sobre produção de leite de búfalas por município no Brasil, foi considerado aqui que todos os animais seriam de corte.

5.1.5 GERAÇÃO DE BIOGÁS E ELETRICIDADE DOS DEJETOS DA CRIAÇÃO – MODELAGEM

Foram considerados para o cálculo do potencial os dejetos das aves (excluindo codornas), bovinos de corte e leiteiros, bubalinos e suínos. Os fatores de geração de dejetos de bovinos suínos e aves utilizados nesse estudo foram os mesmos apresentados no Atlas de Bioenergia do Brasil (COELHO *et al.*, 2012), e para bubalinos foi considerado o mesmo fator da geração de bovinos. Os valores podem ser visualizados na Tabela 29.

Tabela 29 - Valores utilizados para determinação do potencial energético de resíduos de animais através do processo de biodigestão.

Tipo de criação	kg biogás/kg dejetos	Concentração de metano (%)	Fonte
Suínos	0,062	66	Coelho <i>et al.</i> , 2012
Bovinos	0,037	60	Coelho <i>et al.</i> , 2012
Aves	0,055	60	Coelho <i>et al.</i> , 2012
Bubalinos	0,037	60	Adotado

Fonte: Adaptado de Coelho *et al.* (2012).

A produção de biogás de cada criação pode ser obtida pela Equação 33.

$$V_{biogás} = D_j \times F \times \rho^{-1} \quad \text{Equação 33}$$

Onde:

$V_{biogás}$ = Volume de biogás (Nm³ biogás/ano)

D_j = Total anual de dejetos (kg dejetos/ano)

F = Fator de conversão (kg biogás/ kg dejetos)

ρ^{-1} = Massa específica do biogás (kg biogás/Nm³ biogás)

A geração de energia elétrica, considerando a utilização de motores do ciclo Otto, foi obtida utilizando a Equação 34.

$$EE = \frac{V_{biogás} \times Conc_{CH_4} \times PCI_{CH_4} \times Ef_{ele}}{1000} \quad \text{Equação 34}$$

Onde:

EE = Potencial de geração de energia elétrica por ano (MWh/ano)

$V_{biogás}$ = Volume de biogás produzido (Nm^3 biogás /ano)

$Conc_{CH_4}$ = Concentração de metano presente no biogás (%)

PCI_{CH_4} = Poder Calorífico Inferior do metano ($kWh_{th}/Nm^3 CH_4$) (neste estudo utilizou-se o fator de $9,97 kWh_{th}/m^3 CH_4$, conforme apresentado por Bueno *et al.* (2016))

Ef_{ele} = Eficiência de conversão energética para motor ciclo Otto a biogás (foram utilizados fatores de 0,35 para vazões de biogás de até $5.000 Nm^3/dia$ e de 0,42 para vazões acima $5.000 Nm^3/dia$, conforme metodologia fornecida pela ABiogás (2018))

1000 = Conversão de kWh para MWh

O cálculo da potência disponível a partir dos dejetos de criação animal foi efetuado pela Equação 35.

$$P = \frac{EE}{(FC \times TO)} \quad \text{Equação 35}$$

Onde:

P = Potência disponível (MW)

EE = Potencial de geração de energia elétrica por ano a partir do biogás gerado em aterros sanitários, em cada município (MWh/ano)

FC = Fator de capacidade (%) (Considerou-se 85% de fator de capacidade)

TO = Tempo de operação do sistema (h/ano)

5.2. RESULTADOS

Abaixo estão apresentadas as tabelas com os 10 principais municípios com maiores potenciais de aproveitamento energético a partir de dejetos de animais. Os potenciais completos de cada município estudado no sistema isolado encontram-se em planilha anexa a este produto. Além disso, a

Tabela 36 indica os dez maiores potenciais de municípios considerando todos os rebanhos.

Tabela 30 - Síntese dos potenciais de biogás e energia elétrica para os municípios do sistema isolado, a partir dos dejetos de criação de aves de corte.

Município	UF	Nº de cabeças	Dejetos total (Dj)	Biogás		Potencial de Geração de Energia Elétrica	Potência Elétrica Disponível
			(kg/ano)	(Nm³/ano)	(Nm³/dia)	(MWh/ano)	(MW)
Cruzeiro do Sul	AC	169.575	850.433,04	38.541,50	105,59	80,69	0,01
Tarauacá	AC	145.388	729.133,18	33.044,20	90,53	69,18	0,01
Feijó	AC	111.334	558.349,47	25.304,31	69,33	52,98	0,01
Manacapuru	AM	111.316	558.259,20	25.300,22	69,32	52,97	0,01
Colniza	MT	103.536	519.241,84	23.531,96	64,47	49,27	0,01
Porto Velho	RO	92.445	463.619,53	21.011,17	57,56	43,99	0,01
Itaituba	PA	46.968	235.548,51	10.675,02	29,25	22,35	0,00
Parintins	AM	45.600	228.687,88	10.364,10	28,39	21,70	0,00
Machadinho D'Oeste	RO	45.176	226.561,48	10.267,73	28,13	21,50	0,00
Marechal Thaumaturgo	AC	40.221	201.711,73	9.141,55	25,05	19,14	0,00
TOTAL 10+ MUNICÍPIOS		911.559	4.571.545,90	207.181,80	567,60	433,80	0,10
TOTAL		1.939.978	9.729.154,57	440.923,80	1.208,01	923,16	0,12

Fonte: Elaboração própria (2022).

Tabela 31 - Síntese dos potenciais de biogás e energia elétrica para os municípios do sistema isolado, a partir dos dejetos de criação de galinhas poedeiras.

Município	UF	Nº de cabeças	Dejetos Total (Dj)	Biogás		Potencial de Geração de Energia Elétrica	Potência Elétrica Disponível
			(kg/ano)	(Nm³/ano)	(Nm³/dia)	(MWh/ano)	(MW)
Boa Vista	RR	358.000	16.930.570,00	767.290,90	2.102,17	1.606,48	0,21
Porto Velho	RO	280.964	13.287.376,00	602.181,90	1.649,81	1.260,79	0,17
Manacapuru	AM	185.491	8.772.258,00	397.557,40	1.089,20	832,37	0,11
Itacoatiara	AM	90.000	4.256.289,00	192.894,40	528,48	403,86	0,05
Rio Preto da Eva	AM	57.521	2.720.289,00	123.283,10	337,76	309,74	0,04
Cruzeiro do Sul	AC	68.474	3.238.279,00	146.758,30	402,08	307,27	0,04
Colniza	MT	49.519	2.341.857,00	106.132,60	290,77	222,21	0,03
Tarauacá	AC	45.912	2.171.275,00	98.401,84	269,59	206,02	0,02
Machadinho D'Oeste	RO	39.746	1.879.672,00	85.186,43	233,39	178,35	0,02
Feijó	AC	35.096	1.659.763,00	75.220,22	206,08	157,49	0,02
TOTAL 10+ MINICÍPIOS		1.210.723	57.257.628,00	2.594.907,00	7.109,00	5.485,00	0,74
TOTAL		2.139.236	101.168.954,00	4.584.962,00	12.562,00	9.663,00	1,30

Fonte: Elaboração própria (2022).

Tabela 32 - Síntese dos potenciais de biogás e energia elétrica para os municípios do sistema isolado, a partir dos dejetos de criação de suínos.

Município	UF	Nº de cabeças	Geração dejetos (Dj)	Biogás		Potencial de Geração de Energia Elétrica	Potência Elétrica Disponível
			(kg/ano)	(Nm³/ano)	(Nm³/dia)	(MWh/ano)	(MW)
Afuá	PA	44.387	16.317.145,00	888.484,00	2.434,00	2.046,00	0,27
Feijó	AC	30.589	11.244.850,00	612.293,00	1.678,00	1.410,00	0,19
Chaves	PA	19.170	7.047.101,00	383.722,00	1.051,00	884,00	0,12
Tarauacá	AC	18.200	6.690.518,00	364.305,00	998,00	839,00	0,11
Colniza	MT	10.473	3.849.989,00	209.636,00	574,00	483,00	0,06
Boa Vista	RR	10.420	3.830.506,00	208.575,00	571,00	480,00	0,06
Bonfim	RR	9.830	3.613.615,00	196.765,00	539,00	453,00	0,06
Alto Alegre	RR	9.800	3.602.587,00	196.164,00	537,00	452,00	0,06
Santa Cruz do Arari	PA	9.100	3.345.259,00	182.153,00	499,00	420,00	0,06
Apuí	AM	8.600	3.161.454,00	172.144,00	472,00	396,00	0,05
TOTAL 10+ MUNICÍPIOS		170.569	62.703.025,00	3.414.241,00	9.354,00	7.863,00	1,06
TOTAL		398.224	146.391.486,00	7.971.159,00	21.839,00	18.358,00	2,47

Fonte: Elaboração própria (2022).

Tabela 33 - Síntese dos potenciais de biogás e energia elétrica para os municípios do sistema isolado, a partir dos dejetos de criação de bovinos de corte.

Município	UF	Nº de cabeças	Dejetos total (Dj)	Biogás		Potencial de Geração de Energia Elétrica	Potência Elétrica Disponível
			(kg/ano)	(Nm³/ano)	(Nm³/dia)	(MWh/ano)	(MW)
Porto Velho	RO	1.233.243	2.676.938.918,00	81.614.239,00	223.601,00	170.876,00	22,95
Colniza	MT	672.351	1.459.438.698,00	44.495.217,00	121.905,00	93.160,00	12,51
Buritis	RO	498.572	1.082.225.312,00	32.994.774,00	90.397,00	69.081,00	9,28
Alta Floresta D'Oeste	RO	455.484	988.696.345,00	30.143.273,00	82.584,00	63.111,00	8,48
São Francisco do Guaporé	RO	438.987	952.887.132,00	29.051.525,00	79.593,00	60.825,00	8,17
Campo Novo de Rondônia	RO	411.485	893.189.915,00	27.231.483,00	74.607,00	57.015,00	7,66
Espigão D'Oeste	RO	371.081	805.486.973,00	24.557.604,00	67.281,00	51.416,00	6,91
Machadinho D'Oeste	RO	361.478	784.642.221,00	23.922.092,00	65.540,00	50.086,00	6,73
Chupinguaia	RO	353.513	767.352.993,00	23.394.979,00	64.096,00	48.982,00	6,58
Lábrea	AM	318.472	691.291.247,00	21.076.017,00	57.743,00	44.127,00	5,93
TOTAL 10+ MUNICÍPIOS		5.114.666	11.102.149.753,00	338.481.203,00	927.345,00	708.678,00	95,20
TOTAL		8.865.043	19.242.905.587,00	586.675.732,00	1.607.330,00	1.228.381,00	165,00

Fonte: Elaboração própria (2022).

Tabela 34 - Síntese dos potenciais de biogás e energia elétrica para os municípios do sistema isolado, a partir dos dejetos de criação vacas leiteiras.

Município	UF	Nº de cabeças	Geração dejetos (Dj)	Biogás		Potencial de Geração de Energia Elétrica	Potência Elétrica Disponível
			(kg/ano)	(Nm³/ano)	(Nm³/dia)	(MWh/ano)	(MW)
Machadinho D'Oeste	RO	46.151	961.923.447,00	29.327.023,00	80.348,00	61.402,00	8,25
Campo Novo de Rondônia	RO	25.811	537.977.641,00	16.401.807,00	44.936,00	34.340,00	4,61
Porto Velho	RO	34.198	106.631.872,00	3.250.982,00	8.907,00	8.168,00	1,10
Buritis	RO	21.610	67.381.565,00	2.054.322,00	5.628,00	4.301,00	0,58
Itaituba	PA	18.063	56.321.759,00	1.717.132,00	4.704,00	3.595,00	0,48
Vale do Anari	RO	16.983	52.954.239,00	1.614.463,00	4.423,00	3.380,00	0,45
Espigão D'Oeste	RO	15.548	48.479.804,00	1.478.047,00	4.049,00	3.095,00	0,42
Autazes	AM	15.000	46.771.100,00	1.425.953,00	3.907,00	2.986,00	0,40
São Francisco do Guaporé	RO	14.903	46.468.647,00	1.416.731,00	3.881,00	2.966,00	0,40
Cujubim	RO	13.730	42.811.147,00	1.305.222,00	3.576,00	2.733,00	0,37
TOTAL 10+ MUNICÍPIOS		221.997	1.967.721.220,00	59.991.683,00	164.361,00	126.966,00	17,00
TOTAL		395.187	2.507.740.341,00	76.455.730,00	209.467,00	161.436,00	21,68

Fonte: Elaboração própria (2022).

Tabela 35 - Síntese dos potenciais de biogás e energia elétrica para os municípios do sistema isolado, a partir dos dejetos de criação de bubalinos.

Município	UF	Nº de cabeças	Geração dejetos (Dj)	Biogás		Potencial de Geração de Energia Elétrica	Potência Elétrica Disponível
			(kg/ano)	(Nm³/ano)	(Nm³/dia)	(MWh/ano)	(MW)
Chaves	PA	190.702	470.271.132,00	14.337.578,00	39.281,00	30.019,00	4,03
Macapá	AP	68.715	169.451.190,00	5.166.211,00	14.154,00	10.816,00	1,45
Porto de Moz	PA	41.062	101.258.892,00	3.087.171,00	8.458,00	6.464,00	0,87
Almeirim	PA	40.655	100.255.230,00	3.056.571,00	8.374,00	6.400,00	0,86
Prainha	PA	37.468	92.396.088,00	2.816.962,00	7.718,00	5.898,00	0,79
Autazes	AM	35.000	86.310.000,00	2.631.410,00	7.209,00	5.509,00	0,74
Amapá	AP	30.321	74.771.586,00	2.279.628,00	6.246,00	4.773,00	0,64
Santa Cruz do Arari	PA	21.050	51.909.300,00	1.582.605,00	4.336,00	3.314,00	0,45
Muaná	PA	16.167	39.867.822,00	1.215.486,00	3.330,00	2.545,00	0,34
Careiro da Várzea	AM	8.050	19.851.300,00	605.224,00	1.658,00	1.267,00	0,17
TOTAL 10+ MUNICÍPIOS		489.190	1.206.342.540,00	36.778.848,00	100.764,00	77.004,00	10,34
TOTAL		566.811	1.397.755.926,00	42.614.639,00	116.752,00	89.225,00	11,98

Fonte: Elaboração própria (2022).

Tabela 36 - Dez municípios com maiores potenciais de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento dos resíduos animais (em MWh/ano).

Município	UF	Bovinos de corte	Bovinos de leite	Bubalinos	Suínos	Galinhas poedeiras	Aves de corte	Total
Porto Velho	RO	170.876	8.168	141	342	1.261	44	180.831
Machadinho D'Oeste	RO	50.086	61.402	7	274	178	21	111.969
Colniza	MT	93.160	1.691	40	483	222	49	95.644
Campo Novo de Rondônia	RO	57.015	34.340	9	112	78	10	91.564
Buritis	RO	69.081	4.301	40	91	112	14	73.639
Alta Floresta D'Oeste	RO	63.111	988	17	219	156	15	64.505
São Francisco do Guaporé	RO	60.825	2.966	1	208	101	13	64.115
Espigão D'Oeste	RO	51.416	3.095	10	190	139	16	54.866
Chupunguaia	RO	48.982	703	3	121	49	7	49.866
Itaituba	PA	42.569	3.595	38	275	152	22	46.652
Total 10+		707.120	121.250	307	2.314	2.448	212	833.651
Total SISOL		1.228.382	161.437	89.225	18.358	9.663	923	1.507.987

Fonte: Elaboração própria (2022).

Tabela 37 - Potencial total de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento dos resíduos animais, por estado (em MWh/ano).

UF	Bovinos de corte	Bovinos de leite	Bubalinos	Suínos	Galinhas poedeiras	Aves de corte	Total
AC	55.005	2.517	176	2.745	786	242	61.473
AM	183.716	18.224	13.488	3.545	3.667	286	222.925
AP	3.105	615	17.554	780	26	19	22.100
MT	93.160	1.691	40	483	222	49	95.644
PA	112.045	12.523	57.613	5.958	537	86	188.762
PE	11	0	0	1	0	0	11
RO	680.518	123.295	256	1.959	2.288	175	808.491
RR	100.822	2.572	98	2.887	2.136	66	108.580
Total SISOL	1.228.382	161.437	89.225	18.358	9.663	923	1.507.987

Fonte: Elaboração própria (2022).

5.3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOGAS - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS E BIOMETANO. **Proposta de Programa Nacional do Biogás e do Biometano - PNBB**, 2018. Disponível em: https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/2021/01/PNBB_Versao_Final.pdf

ASAE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **ASAE D384.1 FEB03 Manure Production and Characteristics** St. Joseph, MI, 2003.

ASSIS, Airdem Gonçalves de *et al.* Sistemas de produção de leite no Brasil. **Circular Técnica**, [s. l.], n. 85, p. 9, 2005.

AVILA, Valdir Silveira de *et al.* **Poedeira Embrapa 051 - guia de manejo das poedeiras**

coloniais de ovos castanhos. [s. l.], p. 10, 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/179376/1/Manual-051-web.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2022.

BUENO, Fernanda de Souza *et al.* Avaliação da produção de biogás e do potencial energético dos resíduos orgânicos provenientes do Restaurante Universitário da EACH – USP. *In*: PBL 2016 INTERNATIONAL CONFERENCE, 2016, São Paulo. **Proceedings** [...]. São Paulo: [s. n.], 2016. Disponível em: https://www.academia.edu/35892669/AVALIAÇÃO_DA_PRODUÇÃO_DE_BIOGÁS_E_DO_POTENCIAL_ENERGÉTICO_DOS_RESÍDUOS_ORGÂNICOS_PROVENIENTES_DO_RESTAURANTE_UNIVERSITÁRIO_DA_EACH_USP

CARVALHO, Marcelo Pereira de. **Qual o tamanho ideal das vacas leiteiras?** Disponível em: <https://www.milkpoint.com.br/artigos/producao-de-leite/qual-o-tamanho-ideal-das-vacas-leiteiras-16760n.aspx>. Acesso em: 22 jun. 2022.

COELHO, Suani Texeira *et al.* **Atlas de bioenergia do Brasil.** São Paulo, SP: CENBIO - Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2012. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/gbio/?q=livro/atlas-de-biomassa>. a

COELHO, Suani Teixeira *et al.* **Atlas de bioenergia do Estado de São Paulo.** São Paulo: [s. n.], 2020.

COELHO, Suani Teixeira (Coord.); GARCILASSO, Vanessa Pecora, FERRAZ JUNIOR, Antônio Djalma Nunes; SANTOS, Marilin Mariano dos; JOPPERT, Caio Luca. **Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano.** São Paulo: IEE-USP, 2018. ISBN: 978-85-86923-53-1. Disponível em: <http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/?q=pt-br/noticia/e-book-tecnologias-de-produ%C3%A7%C3%A3o-e-uso-de-biog%C3%A1s-e-biometano>.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **PPM - Pesquisa da Pecuária Municipal.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=destaques>. Acesso em: 17 maio. 2022a.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **PAM - Produção Agrícola Municipal.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques>. Acesso em: 18 jul. 2022b.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Quantidade de leite cru adquirido e industrializado no mês e no trimestre (Mil Litros), 1º trimestre 2022.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9209-pesquisa-trimestral-do-leite.html?=&t=destaques>. Acesso em: 19 jul. 2022.

JOHANN, A. DA S. T. **Desenvolvimento de tecnologia alternativa para tratamento de efluente de limpeza dos currais de gado leiteiro.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2010. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/1897>. Acesso em: 19 jul. 2022.

JORGE, André Mendes. **Etologia de bubalinos**. Botucatu, [s.d.]. Disponível em: https://dsti37.fmvz.unesp.br/bufalos/HPBufalos_files/Mat_Didatico/15-Etologia_Bubalinos_Texto.pdf. Acesso em: 19 jul. 2022.

MITO, Jessica Yuki de Lima *et al.* **Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil**. Concórdia : Embrapa Suínos e Aves, p. 52, 2018.

SCHNEIDER, Vania Elisabete *et al.* **Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas 2012**. Brasília, DF: [s.n.]. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7687/1/RP_Diagnostico_2012.pdf. Acesso em: 18 jun. 2022.

6. POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL

A biomassa florestal é utilizada como fonte de energia, sob a forma de lenha, desde os mais remotos tempos e, a partir da revolução industrial, vem sendo substituída por combustíveis fósseis, altamente poluentes, mas com elevada densidade energética.

Por muito tempo o uso dos produtos florestais foi associado à ideia de desmatamento, uma vez que as atividades para sua obtenção foram desenvolvidas sem que houvesse preocupação com sua sustentabilidade (GUARDABASSI, 2006). Entretanto, a implementação de boas práticas de manejo florestal, por meio de técnicas de exploração de impacto reduzido, visando a manutenção das funções ecológicas, sociais e econômicas das florestas podem gerar, simultaneamente, renda e benefícios à preservação e conservação dos recursos naturais (SARTORI, 2012).

No Brasil, a geração de energia elétrica a partir da biomassa florestal pode ser considerada estratégica, em razão da alta produtividade florestal e extensas áreas disponíveis para o manejo sustentável e de baixo impacto, grande volume de resíduos gerados nas atividades industriais madeireiras e a disponibilidade comercial de tecnologias de conversão modernas e eficientes (BRAND, 2010-).

O uso da biomassa florestal ainda apresenta vantagens ambientais como a utilização dos resíduos solucionando, assim, um passivo ambiental de emissões decorrentes da decomposição da matéria orgânica como também contribuindo para as emissões evitadas pela substituição de combustíveis fósseis na geração de eletricidade. A EPE estimou que em 2018 houve um consumo de 800 mil m³ de óleo diesel para suprimento dos Sistemas Isolados resultando em emissões diretas da ordem de 2,1 MtCO₂ (EPE, 2018).

Neste contexto, a região amazônica se destaca pelo potencial de geração de energia elétrica a partir de fontes alternativas ao diesel, predominante na região e, para tal, diferentes sistemas locais de geração de energia baseados em biomassa, pequenas centrais hidrelétricas, eólica e solar devem ser projetados.

6.1. INTRODUÇÃO

Novais (2022), Ribeiro, da Fonseca e Pereira (2020) e Sartori (2012) apontam o manejo florestal com técnicas de exploração de impacto reduzido (EIR) como uma das alternativas à defesa da sustentabilidade de longo prazo das florestas, uma vez que este sistema objetiva o

aproveitamento dos recursos florestais, madeireiros e não madeireiros, de forma simultânea à geração de benefícios econômicos, sociais e ambientais.

De acordo com dados da ANEEL (2022), a capacidade térmica instalada, por empreendimentos que tem a biomassa florestal como combustível final, nos estados integrantes do SISOL é de 813 MW e nos municípios é de 103 MW. A Tabela 38 apresenta o resumo da capacidade instalada por combustível final nos estados e municípios que integram o SISOL.

Tabela 38 - Empreendimentos que utilizam biomassa florestal para a geração de energia, por estado e município do sistema isolado (excluindo Pernambuco).

Combustível	Estados		Municípios	
	Quantidade	Potência (MW)	Quantidade	Potência (MW)
Lenha	3	138	-	-
Licor Negro	1	55	1	55
Resíduos Florestais	30	621	10	48
TOTAL	34	813	11	103

Fonte: Adaptado de ANEEL (2022).

Portanto, as técnicas de produção florestal sustentável e o aproveitamento dos resíduos oriundos da extração e do processamento de madeira para fins comerciais podem contribuir em parte do suprimento de energia elétrica, proporcionar a diminuição da emissão de gás metano pela decomposição da biomassa proveniente dos resíduos das operações florestais e industriais, além de favorecer a redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE) pela substituição dos combustíveis fósseis no atendimento aos sistemas isolados.

6.1.1 PROPRIEDADES DA BIOMASSA FLORESTAL PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A biomassa florestal para fins energéticos é caracterizada como uma fonte primária de energia e, embora apresente uma eficiência reduzida, uma das suas características de destaque é a versatilidade sendo utilizada como combustível na forma de carvão vegetal ou consumida diretamente na forma de lenha, cavacos, resíduos da exploração madeireira e resíduos industriais (licor negro) nos processos de geração de energia térmica, mecânica e elétrica (AMARAL, 2019; NOGUEIRA; LORA, 2003; WALTER; NOGUEIRA, 2008).

Ainda de acordo com Nogueira; Lora (2003), a eficiência energética da biomassa florestal depende das propriedades físicas da madeira, além da tecnologia de conversão aplicada na geração que pode ser classificada em três categorias: processos termoquímicos, físicos e biológicos. Tolmasquim (2016) aponta que a conversão da energia química contida na

biomassa para obtenção de eletricidade ocorre, principalmente, por meio de tecnologias que utilizam ciclos termodinâmicos, em especial o ciclo *Rankine*.

As principais propriedades da biomassa florestal com fins energéticos são: densidade da madeira, poder calorífico, umidade, análise química elementar, imediata e estrutural, teor de inorgânicos e o comportamento térmico da biomassa (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013). Para Brand (2010) o poder calorífico é a propriedade de maior influência na análise da viabilidade de uso de uma fonte de energia. Em seu trabalho Vidal; da Hora (2011) destacam que a baixa densidade energética da biomassa sólida, em comparação as fontes fósseis, tem influência direta nos altos custos de logística, bem como altos teores de umidade influenciam significativamente a qualidade da combustão.

Assim, para o uso da madeira como fonte de energia há a necessidade de atestar a qualidade do produto a fim de atender as demandas energéticas específicas a cada projeto. Um parâmetro que pode ser utilizado para indicar a qualidade desse combustível é o Índice de Valor Combustível (IVC) (SOARES, 2016). Para melhorar a comparação das características da biomassa florestal Purohit; Nautiyal (1987) desenvolveram o IVC que leva em consideração o poder calorífico, densidade, teor de cinzas e teor de umidade.

A seguir são descritas as principais propriedades físico-químicas da madeira para energia.

- a. O **poder calorífico** é normalmente quantificado pela queima de uma porção conhecida, onde é mensurado o calor liberado da reação. No caso de madeira pode-se encontrar valores desde 3.000 kcal/kg até 5.400 kcal/kg. A resina das árvores possui valor médio de 9.460 kcal/kg e normalmente, as coníferas apresentam valores mais elevados que as folhosas, pois contém baixo teor de resina (BRITO; BARRICHELO, 1979). O calor liberado pela combustão de uma unidade de massa de um combustível em pressão constante com a água permanecendo no estado de vapor, é denominado de poder calorífico inferior (ARRUDA, 2009).
- b. A **densidade** é uma propriedade fundamental na determinação da qualidade da madeira e pode variar tanto por questões genéticas, como por questões ambientais (genótipo + ambiente). É também de grande importância para caracterizar madeiras para diversos fins, diretamente correlaciona com as características físicas e mecânicas da madeira (JÚNIOR; GARCIA, 2017).
- c. De acordo com Furtado *et al.* (2012) o **teor de cinzas** é expresso em percentagem e representa o conteúdo de material inorgânico presente na madeira e Brand (2010)

traz que o teor de cinzas pode ser dividido em duas categorias, natural e poluído (ou de contaminação). O natural é derivado de substâncias inorgânicas que estão presentes na fisiologia da planta, já a poluída consiste na incrustação de materiais inorgânicos como terra, areia e pedras, que se agregam na biomassa durante as atividades de colheita e transporte até o processamento. O teor de cinzas presente na biomassa é inversamente proporcional ao poder calorífico.

- d. Para Timber Queensland (2014) o teor de umidade é o volume de água presente na madeira dividido por sua massa seca e, normalmente, expresso em percentagem. Este é determinado a partir da diferença do peso úmido (massa inicial) pelo peso seco utilizando uma balança de precisão. Considera-se uma das características mais relevantes ao se utilizar materiais lignocelulósicos para a geração de energia.

6.1.2 RESÍDUOS FLORESTAIS MADEIREIROS

A geração de resíduos é consequência direta do processamento primário ou secundário da madeira sólida e a indústria de base florestal tem produção significativa destes desde a colheita até o processamento mecânico das toras.

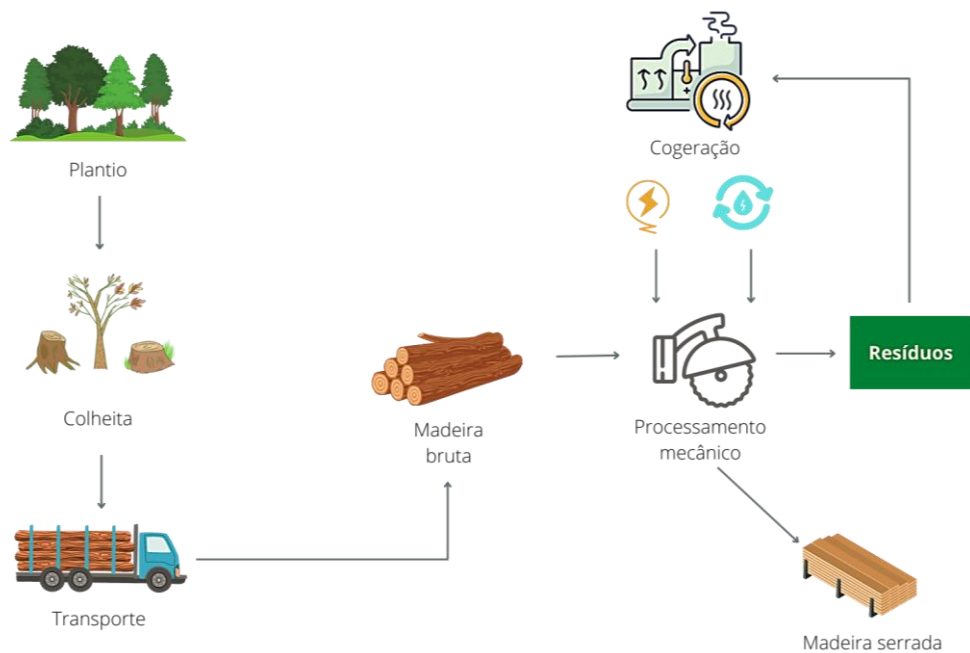
A destinação dos resíduos madeireiros como matéria-prima de baixo custo para fabricação de novos produtos ou para a cogeração de energia tem papel fundamental no atendimento às crescentes necessidades energéticas, agrega valor, incentiva a inovação tecnológica do setor, reduz a pressão por novas áreas de produção, evita a mudança no uso do solo para o cultivo de culturas energéticas dedicadas em terras agriculturáveis, estimula a economia local e é também uma fonte de geração de empregos (DULYS-NUSBAUM; KLAMMER; SWINTON, 2019; IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES, 2022).

Além do exposto anteriormente, a gestão dos resíduos florestais tem impacto direto no controle ambiental da atividade e deve se adequar à legislação vigente, tendo como embasamento a Lei 12.305/2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010).

De acordo com a PNRS (BRASIL, 2010) os resíduos podem ser classificados e caracterizados em dois tipos: **agrossilvipastoris** que são “os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades”, ou seja, quando referentes às atividades do manejo florestal e os **industriais** que são “os gerados nos processos produtivos e instalações industriais”, referentes aos processamento da madeira.

O processo de produção de madeira serrada envolve etapas dependentes de diferentes formas de energia que vão desde o plantio, colheita e transporte que utilizam a energia mecânica tendo o óleo diesel como principal combustível, até o desdobro, secagem, beneficiamento e tratamento/preservação que utilizam tanto a energia elétrica, quanto a térmica, podendo substituir os combustíveis de origem fóssil, normalmente utilizados, pelos próprios resíduos gerados em seu processo a fim de suprir sua demanda energética (Figura 5).

Figura 5 - Processo de produção de madeira com cogeração de energia



Fonte: Elaboração própria (2022).

O aproveitamento energético da biomassa residual oriunda do processamento mecânico das toras pode se dar sob diferentes formas, seja ela por cavacos, por queima direta ou por produtos densificados, como os pellets e os briquetes. Estes últimos apresentam maior densidade energética, além de apresentarem menor custo de processamento, uma vez que, os resíduos necessitam menos preparação, pois já se encontram em partículas de tamanho reduzido, livres de cascas e, geralmente, com menor teor de umidade quando comparados com madeira em forma sólida (VIDAL; DA HORA, 2011).

De acordo com Fagundes (2003) e Silva (2011) os principais tipos de resíduos produzidos nas atividades de desdobro da madeira são: pó de lixamento, aparas ou destopo, cascas, costaneiras, serragens, resíduos do refilamento, sobras e rejeitos. Silva (2011) ainda destaca que alguns estudos demonstram que o volume de resíduos gerados durante o processamento

da madeira pode chegar a até 80% por tora, enquanto outros indicam que o desperdício de madeira durante o beneficiamento é de cerca de 60%.

Stragliotto; Pereira; Oliveira (2020) definem como rendimento volumétrico a relação entre o volume produzido de madeira serrada e o volume utilizado de madeira em forma de tora expresso em porcentagem. O desdobro da madeira na região amazônica apresenta baixo rendimento, o que causa grande produção de resíduos florestais devido à baixa tecnologia e mão-de-obra pouco qualificada, pelo tipo e tamanho da indústria madeireira e também sofre variações de acordo com as espécies, diâmetro, qualidade das toras e com as características dos produtos beneficiados (STRAGLIOTTO; PEREIRA; OLIVEIRA, 2020; VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013).

6.1.3 MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL (MFS)

Sachs (2002) afirma que o Manejo Florestal Sustentável (MFS) visa a conservação e o aproveitamento racional e ecologicamente sustentável dos recursos naturais em benefício das populações locais e está estreitamente relacionado ao desenvolvimento socioambiental. O manejo florestal inclui uma ampla gama de objetivos e atividades, incluindo a exploração de produtos madeireiros e não-madeireiros, os serviços ecossistêmicos, o manejo da fauna silvestre, o ecoturismo, dentre outros.

Em seu trabalho, Sartori (2012) ainda destaca que as práticas de EIR adotadas em áreas destinadas ao MFS propiciam inúmeros benefícios sociais e ambientais, dentre eles a melhor conservação dos solos florestais pela diminuição da compactação causada pelas atividades de extração, menor impacto sobre as árvores remanescentes na área de exploração, além da adoção de normas de saúde e segurança no trabalho assegurando direitos e deveres aos trabalhadores.

No Brasil, os PMFS tiveram seu marco legal na Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, (BRASIL, 1965) que instituiu o Código Florestal e estabeleceu que as florestas e as demais formas de vegetação existentes no território nacional são bens de interesse comum a todos os habitantes do País, caracterizou as Áreas de Preservação Permanente (APP), instituiu as áreas destinadas à Reserva Legal (RL) e previu a criação de normas pelas quais os planos de manejo seriam avaliados (SARTORI, 2012).

Nos dias atuais, a previsão legal dos PMFS está baseada nos seguintes dispositivos: Lei Complementar nº 140/11 (BRASIL, 2011); Lei nº 11.284/2006 (BRASIL, 2006); Lei nº 12.651/2012 (BRASIL, 2012); Decreto Federal nº 5.975/2006 (BRASIL, 2006) Instrução

Normativa MMA nº 5/2006 (BRASIL, 2005); Instrução Normativa MMA nº 4/2006 (BRASIL, 2006); Instrução Normativa MMA nº 1/2009 (BRASIL, 2009).

O manejo sustentável tem seu conceito legal definido no artigo 3º, inciso VII, da Lei Federal nº 12.651/2012, como sendo a “*a administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos e sociais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema objeto do manejo*”. Além disso, o dispositivo também exige o cumprimento de obrigações relacionadas ao controle e monitoramento das atividades (RIBEIRO; DA FONSECA; PEREIRA, 2020). Os autores ainda ressaltam a importância das UC, tanto as de proteção integral quanto as de uso sustentável, regulamentadas pela Lei Federal n. 9.985/2000 (BRASIL, 2000) no controle do desmatamento ilegal, uma vez que restringem o uso do solo na Amazônia.

De acordo com o Decreto 5.975/2006 o Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) é “*o documento técnico básico que contém as diretrizes e procedimentos que o empreendimento assumirá para a administração da floresta*” (BRASIL, 2006). Nele são estabelecidos os parâmetros de administração e gerenciamento da atividade e devem ser caracterizados os meios físico e biológico, as condições edafoclimáticas, os limites da propriedade, as áreas de preservação permanente, os estoques de madeira disponíveis, assim como a estrutura fitossociológica, a composição florística, além das distribuições diamétrica e espacial das espécies (SARTORI, 2012).

Os benefícios do manejo florestal incluem a garantia da produção de madeira por tempo indefinido, a redução do desperdício dos recursos naturais, o aumento da produtividade, geração de riquezas, impactos menores à fauna e flora silvestres, diminuição dos acidentes de trabalho e, por fim, o engajamento social.

Para se ter uma maior segurança da credibilidade do sistema, há a possibilidade de se obter uma certificação usada no mundo inteiro para atestar o responsável manejo florestal e as melhores práticas ambientais e sociais por meio de um programa de auditorias anuais.

6.1.4 CERTIFICAÇÃO FLORESTAL

As ameaças decorrentes das mudanças climáticas e o contínuo aumento do desmatamento ilegal de florestas tropicais implicou na necessidade de garantir e atestar a origem legal dos produtos florestais madeireiros (PFM) e não madeireiros (PFNM) e uma das estratégias implementadas foi o estabelecimento de programas de certificação voluntária do manejo florestal (BASSO *et al.*, 2011).

A certificação florestal visa garantir que a obtenção de produtos de origem florestal seja oriunda de uma área manejada de forma ecologicamente correta, com condições justas de trabalho e de maneira economicamente viável, além de atender todas as exigências legais para sua exploração e tem como um de seus objetivos informar e orientar os consumidores que os padrões do “bom manejo” foram atendidos e monitorados (BASSO *et al.*, 2011; WWF BRASIL, 2022).

O processo de certificação florestal é uma ferramenta econômica de desenvolvimento sustentável e de gestão ambiental que pode seguir sistemas nacionais ou internacionais. Atualmente, os principais sistemas internacionais são o FSC (*Forest Stewardship Council*) e o PEFC (*Program for the Endorsement of Forest Certification Schemes*), que no caso brasileiro credita a certificação florestal CERFLOR (Programa Brasileiro de Certificação Florestal) (VALDIONES *et al.*, 2020).

No caso do FSC, o processo de certificação envolve princípios e critérios que asseguram não somente aspectos ambientais relacionados às práticas de manejo responsável, promovendo a manutenção ou a melhoria dos serviços ecossistêmicos, mas também questões sociais que dizem respeito ao bem-estar, a dignidade e os direitos dos trabalhadores, das comunidades locais e dos povos indígenas agregando grande valor socioambiental aos produtos certificados (Tipos de Certificação FSC - FOREST STEWARDSHIP COUNCIL, 2022).

Dentro do sistema FSC são três os tipos de certificação:

- a. Manejo florestal (do inglês *Forest Management* - FM): se aplica nas atividades desenvolvidas na floresta propriamente dita e seguem os padrões Terra Firme na Amazônia, Harmonizado Plantações e SLIMF (do inglês *Small or Low-Intensity Managed Forest*) usado principalmente para pequenos produtores ou produção comunitária (FSC, 2022).
- b. Cadeia de custódia (do inglês *Chain of Custody* - CoC): se refere à rastreabilidade desde a produção da matéria prima das florestas até o consumidor final (SANQUETTA; MILDEMBERG; DIAS, 2022).
- c. Madeira controlada: específico do sistema FSC, aplicado à materiais não certificados, mas com origem em fontes consideradas como aceitáveis e que podem ser misturados com material certificado pelo FSC em produtos com o rótulo 'FSC Misto' (FSC, 2022).

Em termos de área, de acordo com IMAFLORA (2022) existem de 3 a 5 milhões de hectares de florestas manejadas de modo comprovadamente responsável nas concessões florestais e nos empreendimentos certificados pelo FSC na Amazônia. Dados compilados por Sanquetta; Mildemberg; Dias (2022) apontam que atualmente, apenas, cerca de 1,1 milhão de hectares florestas são certificados pelo FSC nesta região. Ainda de acordo com os autores, o sistema de certificação mais utilizado no Brasil é o FSC, com maior número de certificados e áreas de florestas nativas certificadas quando comparado com o CERFLOR/PEFC.

Como mencionado anteriormente, são inúmeros os benefícios alcançados com a certificação agregando valor ao produto florestal final, maior acessibilidade ao mercado internacional, manutenção da cobertura vegetal e de seus benefícios ecossistêmicos, direitos dos trabalhadores e comunidades locais, além de contribuir efetivamente para o cumprimento da legislação ambiental e florestal do país (BASSO *et al.*, 2011; FSC, 2022).

Entretanto, apesar de todas as oportunidades, a certificação não soluciona todos os problemas sociais e ambientais da produção madeireira no país, os quais necessitam de políticas públicas que incentivem a produção sustentável e mudanças na situação socioeconômica das comunidades dependentes dos recursos florestais.

6.2. METODOLOGIA

A seguir é apresentada a metodologia usada para a estimativa do potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos florestais madeireiros nos municípios integrantes dos sistemas isolados brasileiros.

6.2.1 RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DE MADEIRA EM SERRARIAS

Foram definidas como população base do estudo as serrarias situadas nos municípios de cada sistema isolado brasileiro que possuam certificação do *Forest Stewardship Council* (FSC) (Tabela 39). A partir disto, foram sistematizadas informações e dados secundários disponibilizados no “*Public Certificates Board*” (FSC - FOREST STEWARDSHIP COUNCIL, 2022) a fim de obter o volume de madeira processada em cada uma das unidades industriais selecionadas.

Tabela 39 - Número de empreendimentos (serrarias) por município com sistema isolado.

UF	Município	Nº de empreendimentos
AM	Itacoatiara	1
	Itapiranga	1

	Mazagão	1
AP	Laranjal do Jari	1
	Belém	10
PA	Itaituba	9
	Terra Santa	1
TOTAL		24

Fonte: Elaboração própria (2022).

Para a estimativa da geração de resíduos das serrarias adotou-se como parâmetros a área de efetivo manejo (AEM), a exploração máxima permitida em florestas naturais (EMaxP), o número de ciclos do manejo, o rendimento médio do processo de desdobro de toras pelas serrarias e a densidade básica média para madeira de espécies florestais amazônicas (BRASIL, 2005; Resolução CONAMA nº 406/2009; CARNEIRO *et al.*, 2020; EPE, 2018; SARTORI, 2012). A Tabela 40 apresenta os parâmetros florestais adotados.

Tabela 40 - Parâmetros florestais para o cálculo de geração de resíduos de serrarias.

Parâmetro	Valor	Unidade
Número de ciclos manejo	35	anos
Exploração máxima permitida (EMaxP)	0,86	m³/ha/ano
Rendimento resíduos serraria	55	%
Densidade básica (ρ)	0,65	t/m³

Fonte: Elaboração própria baseado em dados de Brasil (2005), (2009); Carneiro *et al.* (2020); EPE (2018); Sartori (2012) (2022).

Para o cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos do processamento de madeira em serrarias (pó de serra, maravalha, costaneiras, entre outros) foi adotada uma adaptação da metodologia de cálculo para conversão energética proposta por Coelho *et al.* (2020) no “Atlas de Bioenergia do estado de São Paulo”. Essa adaptação se fez necessária, uma vez que, o referido estudo estima o potencial dos resíduos sólidos vegetais da silvicultura de espécies como o Eucalipto e o Pinus.

Foi considerado o sistema convencional de turbina a vapor ciclo *Rankine* com eficiência de conversão termoelétrica (η) determinada de acordo com as potências anuais, sendo a capacidade instalada de **pequeno porte** para potências anuais entre 200 kW e 2 MW e capacidade instalada de **médio porte** para potências anuais acima de 2 MW. Além disso, foi considerado um fator de capacidade (FC) de 80% em ambos os cenários, resultando em 7.008 horas de operação/ano (COELHO *et al.*, 2020).

Foi utilizado um poder calorífico inferior (PCI) de 4.400 kcal/kg para os resíduos de serraria, considerando um teor de umidade de 30%, o que equivale a 5,12 MWh_{th}/t de biomassa sólida (COELHO *et al.*, 2020; EPE, 2018; PEREIRA *et al.*, 2020). A Tabela 41 apresenta os parâmetros técnicos adotados.

Tabela 41 - Parâmetros técnicos para o cálculo do potencial de geração elétrica a partir dos resíduos de serrarias.

Parâmetro	Valor	Unidade
PCI resíduo	5,12	MWh _{th} /t de biomassa
Eficiência conversão termoeletrica Pequeno porte (η)	15	%
Eficiência conversão termoeletrica Médio porte (η)	30	%
Fator de capacidade (FC)	7.008	horas/ano

Fonte: Elaboração própria baseado em dados de Coelho *et al.* (2020); EPE (2018); Pereira *et al.* (2020) (2022).

O cálculo de geração de energia elétrica do resíduo do processamento mecânico da madeira em serrarias foi efetuado segundo a Equação 36.

$$E = [(AEM * EMaxP) * (\%resíduos)] * (\rho) * (PCIresíduos) * (\eta) \quad \text{Equação 36}$$

Onde:

E = Energia elétrica disponível (MWh)

AEM = Área de Efetivo manejo (ha)

$EMaxP$ = Exploração máxima permitida (m³/ha/ano)

$\%resíduos$ = Pó de serra, maravalha, costaneiras, entre outros (%)

ρ = Densidade da madeira (t/ m³)

$PCIresíduos$ = Poder calorífico inferior do resíduo (MWh_{th}/t biomassa)

η = Eficiência de conversão termoeletrica (%)

A potência disponível foi calculada pela Equação 37.

$$P = \frac{E}{FC} \quad \text{Equação 37}$$

Onde:

P = Potência disponível (MW)

E = Energia elétrica disponível (MWh)

FC = Fator de capacidade (horas/ano)

6.2.2 RESÍDUOS DE COLHEITA DO MANEJO FLORESTAL (GALHOS)

A população base do estudo foi definida pelos seguintes critérios: áreas com cobertura florestal inseridas nos municípios de cada sistema isolado brasileiro, destinadas ao manejo florestal sustentado para uso múltiplo e detentoras de certificação de manejo florestal FSC. A partir disto, foram sistematizadas informações e dados secundários disponibilizados no “*Public Certificates Board*” (Dados de Certificação FSC - FOREST STEWARDSHIP COUNCIL, 2022) a fim de obter o volume de madeira disponível em campo na forma de resíduos de colheita.

Foi usado como parâmetro a geração de resíduos oriundos da colheita de madeira para fins comerciais em áreas destinadas ao Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) permitido em base legal onde, no primeiro ano de exploração, é liberado o volume de 1 m³ de resíduo por 1 m³ de tora autorizada (BRASIL, 2005; Resolução CONAMA nº 406/2009). Desta forma, foi considerado um rendimento de resíduos no campo de 100%.

Os demais parâmetros florestais e técnicos são os mesmos utilizados no cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos de serraria. A Tabela 42 apresenta os coeficientes adotados.

Tabela 42 - Parâmetros florestais e técnicos para o cálculo do potencial de geração elétrica a partir dos resíduos da colheita.

Parâmetro	Valor	Unidade
Número de ciclos manejo	35	anos
Exploração máxima permitida (EMaxP)	0,86	m ³ /ha/ano
Rendimento resíduos serraria	100	%
Densidade básica (ρ)	0,80	t/m ³
PCI resíduo	5,12	MWh _{th} /t de biomassa
Eficiência conversão termelétrica Pequeno porte (η)	15	%
Eficiência conversão termelétrica Médio porte (η)	30	%
Fator de capacidade (FC)	7.008	horas/ano

Fonte: Elaboração própria baseado em dados de Brasil (2005, 2009b); Coelho *et al.* (2020); EPE (2018); Pereira *et al.* (2020); Sartori (2012).

O cálculo de geração de energia elétrica do resíduo do processamento mecânico da madeira em serrarias foi efetuado segundo a Equação 38.

$$E = [(AEM * EMaxP) * (\rho)] * (\%resíduos) * (PCIresíduos) * (\eta) \quad \text{Equação 38}$$

Onde:

E = Energia elétrica disponível (MWh)

AEM = Área de Efetivo manejo (ha)

$EMaxP$ = Exploração máxima permitida ($m^3/ha/ano$)

ρ = Densidade da madeira (t/m^3)

$\%resíduos$ = Pó de serra, maravalha, costaneiras, entre outros (%)

$PCIresíduos$ = Poder calorífico inferior do resíduo (MWh_{th}/t biomassa)

η = Eficiência de conversão termoelétrica (%)

A potência disponível foi calculada pela Equação 39.

$$P = \frac{E}{FC} \quad \text{Equação 39}$$

Onde:

P = Potência disponível (MW)

E = Energia elétrica disponível (MWh)

FC = Fator de capacidade (horas/ano)

6.3. RESULTADOS

O potencial proveniente da biomassa florestal contribui na renovabilidade da matriz energética nacional, com a consequente diminuição das emissões dos gases do efeito estufa, uma vez que, ocorrerá a substituição dos combustíveis fósseis usados na geração de energia nas localidades que não são ligadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Outra vantagem da diversificação das fontes na matriz é que ela aumenta a segurança no suprimento de energia, pois diminui a dependência de condições climáticas ou de preços internacionais de combustíveis.

Entretanto, o valor do resíduo de biomassa não é economicamente viável se transportado por longas distâncias. Isso implica que a central precisa ficar próxima da geração de resíduos e que sua potência deve ser compatível com o volume de resíduos disponíveis (GUERRA; NOGUEIRA, 2008).

6.3.1 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DE MADEIRA EM SERRARIAS

Foram identificadas as serrarias com certificação FSC localizadas nos municípios que integram os sistemas isolados e que apresentam potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos do processamento de madeira. Do potencial teórico, foram excluídos da

amostra os empreendimentos que já utilizam seus resíduos para a geração de energia termelétrica para autossuprimento e/ou injeção na rede local (serrarias localizadas nos municípios de Belém/PA e Itacoatiara/AM), além dos empreendimentos que utilizam matéria prima de origem tanto certificada, quanto não certificada.

Após análise do potencial do resíduo proveniente do processamento da madeira para cada município integrante do SISOL, obteve-se o potencial total da geração de energia elétrica e o potencial elétrico disponível resultante.

O potencial técnico para geração de energia elétrica foi estimado em função da disponibilidade de biomassa a ser utilizada, da tecnologia de conversão empregada e dos coeficientes técnicos dos equipamentos e do combustível a ser utilizado. O cálculo deste potencial resultou em um total de 133.930 MWh/ano.

Apenas os municípios de Itaituba/PA e Laranjal do Jari/AP apresentaram potenciais elétricos com capacidade instalada de médio porte, 10,23 MW e 4,73 MW, respectivamente. Os demais municípios (Itapiranga/AM, Mazagão/AM e Terra Santa/PA) apresentaram potenciais de pequeno porte, inferiores a 2 MW.

A Tabela 43 apresenta os resultados obtidos para as áreas de efetivo manejo (AEM), o volume de madeira em tora, o volume de resíduos gerados no processamento da madeira em serrarias, o potencial técnico da geração de energia elétrica, bem como a potência elétrica disponível para os municípios considerados neste estudo.

Tabela 43 - Resultados obtidos a partir dos resíduos do processamento de madeira em serrarias nos municípios integrantes dos sistemas isolados (excluindo Pernambuco).

Município	UF	AEM (ha)	Volume de madeira em tora (m³/ano)	Resíduo de serraria (t/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
Itaituba	PA	151.799,13	130.547	46.671	71.686	10,23
Itapiranga	AM	44.458,94	38.235	13.669	10.498	1,50
Laranjal do Jari	AP	70.139,34	60.320	21.564	33.123	4,73
Mazagão	AM	58.450,39	50.267	17.971	13.801	1,97
Terra Santa	PA	20.421,63	17.563	6.279	4.822	0,69
TOTAL		345.269,43	296.932	106.153	133.930	19,11

Fonte: Elaboração própria (2022).

Vale ressaltar que o presente estudo não considerou o potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos do processamento de madeira em serrarias para Itacoatiara, pois

o único empreendimento certificado pelo FSC no município é a Mil Madeiras Preciosas que fornece toda a biomassa residual para atender a UTE Itacoatiara, descrita no item 6.3.3.

6.3.2 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RESÍDUOS DE COLHEITA DO MANEJO FLORESTAL (GALHOS)

Foram identificadas áreas destinadas ao manejo florestal sustentado para uso múltiplo e detentoras de certificação de manejo florestal FSC. Assim como para o cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos do processamento de madeira em serrarias, foram excluídos da amostra os empreendimentos que já utilizam seus resíduos para a geração de energia termelétrica para autossuprimento e/ou injeção na rede local.

Após análise do potencial dos resíduos de colheita (galhos) deixados no campo para cada município integrante do SISOL, obteve-se o potencial total da geração de energia elétrica e a potência elétrica disponível resultante.

O potencial técnico para geração de energia elétrica foi estimado em função da disponibilidade de biomassa a ser utilizada, da tecnologia de conversão empregada e dos coeficientes técnicos dos equipamentos e do combustível a ser utilizado. O cálculo deste potencial resultou em um total de 600.812 MWh/ano.

A Tabela 44 apresenta os resultados obtidos para as áreas de efetivo manejo (AEM), o volume de madeira em tora, o volume de resíduos de colheita do manejo florestal (galhos), o potencial técnico da geração de energia elétrica, bem como a potência elétrica disponível para os municípios considerados neste estudo.

Tabela 44 - Resultados obtidos a partir dos resíduos de colheita do manejo florestal (galhos) nos municípios integrantes dos sistemas isolados (excluindo Pernambuco).

Município	UF	AEM (ha)	Madeira tora (t/ano)	Resíduo campo (t/ano)	Potencial de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Potência Elétrica Disponível (MW)
Almeirim	PA	131.609,02	73.569	73.569	113.003	16,12
Boca do Acre	AM	826,74	462	462	355	0,05
Faro	PA	56.437,93	31.549	31.549	48.459	6,91
Itacoatiara	AM	214.432,19	119.868	119.868	184.117	26,27
Itaituba	PA	151.799,13	84.856	84.856	130.338	18,60
Laranjal do Jari	AP	70.139,34	39.208	39.208	60.223	8,59
Mazagão	AM	58.450,39	32.674	32.674	50.187	7,16
Porto de Moz	PA	3.820,39	2.136	2.136	1.640	0,23
Prainha	PA	8.671,23	4.847	4.847	3.723	0,53
Terra Santa	PA	20.421,63	11.416	11.416	8.767	1,25
TOTAL		716.607,99	400.584	400.584	600.812	85,73

Os municípios de Itacoatiara/AM, Itaituba/PA, Almeirim/PA, Laranjal do Jari/AP, Mazagão/AM e Faro/PA apresentaram potenciais elétricos com capacidade instalada de médio porte, acima de 2 MW, enquanto Terra Santa/PA, Prainha/PA, Porto de Moz/PA e Boca do Acre/AM apresentaram potenciais de pequeno porte, inferiores a 2 MW.

Neste item considerou-se o município de Itacoatiara, uma vez que os resíduos da exploração florestal (galhos) são deixados em campo possibilitando seu aproveitamento energético.

6.3.3 O CASO DO MUNICÍPIO DE ITACOATIARA – AM

O município de Itacoatiara está localizado na Região Metropolitana de Manaus, no estado do Amazonas e tem sua geração de energia elétrica parcialmente suprida por uma UTE a resíduos de madeira da empresa Mil Madeiras Preciosas, filial do grupo suíço *Precious Woods*, e é operada pela BK Energia Itacoatiara Ltda.

A Mil Madeiras Preciosas é detentora de um Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) com mais de 278.000 ha de área certificada, distribuídas pelos municípios amazonenses de Itacoatiara, Silves e Itapiranga. Em 1997, tornou-se a primeira empresa na Amazônia a receber a certificação FSC para manejo florestal ambiental e socialmente responsável (Dados de Certificação FSC - FOREST STEWARDSHIP COUNCIL, 2022). Entretanto, os resíduos gerados em seu processo produtivo eram armazenados em seus pátios, entrando em decomposição com consequente emissão de gás metano, um passivo ambiental que foi solucionado com a entrada em operação da termelétrica Itacoatiara (SILVA, 2011).

O projeto “BK Energia Itacoatiara” gera 9 MW de eletricidade através de uma usina termelétrica que utiliza em torno de 100.000 t/ano de resíduos do processo de desdobro de madeira certificada pelo FSC em substituição aos geradores a diesel, usuais na região, com quantidade estimada de reduções médias anuais de emissões de GEE na ordem de 47.029 tCO₂ contribuindo para a sustentabilidade local e regional (UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, 2019).

A planta de cogeração possui uma caldeira de alta pressão e temperatura (42 bar - 420°C), e uma turbina de múltiplos estágios de vapor de condensação acoplada a um gerador elétrico de 9 MW e quando entrou em operação, em 2002, atendia cerca de 70% da demanda

energética da cidade, entretanto, atualmente, atende apenas 30% da carga (SANTOS *et al.*, 2021).

Santos; Braga (2021) afirmam que este projeto é ideal em termos de aplicação de resíduos lenhosos na região amazônica tendo em vista os problemas sazonais de disponibilidade de combustível e a dificuldade em celebrar contratos de longo prazo para o fornecimento da biomassa. Mas, apesar do êxito nos quase 20 anos de operação, o modelo nunca foi replicado na região, nem tampouco teve sua capacidade instalada ajustada às novas necessidades locais e inferem que o uso de biomassa como produção de energia para as comunidades isoladas do SISOL necessita de uma conjunção de fatores para apresentar viabilidade de utilização.

6.4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, Daniela Higgin. **Potencial de uso da biomassa florestal na geração de energia térmica e elétrica pela indústria do estado do Rio de Janeiro**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019. Disponível em: <https://locus.ufv.br//handle/123456789/27845>. Acesso em: 20 maio 2022.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Matriz por origem de combustível**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiNjc4OGYyYjQtYWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 18 jul. 2022.

ARRUDA, Mateus Zart De. **Análise de combustíveis de caldeiras**. 2009. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2009. Disponível em: <http://usuarios.upf.br/~engeamb/TCCs/2009-2/MATEUS ZART DE ARRUDA.pdf>. Acesso em: 20 maio 2022.

BASSO, Vanessa Maria *et al.* Avaliação da influência da certificação florestal no cumprimento da legislação ambiental em plantações florestais. **Revista Arvore**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 835–844, 2011.

BRAND, Martha Andreia. **Energia de Biomassa Florestal**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Interciência, 2010. ISSN 0100-6762.

BRASIL. **Decreto Federal nº 5.975**. Regulamenta os arts. 12, parte final, 15, 16, 19, 20 e 21 da Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965, o art. 4º, inciso III, da Lei no 6.938, de 31 de agosto de 1981, o art. 2º da Lei no 10.650, de 16 de abril de 2003, altera e acrescenta dispositivos aos Decretos nos 3.179, de 21 de setembro de 1999, e 3.420, de 20 de abril de 2000, e dá outras providências. Brasília, DF, 2006. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/decreto/d5975.htm. Acesso em: 24 maio 2022.

BRASIL. **Instrução Normativa MMA nº 1.** Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável - PMFS da Caatinga e suas formações sucessoras, e dá outras providências. Brasília, DF, 2009. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=78154>. Acesso em: 24 maio 2022.

BRASIL. **Instrução Normativa MMA nº 4.** Dispõe sobre a Autorização Prévia à Análise Técnica de Plano de Manejo Florestal Sustentável-APAT, e dá outras providências. Brasília, DF, 2006. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=76721>. Acesso em: 24 maio 2022.

BRASIL. **Instrução Normativa MMA nº 5.** Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável-PMFS nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia Legal, e dá outras providências. Brasília, DF, 11 dez. 2005. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/IN0005-111206.PDF>. Acesso em: 24 maio 2022.

BRASIL. **Lei Complementar nº 140.** Fixa normas, nos termos dos incisos III, VI e VII do caput e do parágrafo único do art. 23 da Constituição Federal, para a cooperação entre a União, os Estados, o Distrito Federal e os Municípios nas ações administrativas decorrentes do exercício da competência comum relativas à proteção das paisagens naturais notáveis, à proteção do meio ambiente, ao combate à poluição em qualquer de suas formas e à preservação das florestas, da fauna e da flora; e altera a Lei no 6.938, de 31 de agosto de 1981. Brasília, DF, 2011. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp140.htm. Acesso em: 24 maio 2022.

BRASIL. **Lei Federal nº 11.284.** Dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável; institui, na estrutura do Ministério do Meio Ambiente, o Serviço Florestal Brasileiro - SFB; cria o Fundo Nacional de Desenvolvimento Florestal - FNDF; altera as Leis nºs 10.683, de 28 de maio de 2003, 5.868, de 12 de dezembro de 1972, 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, 4.771, de 15 de setembro de 1965, 6.938, de 31 de agosto de 1981, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973; e dá outras providências. Brasília, DF, 2006. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2006/lei/l11284.htm. Acesso em: 24 maio 2022.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.305.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 2 fev. 2022.

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

BRASIL. **Lei Federal nº 4.771**. Institui o novo Código Florestal. Brasília, DF, 1965. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l4771.htm. Acesso em: 24 maio 2022.

BRASIL. **Lei Federal nº 9.985**. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília, DF, 2000. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9985.htm. Acesso em: 24 maio 2022.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 406**. Estabelece parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de Plano de Manejo Florestal Sustentável PMFS com fins madeireiros, para florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma Amazônia. Brasília, DF, 6 fev. 2009. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=578. Acesso em: 24 maio 2022.

BRITO, J O; BARRICHELO, L E G. Usos Diretos e Propriedades Da Madeira Para Geração De Energia. **IPEF - Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, [s. l.], v. 52, n. 1, p. 7, 1979. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/3597>.

CARNEIRO, Francimary da Silva *et al.* **Densidade da Madeira de Espécies Florestais de Quatro Áreas Experimentais da Amazônia Oriental Brasileira**. Ponta Grossa: Atena Editora, 2020. *E-book*. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/post-ebook/3149>.

COELHO, Suani Teixeira *et al.* **Atlas de bioenergia do Estado de São Paulo**. São Paulo: [s. n.], 2020.

DULYS-NUSBAUM, Elena; KLAMMER, Sarah S.H.; SWINTON, Scott M. How willing are different types of landowner to supply hardwood timber residues for bioenergy?. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 122, n. July 2018, p. 45–52, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.026>.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota Técnica EPE 17/18 Potencial Energético de Resíduos Florestais do Manejo Sustentável e de Resíduos da Industrialização da Madeira**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2018.

FAGUNDES, Hilton Albano Vieira. **Produção de madeira serrada e geração de resíduos do processamento de madeira de florestas plantadas no Rio Grande do Sul**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/4567/000412901.pdf?sequence=1>.

FSC - FOREST STEWARDSHIP COUNCIL. **Dados de Certificação**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://fsc.org/es/busqueda-publica-de-fsc>. Acesso em: 20 maio 2022.

FSC - FOREST STEWARDSHIP COUNCIL. **Tipos de Certificação**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://br.fsc.org/br-pt/certificacao/tipos-de-certificacao>. Acesso em: 1 ago. 2022.

FURTADO, Thielly Schmidt *et al.* Correlação entre teor de umidade e eficiência energética de resíduos de *Pinus taeda* em diferentes idades. **Revista Árvore**, [s. l.], v. 36, n. 3, p. 577–582,

GUARDABASSI, Patrícia Maria. **Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia perspectivas para países em desenvolvimento**. 2006. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006. Disponível em: [http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2006/Teses/Dissertacao_Guardabassi.pdf%5Cn\(In:%5Cn02.02.10\)](http://www.iee.usp.br/biblioteca/producao/2006/Teses/Dissertacao_Guardabassi.pdf%5Cn(In:%5Cn02.02.10)).

GUERRA, Danielle Regina da Silva; NOGUEIRA, Manoel Fernandes Martins. Caracterização da geração de energia elétrica na Amazônia. *In*: NOGUEIRA, Manoel Fernandes Martins (org.). **Combustão e gasificação de biomassa sólida. Soluções energéticas para a Amazônia**. 1ªed. Brasília - DF: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 19–28.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório anual IBÁ 2021**. São Paulo, SP: [s. n.], 2022. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>.

IMAFLOA. **Relatório anual 2021**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: chrome-extension://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.imaflora.org/public/media/biblioteca/relatorio_anual_imaflora_2021.pdf

JÚNIOR, L. Scanavaca; GARCIA, J. N. Densidade básica da madeira de eucalipto. *In* SIMPÓSIO CIENTÍFICO DOS PÓS-GRADUANDOS DO CENA, 10., 2017, Piracicaba. **Anais [...]** Piracicaba, SP: CENA/USP, 2017. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1087466>.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; LORA, Electo Eduardo Silva. Processos básicos da conversão dendroenergética. *In*: NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; LORA, Electo Eduardo Silva. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. cap. 4, p. 49-66. ISBN 85-7193-077-5.

NOVAIS, Thais de Nazaré Oliveira. **Densidade da madeira: uma variável fundamental na determinação de uso e estimativa do estoque de biomassa florestal**. 2022. 53 f. - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/38671>.

PEREIRA, Alessandra Alves *et al.* Agrupamento de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável visando à geração de bioenergia. **Scientia Forestalis**, [s. l.], v. 48, n. 127, p. 1–14, 2020.

PUROHIT, A. N.; NAUTIYAL, A. R. Fuelwood value index of indian mountain tree species. **International Tree Crops Journal**, [s. l.], v. 4, n. 2–3, p. 177–182, 1987.

RIBEIRO, Ana Carolina Farias; FONSECA, Luciana Costa da; PEREIRA, Carla Maria Peixoto. O plano de manejo florestal como instrumento de desenvolvimento sustentável na Amazônia. **Direito e Desenvolvimento**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 264–276, 2020.

SACHS, Ignacy. **Caminhos para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: Garamond,

SANQUETTA, Carlos Roberto; MILDEMBERG, Celine; DIAS, Leticia Maria Sella Marques. Números atuais da certificação florestal no Brasil. **BIOFIX Scientific Journal**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 1, 2022.

SANTOS, Daniel Odilio dos *et al.* Insumos técnicos para aprimorar o conceito transição energética da Amazônia. *In: MODELO DE GOVERNANÇA E MODELOS ALTERNATIVOS DE LEILÕES OU CONTRATAÇÕES QUE INCENTIVAM INVESTIMENTOS EM FRE.* [S. l.: s. n.], 2021. p. 13.

SANTOS, Daniel Odilio dos; BRAGA, Marília. Avaliação de fatores críticos na integração de fontes intermitentes de energia em sistemas isolados. *In: CONSULTORIA PARA IDENTIFICAÇÃO MODELOS TÉCNICOS E ECONÔMICOS DE INTEGRAÇÃO RENOVÁVEL EM SISTEMAS ISOLADOS.* [S. l.: s. n.], 2021. p. 84.

SARTORI, Roberto Scorsatto. **Avaliação econômica de uma operação de impacto reduzido em uma propriedade privada no estado amazônico de Rondônia.** 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências em Recursos Florestais) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-15052012-092443/>.

SILVA, José Lázaro Pinheiro da. **Aproveitamento de resíduos da indústria madeireira para geração de energia elétrica – o caso da empresa B. K. Energia Itacoatiara Ltda no estado do Amazonas.** 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão da Indústria Madeireira e Moveleira) – Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1884/32733>.

SOARES, Jéssica Machado. **Avaliação da qualidade de três diferentes tipos de cavacos de madeira do híbrido *Eucalyptus urophila* x *grandis*.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1884/44937>.

STRAGLIOTTO, Michelly Casagrande; PEREIRA, Bárbara Luísa Corradi; OLIVEIRA, Aylson Costa. Indústrias madeireiras e rendimento em madeira serrada na Amazônia brasileira. *In: ENGENHARIA FLORESTAL: DESAFIOS, LIMITES E POTENCIALIDADE.* [S. l.]: Editora Científica Digital, 2020. p. 499–518. *E-book*. Disponível em: <http://www.editoracientifica.org/articles/code/200801030>.

TIMBER QUEENSLAND. **Moisture in timber.** Technical data sheet. Queensland: [s. n.], 2014. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/http://www.dtm timber.com.au/downloads/TQ_TDS/tds_28_Moisture-in-Timber_final.pdf.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear.** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **CDM-PDD-FORM Project design document form (Version 10.1).** [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em:

<https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/TUEV-SUED1134136803.71/view?cp=1>.

VALDIONES, Ana Paula *et al.* **A Evolução do Setor Madeireiro na Amazônia entre 1980 e 2020 e as oportunidades para o seu desenvolvimento inclusivo e sustentável na próxima década.** Belém, PA: Imazon; Imaflora; ICV; IDESAM, 2020.

VIDAL, André Carvalho Foster; DA HORA, André Barros. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **Papel e Celulose**, [s. l.], n. 33, p. 261–314, 2011. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2523>.

VITAL, Benedito Rocha; CARNEIRO, Angélica de Cássia Oliveira; PEREIRA, Bárbara Luisa Corradi. Qualidade da madeira para fins energéticos. *In*: SANTOS, Fernando; COLODETTE, Jorge; QUEIROZ, José Humberto de (org.). **Bioenergia e Biorrefinaria: cana de açúcar e espécies florestais**. 1. ed. Viçosa: [s. n.], 2013. cap. 12, p. 321–354.

WALTER, Arnaldo; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. Sistemas de produção de eletricidade a partir da biomassa. *In*: COTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares (org.). **Biomassa para energia**. 1. ed. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2008. cap. 17, p. 573–605.

WWF BRASIL. **O que é certificação florestal?**. [S. l.], 2022. Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/questoes_ambientais/certificacao_florestal/. Acesso em: 1 ago. 2022.

7. ESTIMATIVAS DE CUSTOS DOS PROCESSOS DE CONVERSÃO

Este item apresenta as estimativas de custos de projetos com processos de conversão das biomassas analisados neste estudo. Ressalta-se que os dados apresentados foram obtidos junto aos fabricantes e fornecedores de equipamentos, bem como retirados do Caderno de Preços da Geração, publicado pela EPE (2021).

7.1. GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os custos de investimentos para as plantas de geração de energia elétrica a partir da gaseificação de RSU, em uma estimativa preliminar e sem considerar as características do local de instalação, dentre outras especificidades, são apresentados na Tabela 45.

Tabela 45 - Custos de investimentos para plantas de geração de energia elétrica a partir da gaseificação de RSU, incluindo a produção de CDR.

Capacidade da usina (Gcal/h)	Destinação de resíduos estimada (t/dia)	Quantidade de funcionários*	Estimativa de investimento (planta de CDR) (R\$)
5	75	44	16.500.000,00
10	100	44	24.000.000,00
20	300	46	37.500.000,00

Capacidade da usina (Gcal/h)	Geração de energia elétrica (MWh)	Estimativa de investimento (gaseificação + geração) (R\$)	Estimativa de investimento (total) (R\$)
5	1,50	38.500.000,00	55.000.000,00
10	3,00	56.000.000,00	80.000.000,00
20	6,00	87.500.000,00	125.000.000,00

*Para todos os turnos.

Fonte: Carbogás Energia³³ (2022).

De acordo com os dados apresentados na Tabela 45, é possível observar que a quantidade mínima de resíduo requerida para o processo de gaseificação é de 75 t/dia³⁴, o equivalente a 27.375 t/ano de resíduo. Isso significa que de todos os municípios analisados neste estudo, que possuem sistemas isolados, apenas quatro se enquadram nesses requisitos. São eles: (i) Macapá, com 44.079 t/ano; Boa Vista, com 45.901 t/ano; Porto Velho, com 63.030 t/ano e Belém, com 233.397 t/ano. Vale lembrar que esta quantidade de resíduo foi calculada

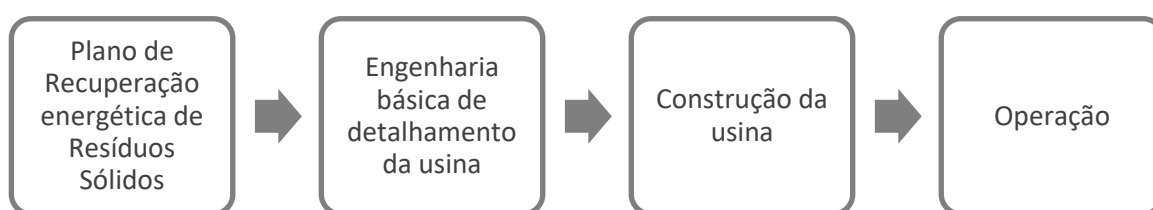
³³ Informações pessoais recebidas da empresa Carbogás Energia em julho de 2022.

³⁴ De acordo com a empresa Carbogás Energia, para analisar a viabilidade de sistemas de gaseificação para quantidade de resíduo inferior a 75 t/dia, é necessário realizar estudos prévios.

com base na população total de cada um dos municípios analisados, e não na população existente em cada sistema isolado.

Para a concretização da valorização energética dos resíduos urbanos em determinado empreendimento, deve ser elaborado um plano conceitual das tecnologias de tratamento e disposição final dos RSU com vistas à geração de energia térmica ou elétrica. Conforme a empresa Carbogás Energia, estudos devem ser feitos para cada empreendimento, caso a caso. Entretanto, um projeto de aproveitamento energético de RSU a partir de gaseificação usualmente é concebido em 4 fases, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Fases para a implementação de uma planta de aproveitamento energético de RSU por gaseificação.



Fonte: Carbogás Energia (2022).

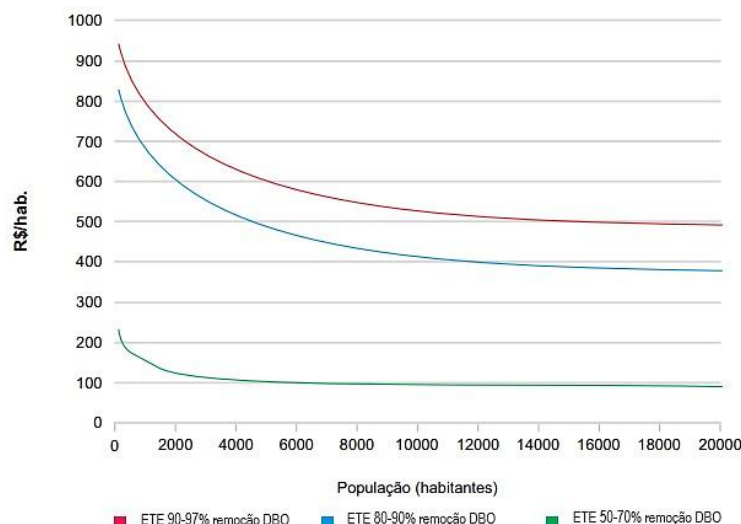
7.2. BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Os custos envolvidos na implementação de sistema de biodigestão anaeróbia de efluentes líquidos dependem de uma série de variáveis, tais como quantidade de efluente a ser tratado e suas características (carga orgânica presente no efluente, temperatura do efluente, nível de compostos que provocam toxicidade, entre outras), além da tecnologia a ser utilizada³⁵.

Coelho *et al.* (2018) apresentam os custos estimados para sistema de tratamento anaeróbio de esgoto sanitário em Estação de Tratamento de Efluente (ETE). De maneira geral, esses custos são estimados em função do número de habitantes, conforme apresentado no Gráfico 4.

³⁵ Os custos apresentados referem-se aos biodigestores UASB e lagoas anaeróbias e foram fornecidos pela empresa Nova Era Ambiental (<http://www.novaeraambiental.com.br/>). Esses custos constam no livro publicado por Coelho *et al.* (2018).

Gráfico 4 - Custos estimados de tratamento anaeróbico de esgoto doméstico em ETE por número de habitantes.



Fonte: Coelho *et al.* (2018).

Os custos apresentados no

Gráfico 4 referem-se a biodigestores anaeróbios modelo RAFA (Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente, cuja sigla em inglês é UASB - *Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*) fabricados em PRFV (Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro). Os custos foram divididos por faixa de remoção de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) em função do número de habitantes, conforme segue (Coelho *et al.*, 2018):

- 50 a 70% de remoção da DBO: Curva de custo onde o processo de tratamento é composto por pré-tratamento, biodigestor anaeróbico modelo RAFA e um sistema de filtro de biogás.
- 80 a 90% de remoção da DBO: Curva de custo onde o processo de tratamento é do tipo secundário, composto por pré-tratamento, biodigestor anaeróbico modelo RAFA, filtro de biogás, tanque de aeração, decantador secundário e sistema de desinfecção por cloração.
- 90 a 97% de remoção da DBO: Curva de custo onde o processo de tratamento é do tipo terciário, composto por pré-tratamento, biodigestor anaeróbico modelo RAFA, filtro de biogás, tanque anóxico, tanque de aeração, decantador secundário, sistema de desinfecção por cloração e reaeração final.

Além do tratamento de esgoto sanitário, os biodigestores anaeróbios modelo RAFA são empregados também no tratamento da fração orgânica dos RSU, bem como no tratamento

de efluentes industriais dos segmentos de Refrigerantes, Cervejaria, Alimentício, Laticínios e muitos outros. Nestes casos, os custos de investimento dos biodigestores sofrem uma grande variação em função de diversas variáveis, tais como materiais de construção (concreto, metais como aço carbono revestido, aço inox, entre outros).

Em relação ao sistema de biodigestão anaeróbia dos dejetos animais, o tipo de biodigestor mais utilizado é o modelo LAFA (Lagoa Anaeróbia de Fluxo Ascendente), também denominado biodigestor rural. De acordo com Coelho *et al.* (2018), neste caso, o custo de investimento é bem menor quando comparado com reatores empregados para tratamento de efluentes industriais ou mesmo para esgoto doméstico, tendo em vista o custo de carga aplicada em kg de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) por m³ de reator por dia. Entretanto, os custos envolvidos também dependem de diversas variáveis, como mencionado acima. Estima-se que o investimento para biodigestores modelo LAFA seja na faixa de R\$ 400 a R\$ 1.000 por m³ de efluente tratado, considerando neste custo a cobertura do biodigestor para a retenção de biogás (gasômetro).

É importante destacar que o esgoto sanitário também pode ser tratado em lagoas anaeróbias e segue a mesma faixa de custo apresentada acima (R\$ 400,00 a 1.000,00 por m³ de efluente). Ressalta-se que os valores apresentados foram fornecidos pela empresa Nova Era Ambiental (<http://www.novaeraambiental.com.br/>) e constam no livro publicado por Coelho *et al.* (2018).

7.3. CONVERSÃO ENERGÉTICA DO BIOGÁS

Dentre as tecnologias disponíveis e mais utilizadas para o aproveitamento energético do biogás, destacam-se os motores ciclo Otto e as microturbinas a gás. Porém, o biogás também pode ser utilizado para a geração de energia térmica por meio da sua queima direta em caldeiras, por exemplo.

As Tabela 46, Tabela 47 e Tabela 48 apresentam estimativas para investimentos em sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás utilizando motores ciclo Otto (Coelho *et al.*, 2018).

Tabela 46 - Investimentos em serviços e tecnologias para geração distribuída de energia, em Reais.

Painel para Proteção da Conexão da Energia GD	Custo do Projeto	
	(R\$)	(R\$)

Painel – Proteção GD – Até 20 kW (30 kVA)	38.700,00	10.000,00
Painel – Proteção GD – Até 32 kW (50 kVA)	42.700,00	10.000,00
Painel – Proteção GD – Até 55 kW (80 kVA)	45.780,00	15.000,00
Painel – Proteção GD – Até 75 kW (120 kVA)	53.700,00	15.000,00
Painel – Proteção GD – Até 300 kW (420 kVA)	63.700,00	25.000,00
Painel – Proteção GD – Até 500 kW (geradores em paralelo)	95.970,00	35.000,00

*Geração Distribuída.

Fonte: Coelho *et al.* (2018).

Tabela 47 - Investimentos em Grupos Geradores com Painel Manual, em Reais.

Grupos Geradores		Filtro H ₂ S – 1500 ppm		Start Up	Total	Custo GD*
		(R\$)		(R\$)	(R\$)	
Grupos Geradores com Painel Manual – Operação em Barra Aberta (somente cargas instaladas)						
20 kW (30 kVA)	86.907,00	Master 50	13.700,00	8.700,00	109.307,00	Não
32 kW (50 kVA)	89.517,00	Master 50	13.700,00	8.700,00	111.917,00	Não
55 kW (80 kVA)	120.467,00	Master 100	23.700,00	8.700,00	152.867,00	Não
75 kW (120 kVA)	143.237,00	Master 100	23.700,00	10.700,00	177.637,00	Não

*Geração Distribuída.

Fonte: Coelho *et al.* (2018).

Tabela 48 - Investimentos em Grupos Geradores com Painel Automático + GD*, em Reais.

Grupos Geradores		Filtro H ₂ S – 1500 ppm		Start Up	Total	Custo GD*	Valor Total GD*
		(R\$)		(R\$)	(R\$)	(R\$)	(R\$)
Grupos Geradores com Painel Automático e Painel de Proteção para GD* (exportação de energia)							
20 kW (30 kVA)	116.527,00	Master 50	13.700,00	8.700,00	138.927,00	48.700,00	187.627,00
32 kW (50 kVA)	119.517,00	Master 50	13.700,00	8.700,00	141.917,00	48.700,00	190.617,00
55 kW (80 kVA)	142.997,00	Master 100	23.700,00	8.700,00	175.397,00	53.700,00	229.097,00
75 kW (120 kVA)	165.527,00	Master 100	23.700,00	10.700,00	199.927,00	53.700,00	253.627,00
211 kW (330 kVA)	425.757,00	Master 200	27.700,00	12.700,00	466.157,00	88.700,00	554.857,00
260 kW (420 kVA)	537.700,00	Master 200	27.700,00	12.700,00	578.100,00	88.700,00	666.800,00

*Geração Distribuída.

Fonte: Coelho *et al.* (2018).

Os custos apresentados na Tabela 49 contemplam uma média dos custos operacionais incluindo a manutenção programada que deve ocorrer a partir de 24.000 horas de operação (Coelho *et al.*, 2018).

Tabela 49 - Média dos custos com manutenção, em Reais.

Grupos Geradores	Custo Hora* (R\$)
20 kW (30 kVA)	R\$ 1,74
32 kW (50 kVA)	R\$ 1,88
55 kW (80 kVA)	R\$ 2,22
75 kW (120 kVA)	R\$ 3,32
211 kW (330 kVA)	R\$ 9,29
260 kW (420 kVA)	R\$ 9,29

*Custos de peças originais com 20% de mão-de-obra.

Fonte: Coelho *et al.* (2018).

A Tabela 50 apresenta os custos envolvidos no aproveitamento energético do biogás por meio de microturbina. Os custos apresentados variam de acordo com as potências disponíveis comercialmente e podem variar conforme requisitos do sistema, composição e características do biogás, local de instalação, dentre outros (Coelho *et al.*, 2018).

Tabela 50 - Custos das microturbinas de acordo com as potências disponíveis comercialmente, em Dólares americanos.

Modelo Microturbina	Valor* (US\$)
C30 – 30 kW	98.000,00
C65 – 65 kW	150.000,00
C200S – 200 kW	350.000,00
C600S – 600 kW	850.000,00
C800S – 800 kW	1.050.000,00
C1000S – 1000 kW	1.275.000,00

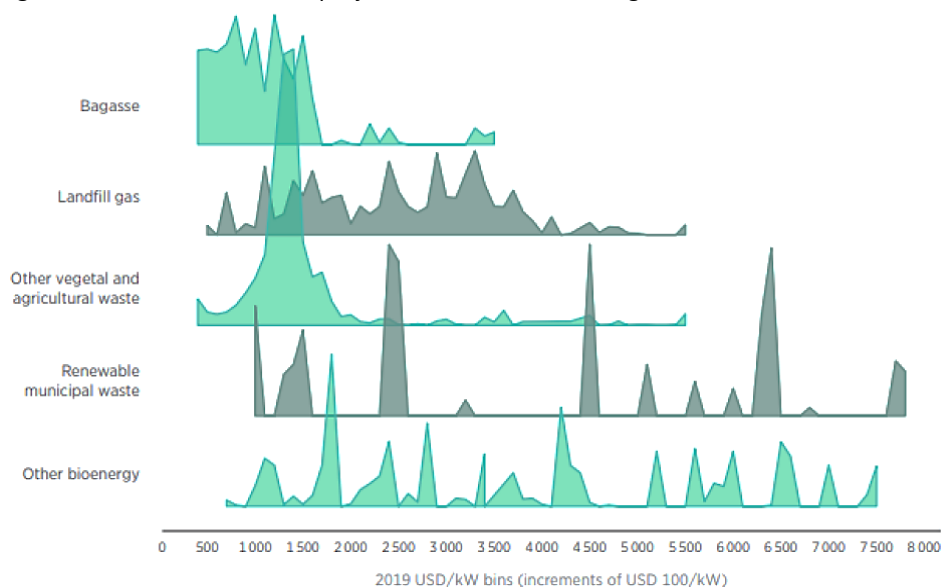
*Por serem equipamentos importados os custos são apresentados em dólares. Os valores já incluem o compressor. Os valores não incluem frete, impostos, instalação, e sistema de purificação do biogás para adequá-lo às necessidades das microturbinas. Esses valores não inclusos variam caso a caso e dependem das necessidades de cada projeto.

Fonte: Coelho *et al.* (2018).

De maneira geral, a publicação Caderno de Preços da Geração 2021, publicado pela EPE (EPE, 2021), apresenta os resultados do trabalho desenvolvido pelo *International Renewable Energy Agency* (IRENA) referentes aos custos totais médios de projetos internacionais a biogás e resíduos sólidos urbanos, conforme

Figura 7.

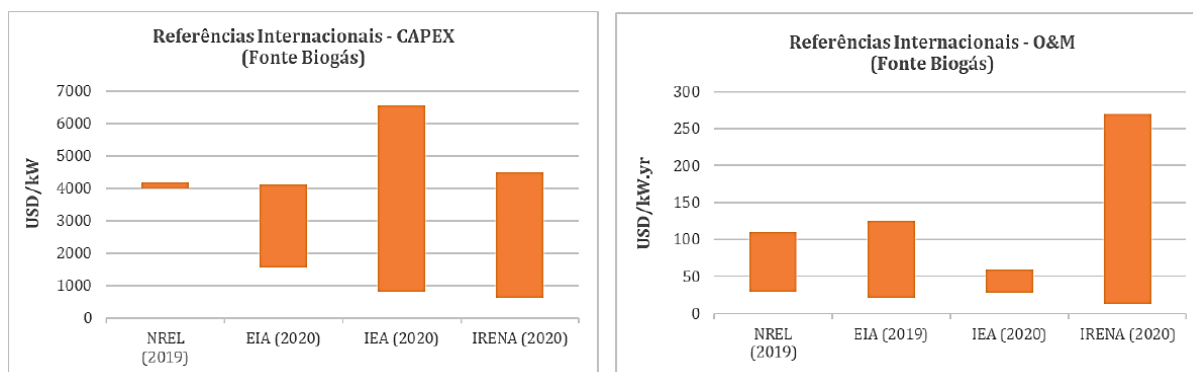
Figura 7 - Faixas de custos de projetos internacionais a biogás e resíduos sólidos urbanos.



Fonte: EPE (2021).

O estudo ainda apresenta a consolidação das referências de CAPEX e O&M (Figura 8) para usinas termelétricas a biogás, incluindo biodigestores, motores de combustão interna, incineração de resíduos sólidos urbanos, captação de gases de aterro e outros. Sobre os custos de O&M, observa-se que eles também podem variar de acordo com os tipos de tecnologias empregadas nas usinas.

Figura 8 - Valores internacionais de CAPEX e O&M de projetos a biogás e RSU.



Fonte: EPE, 2021.

7.4. CICLO RANKINE (CICLO A VAPOR)

Os custos de investimentos para as plantas de geração de energia elétrica em ciclos a vapor à base de biomassa de madeira são, em uma estimativa preliminar e sem considerar as características do local de instalação, do combustível, dentre outras, os montantes descritos na

Tabela 51.

Tabela 51 - Estimativa de custo de implantação de plantas de geração de energia elétrica à biomassa de madeira, em Reais.

Geração	Valor (R\$)
300 kW	6.700.000,00
600 kW	7.500.000,00
1.000 kW	9.900.000,00

Fonte: Elaboração própria baseado em dados fornecidos pela WEG³⁶ (2022).

As plantas contam com os seguintes equipamentos: caldeira de 21 bar - 290°C, incluído sistema de alimentação de combustível (sem montagem e transporte); turbogerador com turbina (gerador, painéis, sistema de óleo, condensador atmosférico com bombas e torre de resfriamento com bombas) e engenharia de interligação vapor e água. O sistema opera com dois operadores por turno.

7.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COELHO, Suani Teixeira (Coord.); GARCILASSO, Vanessa Pecora, FERRAZ JUNIOR, Antônio Djalma Nunes; SANTOS, Marilin Mariano dos; JOPPERT, Caio Luca. **Tecnologias de Produção e Uso de Biogás e Biometano**. São Paulo: IEE-USP, 2018. ISBN: 978-85-86923-53-1. Disponível em: <http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/?q=pt-br/noticia/e-book-tecnologias-de-produ%C3%A7%C3%A3o-e-uso-de-biog%C3%A1s-e-biometano>.

IRENA - INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. **Renewable Power Generation Costs in 2019**. Abu Dhabi, 2020. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2019>

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Caderno de Preços da Geração 2021**. Nº EPE-DEE-RE-089/2021-r0. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/caderno-de-precos-da-geracao>.

³⁶ Informações pessoais recebidas da empresa WEG em julho de 2022.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1. POTENCIAL DE ATENDIMENTO DOS MUNICÍPIOS ISOLADOS COM BIOMASSA

Tendo-se o levantamento do potencial energético a partir dos resíduos de biomassa, cabe avaliar o que essa fonte pode representar no atendimento dos municípios isolados.

A partir de dados publicados pela EPE do planejamento da demanda para as localidades isoladas no horizonte 2022-2026³⁷, foi selecionado o ano de 2023 para comparar com o potencial de aproveitamento energético da biomassa. Com isso, é possível ter uma estimativa da penetração energética possível de se efetuar com a biomassa em cada município.

Optou-se por utilizar, a princípio, o potencial total de aproveitamento da biomassa, incluindo todas as matérias-primas avaliadas (resíduos urbanos, esgoto, resíduos animais, resíduos agrícolas, resíduos de serrarias e resíduos de manejo florestal). Este potencial foi calculado em termos de energia anual e de potência média. No caso da energia, para cada município com correspondência nas localidades isoladas da EPE, comparou-se aos dados de carga (em MWh). Por sua vez, os resultados de potência foram comparados aos dados de demanda (em MW).

O cálculo de potencial energético a partir da biomassa se baseou em informações do IBGE, que apresenta dados referentes à população e aos cultivos agrícolas no nível municipal. No entanto, os dados de carga e demanda dos sistemas isolados estão desagregados por localidade³⁸.

Com o objetivo de associar cada localidade ao município a que pertence, foi realizado um levantamento prévio e, como resultado, foi possível identificar todos os municípios que têm localidades isoladas. A partir desta informação, foram calculados os potenciais energéticos a partir da biomassa em todos esses municípios.

Para a carga/demanda, também foram utilizados os valores por município. Ou seja, somou-se as cargas/demandas das localidades, alocando-as para os municípios correspondentes. Assim, para o cálculo do potencial de atendimento, em %, foi calculada a razão entre o potencial energético para o município e a carga (ou a demanda) do município.

³⁷ Planejamento do Atendimento aos Sistemas Isolados Horizonte 2022/2026 – Ciclo 2021. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-652/EPE-NT-Planejamento%20SI-Ciclo_2021_r2.pdf.

Em outras palavras, para cada município, dividiu-se o potencial de biomassa pela soma das cargas das localidades isoladas presentes nesse município.

Pode-se resumir o cálculo do potencial do atendimento a partir da energia da biomassa (bioenergia) de acordo com a Equação 40.

$$\text{Potencial de atendimento (\%)} = \frac{\text{Potencial nos municípios com localidades isoladas}}{\text{Carga das localidades isoladas presentes no município}} \quad \text{Equação 40}$$

Devido ao que foi explicado anteriormente, é possível que haja municípios cuja área urbana (ou outra parcela) esteja interligada ao SIN, mas que tenha, dentro de seus limites geográficos, localidades isoladas. Esses municípios tiveram o potencial de biomassa calculado e considerado para atendimento às localidades isoladas, ainda que exista um desafio logístico. A carga a ser atendida, no entanto, é apenas referente àquela das localidades isoladas de cada município.

Considerando o caso de Belém/PA, por exemplo. A localidade de Cotijuba, no Pará, teve sua área identificada como pertencente ao município de Belém. Assim, o potencial do município foi calculado, e comparado com a carga da localidade. Da mesma forma, Macapá/AP tem as seguintes localidades em seu território: Franco Grande, Freguesia do Bailique, Jangadinha do Curuá, Limão do Curuá I, Livramento, Maranata, e Ponta da Esperança.

É importante ressaltar que o potencial total de geração de energia elétrica (MWh/ano) apresentado na Tabela 52, bem como a potência elétrica total disponível (MW) apresentada na Tabela 53, foram estimados a partir de dados secundários de cada município que contém localidades integrantes dos sistemas isolados. Entretanto, a carga (MWh) e a demanda (MW) apresentadas nas Tabela 52 e Tabela 53, respectivamente, referem-se apenas aos dados secundários dos sistemas isolados de acordo com o Planejamento do atendimento aos sistemas isolados horizonte 2022/2026 - ciclo 2021. Salienta-se que um único município pode conter mais de um sistema isolado, conforme apresentado na Tabela 54 do Anexo I. Estudos adicionais com levantamento de dados específicos e locais serão necessários para verificar se esse potencial excedente com relação a demanda pode ser utilizado na sede do município e/ou injetado no sistema interligado.

Ressalta-se que a metodologia e os resultados apresentados neste estudo referem-se às estimativas de potencial técnico de geração de energia elétrica para cada biomassa analisada e não a estudos de caso específicos. Para maiores detalhes seriam necessárias visitas de

campo, que não foram realizadas pela equipe do projeto. Portanto, para o cálculo dos potenciais foi necessário adotar diversas premissas, conforme descrito em cada metodologia, uma vez que boa parte das informações necessárias não estão disponíveis ou não existem.

Para apresentação neste relatório, foram selecionados os municípios nos quais a biomassa tem potencial de atendimento da totalidade da energia elétrica, ou seja, aqueles que apresentam uma relação entre o potencial da biomassa e a carga/demanda maior que 100%. Para cada município, indicou-se qual a matéria-prima (biomassa residual) que mais contribui para o potencial. Os resultados estão apresentados na Tabela 52 e Tabela 53, em ordem decrescente de potencial de atendimento.

Tabela 52 - Potencial de atendimento com biomassa, considerando a relação potencial/carga, para cada município dos sistemas isolados cujo potencial de biomassa supera 100% da carga.

UF	Município	Potencial Total de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Carga (2023) (MWh)	Potencial de atendimento (%)	Principal matéria- prima
RO	São Francisco do Guaporé	74.221	228	32.553%	Resíduos Animais
RO	Chupinguaia	166.159	2.300	7.224%	Resíduos Agrícolas
AP	Laranjal do Jari	101.220	1.566	6.464%	Resíduos Manejo
PA	Belém	282.230	4.786	5.897%	RSU - Gaseificação
RO	Porto Velho	447.123	7.594	5.888%	Resíduos Agrícolas
RO	Alta Floresta D'Oeste	94.272	2.303	4.093%	Resíduos Animais
PA	Itaituba	283.496	8.646	3.279%	Resíduos Manejo
AP	Mazagão	69.497	2.735	2.541%	Resíduos Manejo
AM	Manacapuru	79.856	3.627	2.202%	Resíduos Agrícolas
RO	Guajará-Mirim	29.922	1.964	1.524%	Resíduos Animais
AP	Vitória do Jari	4.095	312	1.313%	Resíduos Agrícolas
AP	Amapá	8.057	629	1.281%	Resíduos Animais
PA	Chaves	45.284	4.502	1.006%	Resíduos Animais
AP	Macapá	80.364	8.215	978%	RSU - Gaseificação
RR	Uiramutã	21.616	2.597	832%	Resíduos Agrícolas
PA	Faro	51.226	7.042	727%	Resíduos Manejo
PA	Aveiro	18.548	3.373	550%	Resíduos Animais
AM	Atalaia do Norte	4.693	1.165	403%	RSU - Gaseificação
PA	Anajás	61.178	16.470	371%	Resíduos Agrícolas
PA	Praia	50.863	13.814	368%	Resíduos Animais
RR	Normandia	24.365	6.730	362%	Resíduos Agrícolas
AC	Marechal Thaumaturgo	26.754	7.608	352%	Resíduos Agrícolas
PA	Oeiras do Pará	56.990	17.271	330%	Resíduos Agrícolas
AC	Jordão	9.820	3.208	306%	Resíduos Agrícolas
AM	Codajás	74.027	28.139	263%	Resíduos Agrícolas
RR	Alto Alegre	61.361	24.216	253%	Resíduos Agrícolas
RR	Amajari	23.297	9.554	244%	Resíduos Animais

UF	Município	Potencial Total de Geração de Energia Elétrica (MWh/ano)	Carga (2023) (MWh)	Potencial de atendimento (%)	Principal matéria-prima
AC	Feijó	58.903	24.346	242%	Resíduos Agrícolas
AM	Uarini	28.419	12.543	227%	Resíduos Agrícolas
AC	Tarauacá	64.863	31.706	205%	Resíduos Agrícolas
AC	Porto Walter	12.302	6.264	196%	Resíduos Agrícolas
AM	Alvarães	23.240	12.377	188%	Resíduos Agrícolas
RR	Bonfim	92.933	49.994	186%	Resíduos Agrícolas
PA	Santa Cruz do Arari	9.206	5.060	182%	Resíduos Animais
AC	Santa Rosa do Purus	4.486	2.577	174%	Resíduos Agrícolas
AM	Lábrea	60.294	41.764	144%	Resíduos Animais
PA	Muaná	30.525	23.374	131%	Resíduos Agrícolas
PA	Jacareacanga	24.558	18.847	130%	Resíduos Agrícolas
AM	Apuí	29.182	23.382	125%	Resíduos Animais
PA	São Sebastião da Boa Vista	24.400	20.604	118%	Resíduos Agrícolas
PA	Porto de Moz	30.771	28.263	109%	Resíduos Animais
AM	Manicoré	61.611	58.891	105%	Resíduos Agrícolas
PA	Juruti	61.891	61.050	101%	Resíduos Agrícolas

Fonte: Elaboração própria (2022).

Nota: No Anexo I é apresentada uma lista de localidades em cada município.

Tabela 53 - Potencial de atendimento com biomassa, considerando a relação potência/demanda.

UF	Município	Potência Elétrica Total Disponível (MW)	Demanda (2023) (MW)	Potencial de atendimento (%)	Principal matéria-prima
RO	São Francisco do Guaporé	10,0	0,07	14.525%	Resíduos Animais
RO	Chupinguaia	23,3	0,41	5.747%	Resíduos Agrícolas
AP	Laranjal do Jari	14,4	0,26	5.553%	Resíduos Manejo
RO	Porto Velho	61,5	1,50	4.098%	Resíduos Agrícolas
RO	Alta Floresta D'Oeste	12,9	0,57	2.271%	Resíduos Animais
PA	Belém	37,3	1,75	2.133%	RSU - Gaseificação
AP	Mazagão	9,9	0,51	1.934%	Resíduos Manejo
AM	Manacapuru	11,2	0,73	1.526%	Resíduos Agrícolas
PA	Itaituba	39,9	2,97	1.341%	Resíduos Manejo
RO	Guajará-Mirim	4,0	0,33	1.232%	Resíduos Animais
AP	Amapá	1,1	0,11	1.025%	Resíduos Animais
PA	Chaves	6,1	0,75	811%	Resíduos Animais
AP	Macapá	10,8	1,51	717%	RSU - Gaseificação
AP	Vitória do Jari	0,6	0,08	716%	Resíduos Agrícolas
PA	Faro	7,3	1,16	630%	Resíduos Manejo
RR	Uiramutã	3,0	0,62	493%	Resíduos Agrícolas
PA	Aveiro	2,5	0,56	458%	Resíduos Agrícolas
PA	Anajás	8,7	2,60	333%	Resíduos Agrícolas

UF	Município	Potência Elétrica Total Disponível (MW)	Demanda (2023) (MW)	Potencial de atendimento (%)	Principal matéria-prima
PA	Prainha	7,0	2,15	325%	Resíduos Animais
PA	Oeiras do Pará	8,1	2,58	313%	Resíduos Agrícolas
RR	Normandia	3,4	1,14	302%	Resíduos Agrícolas
AC	Marechal Thaumaturgo	3,8	1,45	259%	Resíduos Agrícolas
AM	Atalaia do Norte	0,6	0,27	237%	RSU - Gaseificação
AM	Codajás	10,5	4,65	226%	Resíduos Agrícolas
AC	Jordão	1,4	0,67	204%	Resíduos Agrícolas
AC	Feijó	8,1	4,18	195%	Resíduos Agrícolas
RR	Amajari	3,2	1,71	186%	Resíduos Animais
AM	Uarini	4,0	2,18	185%	Resíduos Agrícolas
RR	Alto Alegre	8,6	4,76	181%	Resíduos Agrícolas
AC	Porto Walter	1,7	1,11	155%	Resíduos Agrícolas
AM	Alvarães	3,3	2,12	155%	Resíduos Agrícolas
AC	Tarauacá	9,0	5,85	153%	Resíduos Agrícolas
PA	Santa Cruz do Arari	1,2	0,81	153%	Resíduos Animais
RR	Bonfim	13,2	10,29	128%	Resíduos Agrícolas
AC	Santa Rosa do Purus	0,6	0,53	116%	Resíduos Agrícolas
PA	Muaná	4,2	3,71	115%	Resíduos Agrícolas
PA	São Sebastião da Boa Vista	3,4	3,01	114%	Resíduos Agrícolas
AM	Lábrea	8,1	7,44	109%	Resíduos Animais
PA	Jacareacanga	3,4	3,40	100%	Resíduos Agrícolas

Fonte: Elaboração própria (2022).

Nota: No Anexo I é apresentada uma lista de localidades em cada município.

É possível perceber que há uma lista grande de municípios com potencial de atendimento que supera os 100%. No caso da relação potencial/carga, dos 106 municípios avaliados sem interligação até 2023, teoricamente seria possível atender totalmente a 43 deles apenas com o aproveitamento da biomassa, ainda que de diferentes fontes. Sabe-se, no entanto, que a metodologia do estudo considerou diferentes matérias-primas e tecnologias de conversão, que exigiriam a soma da energia de projetos diferentes para realizar o atendimento sugerido nessa avaliação.

Ainda desses dados, é possível perceber que, na maior parte dos municípios com potencial de atendimento a partir da biomassa maior que 100%, os resíduos agrícolas são a matéria-prima da qual se pode gerar mais eletricidade. Por outro lado, ao se selecionar apenas os dez primeiros municípios em potencial de atendimento, há uma interessante diversidade de matérias-primas principais. Além dos resíduos agrícolas, também aparecem nessa lista os

resíduos animais (três vezes), de manejo (três vezes), e resíduos sólidos urbanos convertidos pela gaseificação (uma vez).

Ao se avaliar os 106 municípios com comunidades isoladas identificadas nos dados da EPE e sem interligação até 2023, encontrou-se que 43 municípios têm potencial de atendimento maior que 100%, em 24 deles o potencial está entre 50% e 100%, e 39 municípios têm potencial menor que 50%.

8.2. BARREIRAS EXISTENTES PARA VIABILIZAÇÃO DOS POTENCIAIS

Apesar dos potenciais expressivos de aproveitamento energético dos resíduos de biomassa nos municípios correspondentes ao sistema isolado, verificou-se que há barreiras significativas a serem discutidas para a sua viabilização. Experiências anteriores do GBIO em implantação de sistemas semelhantes na Amazônia (Projeto GASEIFAMAZ³⁸) permitiram a realização desta discussão.

A seguir analisamos cada uma destas barreiras.

- Falta de infraestrutura inviabilizar o uso do potencial a médio e curto prazo. Nos municípios analisados, é clara a necessidade de desenvolvimento de uma infraestrutura local para implantação das tecnologias consideradas. A questão de falta de acesso às localidades é a mais importante, pois em muitos casos não há estradas e o acesso é por via fluvial, dependendo do regime de chuvas na região.
- Barreiras existentes ao aproveitamento dos resíduos animais:
 - Os animais são criados de forma extensiva e são para subsistência local, o que dificulta o aproveitamento dos dejetos.
 - O número de animais foi estimado com base em todo o município que possui sistema isolado. Não tem como definir o local de criação desses animais (se estão no sistema isolado ou não).
 - Se os sistemas de criação estivessem próximos seria possível fazer uma única central de tratamento (a exemplo do condomínio Ajuricaba/Itaipu), mas para isso seriam necessárias visitas técnicas e avaliação in loco, pois os dados de literatura não fornecem as informações desagregadas por sistema isolado.
- Barreiras existentes ao aproveitamento dos resíduos agrícolas.

³⁸ <http://gbio.webhostusp.sti.usp.br/?q=node/307>

- **Disponibilidade:** Alguns dos resíduos só estão disponíveis uma ou duas vezes ao ano (na colheita) e outros possuem uma disponibilidade mais distribuída ao longo do ano; é necessário obter dados detalhados de sua produção e se esta produção é constante ao longo do ano para que seja viável.
- Quantidade de resíduos agrícolas disponível no município que possui sistema isolado. Não há informação sobre a quantidade desses resíduos em cada sistema isolado.
- **Barreiras existentes ao aproveitamento energético de resíduos urbanos:**
 - No levantamento desenvolvido, foi considerada a quantidade de RSU e esgoto com base na população de todo o município que possui sistema isolado, e não com base na população de cada sistema isolado, por falta de informação específica.
 - Dificuldade na coleta dos resíduos (esgoto e RSU): é conhecida a falta de saneamento básico na região, que não conta com coleta nem disposição adequada dos resíduos (RSU e esgoto). Para que o aproveitamento energético seja realizado, é necessário que a coleta dos resíduos seja realizada de forma contínua.
 - Dificuldade quanto a separação de RSU na fonte geradora: seria necessário o desenvolvimento de conscientização da população visando à separação dos RSU, além de adequada capacitação para que este processo ocorra. Em um dos cenários, foi considerado o aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário. Entretanto, sabe-se os sistemas isolados não possuem infraestrutura para implementação de aterro, sendo necessário uma análise ambiental adequada para isso.
- **Barreiras existentes ao aproveitamento energético dos resíduos de madeira**
 - Logística: verifica-se que o preço pago pela madeira não cobre os custos do transporte a grandes distâncias.
 - Os custos do processo de certificação dificultam a implementação de projetos de menor porte ou em comunidades tradicionais.

Além das barreiras específicas mencionadas acima, há também a questão geral de logística; a falta de infraestrutura (estradas) certamente dificulta o transporte dos resíduos, sendo necessário estudos mais detalhados para esta verificação. Adicionalmente, o

licenciamento ambiental pode ser uma barreira, mas não intransponível, uma vez que durante o processo de licenciamento sejam identificados os impactos ambientais decorrentes do empreendimento e as medidas mitigadoras propostas capazes de tornar estes impactos de magnitude não significativa ou mesmo eliminá-los.

No caso específico do aproveitamento energético do biogás, uma opção importante seria o seu uso para cocção, em particular nos casos em que o potencial para energia elétrica é reduzido. O biogás poderia ser usado em substituição do GLP ou lenha para cocção, mas são necessários maiores estudos de viabilidade econômica.

Uma última, mas não menos importante barreira, corresponde à necessidade de capacitação de recursos humanos para operação e manutenção do sistema de geração de energia. Certamente as concessionárias locais poderiam colaborar, mas frequentemente as mesmas também não se interessam por este tipo de aproveitamento energético, preferindo manter a geração com diesel, considerado mais viável. A uso da Conta de Consumo de Combustíveis (CCC) para remuneração do diesel também aparece como uma barreira ao uso da biomassa, pois as concessionárias recebem a compensação total pelo uso do diesel. Os estudos realizados pelo IEMA (Instituto de Energia e Meio Ambiente) detalham esta questão.

Entretanto, é inegável que, superadas as barreiras mencionadas, o aproveitamento energético dos resíduos de biomassa apresenta vantagens importantes como a oferta de energia, em muitos casos suficiente para o desenvolvimento de atividades econômicas. De fato, o uso de sistemas de energia fotovoltaica, apesar de garantir o acesso às necessidades básicas da população, não é suficiente para o desenvolvimento de atividades econômicas, em virtude da reduzida potência instalada. Como discutido em Coelho e Goldemberg (2013)³⁹, o uso da biomassa permite uma oferta maior de energia, com seus impactos positivos no desenvolvimento sustentável.

³⁹ COELHO, S. T.; GOLDEMBERG, J. Energy access: Lessons learned in Brazil and perspectives for replication in other developing countries. **Energy Policy**, v. 61, p. 1088–1096, 2013.

ANEXO I

Tabela 54 - Localidades integrantes dos sistemas isolados por municípios.

UF	Município	Localidade	Potencial total (MWh/ano)	Carga 2023 (MWh)	Demanda 2023 (MW)
AC	Cruzeiro do Sul	Cruzeiro do Sul	49.779,07	185.537	30,9
AC	Feijó	Feijó	58.902,63	24.346	4,2
AC	Jordão	Jordão	9.820,30	3.208	0,7
AC	Marechal Thaumaturgo	Marechal Thaumaturgo	26.753,91	7.608	1,5
AC	Porto Walter	Porto Walter	12.302,25	6.264	1,1
AC	Santa Rosa do Purus	Santa Rosa do Purus	4.485,93	2.577	0,5
AC	Tarauacá	Tarauacá	64.862,94	31.706	5,9
AM	Alvarães	Alvarães	23.240,05	12.377	2,1
AM	Amaturá	Amaturá	2.872,04	7.331	2,0
AM	Anamã	Anamã	3.199,41	11.270	2,1
AM	Anori	Anori	4.604,47	18.045	3,0
AM	Apuí	Apuí	29.182,16	23.382	4,2
		Sucunduri			
AM	Atalaia do Norte	Estirão do Equador	4.693,27	1.165	0,3
		Palmeiras			
AM	Autazes	Autazes	42.938,28	54.373	9,6
		Novo Céu			
		Vila Urucurituba			
AM	Barcelos	Barcelos	4.835,45	18.049	3,2
		Carvoeiro			
		Moura			
AM	Barreirinha	Barreirinha	12.461,09	21.585	4,0
		Pedras			

UF	Município	Localidade	Potencial total (MWh/ano)	Carga 2023 (MWh)	Demanda 2023 (MW)
AM	Benjamin Constant	Benjamin Constant Feijoal	8.627,33	35.255	6,5
AM	Beruri	Beruri Caviana Itapuru	3.773,13	17.540	3,0
AM	Boa Vista do Ramos	Boa Vista do Ramos	6.944,63	16.019	2,9
AM	Boca do Acre	Boca do Acre	40.366,60	41.193	7,1
AM	Borba	Axinim Borba	14.592,22	29.483	5,3
AM	Caapiranga	Araras Caapiranga Campinas	3.101,08	11.600	2,1
AM	Canutama	Belo Monte Canutama	6.860,70	9.472	1,7
AM	Carauari	Carauari	11.414,52	27.888	4,9
AM	Careiro	Castanho	13.288,61	75.826	13,9
AM	Careiro da Várzea	Careiro Parauá	14.907,82	15.334	2,9
AM	Coari	Coari	20.414,20	111.029	18,8
AM	Codajás	Codajás Murituba	74.027,43	28.139	4,6
AM	Eirunepé	Eirunepé	18.708,08	28.286	6,7
AM	Envira	Envira	8.839,27	12.497	2,1
AM	Fonte Boa	Fonte Boa	3.658,23	25.028	4,1
AM	Guajará	Guajará	8.333,36	9.798	1,7
AM	Humaitá	Auxiliadora Humaitá	38.543,07	86.934	16,1
AM	Ipixuna	Ipixuna	8.125,83	10.147	1,7

UF	Município	Localidade	Potencial total (MWh/ano)	Carga 2023 (MWh)	Demanda 2023 (MW)
AM	Itacoatiara	Itacoatiara	215.709,84	242.438	44,1
		Lindóia			
		Novo Remanso			
AM	Itamarati	Itamarati	2.193,97	7.859	1,3
AM	Itapiranga	Itapiranga	14.409,22	16.463	3,2
AM	Japurá	Japurá	1.283,73	10.091	1,9
		Limoeiro			
		Vila Bitencourt			
AM	Juruá	Juruá	2.894,58	83.074	14,1
		Tamaniquá			
AM	Jutaí	Jutaí	4.443,76	21.049	3,5
AM	Lábrea	Lábrea	60.293,85	41.764	7,4
AM	Manacapuru	Sacambu	79.855,66	3.627	0,7
		Tuiué			
AM	Manaquiri	Manaquiri	12.126,19	24.079	4,3
AM	Manicoré	Manicoré	61.610,68	58.891	11,1
		Matupí			
AM	Maraã	Maraã	3.419,19	12.376	2,0
AM	Maués	Maués	23.703,84	56.834	10,0
AM	Nhamundá	Nhamundá	9.237,10	15.780	2,8
AM	Nova Olinda do Norte	Nova Olinda do Norte	14.837,05	32.571	5,8
AM	Novo Airão	Novo Airão	3.898,55	22.423	4,0
AM	Novo Aripuanã	Novo Aripuanã	18.367,83	23.725	5,9
AM	Parintins	Cabori	40.994,41	170.192	33,2
		Mocambo			
		Parintins			
		Vila Amazônia			
AM	Pauini	Pauini	7.012,38	10.425	1,8

UF	Município	Localidade	Potencial total (MWh/ano)	Carga 2023 (MWh)	Demanda 2023 (MW)
AM	Rio Preto da Eva	Rio Preto da Eva	8.509,61	57.147	9,9
AM	Santa Isabel do Rio Negro	Santa Isabel do Rio Negro	4.899,82	9.482	1,6
AM	Santo Antônio do Içá	Alterosa	5.132,77	21.832	4,0
		Betânia			
		Ipiranga			
		Santo Antônio do Içá			
AM	São Gabriel da Cachoeira	Cucuí	9.136,43	47.556	8,5
		Iauarete			
		São Gabriel da Cachoeira			
AM	São Paulo de Olivença	Santa Rita do Well	7.619,14	17.221	2,9
		São Paulo de Olivença			
AM	São Sebastião do Uatumã	Santana do Uatumã	5.500,54	10.548	1,8
		São Sebastião do Uatumã			
AM	Silves	Silves	5.081,75	9.414	1,8
AM	Tabatinga	Belém do Solimões	12.481,06	77.949	13,4
		Tabatinga			
AM	Tapauá	Camaruã	17.156,11	17.245	3,2
		Tapauá			
AM	Tefé	Caiambé	47.716,14	108.586	19,2
		Tefé			
AM	Tonantins	Tonantins	4.151,02	11.121	2,4
AM	Uarini	Uarini	28.418,97	12.543	2,2
AM	Urucará	Urucará	6.306,90	18.768	3,2
AM	Urucurituba	Augusto Montenegro	7.227,73	23.068	4,2
		Urucurituba			
AP	Amapá	Sucuriçu	8.057,16	629	0,1
AP	Laranjal do Jari	Água Branca do Cajari	101.220,44	1.566	0,3
		Conceição do Muriacá			

UF	Município	Localidade	Potencial total (MWh/ano)	Carga 2023 (MWh)	Demanda 2023 (MW)
AP	Macapá	São Francisco do Iratapuru	80.364,22	8.215	1,5
		Bailique			
		Franco Grande			
		Freguesia do Bailique			
		Jangadinha do Curuá			
		Limão do Curuá I			
		Livramento			
		Maranata			
AP	Mazagão	Ponta da Esperança	69.496,85	2.735	0,5
		Vila do Rio Preto do Maracá			
		Vila Maracá			
AP	Oiapoque	Cassiporé	12.018,22	51.044	8,3
		Espirito Santo			
		Kumarumã			
		Kumenê			
		Kunanã			
		Oiapoque			
		Samaúma			
		Santa Izabel			
AP	Vitória do Jari	Vila Velha	4.095,04	312	0,1
		Jarilândia			
		São João do Rio Cajari			
MT	Colniza	Guariba	117.237,59	Interligado	Interligado
PA	Afuá	Afua	10.331,01	15.011	2,5
PA	Almeirim	Almeirim	130.835,60	Interligado	Interligado
PA	Anajás	Anajas	61.178,34	16.470	2,6
PA	Aveiro	Aveiro	18.547,87	3.373	0,6
PA	Belém	Cotijuba	282.230,44	4.786	1,7

UF	Município	Localidade	Potencial total (MWh/ano)	Carga 2023 (MWh)	Demanda 2023 (MW)
PA	Chaves	Chaves	45.283,90	4.502	0,7
PA	Faro	Faro	51.225,51	7.042	1,2
PA	Gurupá	Gurupa	12.698,93	19.062	3,0
PA	Itaituba	Agua Branca	283.495,71	8.646	3,0
		Crepurizao			
PA	Jacareacanga	Jacareacanga	24.557,93	18.847	3,4
PA	Juruti	Alcoa Beneficiamento	61.890,58	61.050	10,0
		Alcoa Porto			
		Juruti			
PA	Muaná	Muana	30.525,48	23.374	3,7
PA	Oeiras do Pará	Oeiras do Para	56.989,90	17.271	2,6
PA	Porto de Moz	Porto de Moz	30.770,70	28.263	4,4
PA	Prainha	Prainha	50.862,69	13.814	2,1
PA	Santa Cruz do Arari	Santa Cruz do Arari	9.206,14	5.060	0,8
PA	São Sebastião da Boa Vista	Sao Sebastiao da Boa Vista	24.400,49	20.604	3,0
PA	Terra Santa	Terra Santa	21.507,59	24.616	4,2
PE	Fernando de Noronha	Fernando de Noronha	637,50	25.971	4,7
RO	Alta Floresta D'Oeste	Izidolândia	94.271,69	2.303	0,6
		Rolim de Moura do Guaporé			
RO	Buritis	Buritis	98.063,58	Interligado	Interligado
RO	Campo Novo de Rondônia	Campo Novo	103.103,12	Interligado	Interligado
RO	Chupinguaia	Urucumacua	166.159,20	2.300	0,4
RO	Cujubim	Cujubim	74.908,59	Interligado	Interligado
RO	Espigão D'Oeste	Pacaranã	68.328,09	Interligado	Interligado
RO	Guajará-Mirim	Surpresa	29.922,05	1.964	0,3
RO	Machadinho D'Oeste	Machadinho D'Oeste	153.309,91	Interligado	Interligado
RO	Porto Velho	Calama	447.122,69	7.594	1,5
		Conceição da Galera			

UF	Município	Localidade	Potencial total (MWh/ano)	Carga 2023 (MWh)	Demanda 2023 (MW)
		Demarcação			
		Maici			
		Nazaré			
		Nova Califórnia			
		Santa Catarina			
		São Carlos			
		União Bandeirantes			
		Vila Extrema			
		Vista Alegre			
RO	São Francisco do Guaporé	Pedras Negras	74.220,71	228	0,1
RO	Vale do Anari	Vale do Anari	30.936,25	Interligado	Interligado
RR	Alto Alegre	Alto Alegre	61.361,23	24.216	4,8
		Com. Ind. Maruwai			
RR	Amajari	Amajari	23.296,60	9.554	1,7
		Com. Ind. Santa Inez			
RR	Boa Vista	Boa Vista	84.015,80	1.258.624	224,1
RR	Bonfim	Bonfim	92.933,11	49.994	10,3
RR	Caracaraí	Caracaraí	14.787,81	39.801	6,0
		Lago Grande			
		Panacarica			
		Sacaí			
		Santa Maria do Xeruinim			
		São Francisco do Baixo Rio Branco			
		Vila Cachoeirinha			
		Vila Caicubi			
		Vila Tanauau			
RR	Caroebe	Vila Terra Preta	30.364,07	Interconectado	Interconectado
		Com. Ind. Catual			

UF	Município	Localidade	Potencial total (MWh/ano)	Carga 2023 (MWh)	Demanda 2023 (MW)
		Com. Ind. Cobra			
		Com. Ind. do Jatapuzinho			
		Com. Ind. Maracá			
		Com. Ind. Soma			
		Way Way Samaúma			
RR	Mucajaí	Mucajaí	27.897,13	44.777	7,5
		Com. Ind. Araçá de Normandia			
		Com. Ind. Congresso			
		Com. Ind. do Canavial			
		Com. Ind. do Gavião			
		Com. Ind. do Patativa			
		Com. Ind. Feliz Encontro			
		Com. Ind. Olho D'Água			
		Com. Ind. Sabiá			
		Com. Ind. Xumina			
		Normandia			
		Vila Milagre			
		Boca Da Mata			
		Com. Ind. Bananal			
		Com. Ind. Caraparú III			
		Com. Ind. do Perdiz			
		Com. Ind. Entroncamento			
		Com. Ind. Guariba			
		Com. Ind. Ingarumã			
		Com. Ind. Santa Rosa			
		Com. Ind. Serra do Sol			
		Com. Ind. Sorocaima			
		Com. Ind. Sorocaima II			

UF	Município	Localidade	Potencial total (MWh/ano)	Carga 2023 (MWh)	Demanda 2023 (MW)
RR	Rorainópolis	Pacaraima	22.566,09	55.551	8,9
		Surumú			
		Com. Ind. Xixuaú			
		Rorainópolis			
		Samaúma			
		Santa Maria do Boiaçú			
		Santa Maria Velha			
		Vila Bela Vista			
		Vila Dona Cota			
		Vila Floresta			
		Vila Itaquera			
		Vila Remanso			
		São Pedro			
RR	São João da Baliza	São João Da Baliza	9.631,57	33.990	6,5
RR	Uiramutã	Água Fria	21.615,94	2.597	0,6
		Com. Ind. Caraparu IV			
		Com. Ind. do Cajú			
		Com. Ind. do Ticoça			
		Com. Ind. Enseada			
		Com. Ind. Maracanã			
		Com. Ind. Maturuca			
		Com. Ind. Monte Muriá I			
		Com. Ind. Monte Muriá II			
		Com. Ind. Nova Aliança			
		Com. Ind. Nova Jerusalem			
		Com. Ind. Pedra Branca			
		Com. Ind. Pedra Preta			
		Com. Ind. Santa Creuza			

UF	Município	Localidade	Potencial total (MWh/ano)	Carga 2023 (MWh)	Demanda 2023 (MW)
		Com. Ind. Vizeu			
		Socó			
		Uiramutã			
		Vila Mutum			

Fonte: Elaboração própria (2022).

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA EM SISTEMAS ISOLADOS (TE SISOL)

Relatório – Produto 8