



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

BRUNELLA BERMUDEZ PRATI SANT'ANA

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA PRELIMINAR DE
UM SISTEMA TÉRMICO HÍBRIDO PTC-RSU PARA A GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO**

**VITÓRIA - ES
JUNHO/2024**

BRUNELLA BERMUDES PRATI SANT'ANA

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA PRELIMINAR DE
UM SISTEMA TÉRMICO HÍBRIDO PTC-RSU PARA A GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na linha de pesquisa de Processamento de Energia e Sistemas Elétricos.

Orientadora: Profa. Dra. Jussara Farias Fardin

Coorientador: Prof. Dr. José Joaquim C. S. Santos

VITÓRIA - ES
JUNHO/2024

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

S231e Sant'Ana, Brunella Bermudes Prati, 1998-
Estudo da viabilidade técnico-econômica preliminar de um
sistema térmico híbrido PTC-RSU para a geração de energia
elétrica no estado do Espírito Santo / Brunella Bermudes Prati
Sant'Ana. - 2024.
98 f. : il.

Orientadora: Jussara Farias Fardin.
Coorientador: José Joaquim Conceição Soares Santos.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Energia solar. 3. Resíduos
sólidos. 4. Sistemas de energia elétrica. I. Fardin, Jussara Farias.
II. Santos, José Joaquim Conceição Soares. III. Universidade
Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

BRUNELLA BERMUDES PRATI SANT'ANA

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA PRELIMINAR DE UM SISTEMA TÉRMICO HÍBRIDO PTC-RSU PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na linha de pesquisa de Processamento de Energia e Sistemas Elétricos.
Aprovada em:

COMISSÃO EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **JUSSARA FARIAS FARDIN**
Data: 20/09/2024 11:34:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Jussara Farias Fardin
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Professora Orientadora

Documento assinado digitalmente
 **JOSE JOAQUIM CONCEICAO SOARES SANTOS**
Data: 20/09/2024 12:20:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Joaquim Conceição Soares Santos
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Professor Coorientador

Documento assinado digitalmente
 **HELDER ROBERTO DE OLIVEIRA ROCHA**
Data: 20/09/2024 15:01:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha
Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
Examinador Interno

Documento assinado digitalmente
 **PEDRO ROSSETO DE FARIA**
Data: 20/09/2024 14:17:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Pedro Rosseto de Faria
Instituto Federal do Espírito Santo - IFES
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem Ele nada disto seria possível. Toda força e determinação veio Dele.

Depois à minha mãe, Simone Bermudes, que, além da vida, me deu apoio incondicionalmente em todas as etapas e momentos da minha vida, sejam acadêmicos ou não; ao meu irmão, Lucas Bermudes, que me ajudou mesmo quando não tinha muito tempo; e ao meu avô, Garcia Antônio Prati, que é meu apoiador e entusiasta acadêmico número 1. Eu amo vocês.

Agradeço à minha orientadora Professora Dra. Jussara Fardin, e ao meu coorientador Professor Dr. José Joaquim Santos, que, além de todo conhecimento acadêmico e profissional, me deram apoio e suporte desde o primeiro dia para minha empreitada de desviar da área da Engenharia Civil e me aventurar nas áreas de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica, tendo paciência para me ajudar e guiar por essas novas áreas de conhecimento. Além de orientadores, também se tornaram grandes amigos. Sou eternamente grata pelo acolhimento e auxílio que sempre me foi dado.

Aos meus amigos Alexsander Quintão e Francisco Mello deixo aqui registrada a minha mais genuína gratidão por todas as madrugadas em claro, todas as conversas (aleatórias ou não), todo apoio e incentivo nos momentos mais difíceis e toda a ajuda que tive durante esses anos do mestrado. Vocês foram parte essencial para que essa dissertação fosse concluída com sucesso. Muito obrigada por tornarem essa caminhada bem mais leve desde o primeiro dia.

Agradeço também a todos os meus amigos e meus alunos que em algum momento me ajudaram, seja de forma acadêmica, seja de forma emocional, e que estiveram ao meu lado por praticamente todos os dias. Vocês foram uma parte importante deste processo e sou grata por todos os momentos em que estiveram presentes.

Por fim, agradeço a CAPES pela concessão da bolsa para realizar meu mestrado. Fica aqui registrada a importância de se providenciar condições financeiras aos alunos de pós-graduação para que os mesmos se dediquem integralmente à pesquisa que estão determinados a fazer e concluir, assim como fiz.

RESUMO

A crescente preocupação com o aumento da temperatura global tem suscitado debates em diversos setores da sociedade. No contexto da geração de energia elétrica, a transição para fontes energéticas mais sustentáveis torna-se uma necessidade urgente, dada a importância da eletricidade em todas as esferas da vida moderna. Este estudo visa analisar a viabilidade técnico-econômica da implementação de uma usina termossolar-biomassa no estado do Espírito Santo, com o objetivo de fornecer uma fonte de energia limpa e sustentável tanto para o estado quanto para a rede de distribuição regional. O sistema proposto consiste em uma combinação de tecnologias, incluindo uma planta de geração solar com coletores do tipo calha parabólica (PTC - *Parabolic Trough Collector*, em Inglês) juntamente com a combustão de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados localmente, a fim de mitigar a intermitência da fonte solar. A abordagem metodológica da pesquisa apresentada envolve estudos de localização por meio de rotas rodoviárias para transporte do RSU, pesquisa em irradiação solar na localidade de implantação, simulações utilizando o *software* IPSEPro para análise termodinâmica da planta e determinação da geração de energia elétrica, além de estudos preliminares de viabilidade econômica, considerando custos básicos de investimento e retorno. Os resultados da pesquisa indicam que é possível alcançar uma capacidade de geração entre 28MW e 78MW de potência elétrica bruta, a depender da configuração da usina híbrida. Para a máxima geração de eletricidade, o campo solar da planta é composto por 88 coletores de 1,50 metros de comprimento cada, instalados em uma área de aproximadamente 7,2 hectares. Para garantir a geração contínua de energia, foi estimado que uma quantidade logística de 27,04kg/s de RSU pode ser entregue ao local identificado nos estudos como ideal para a instalação da usina, localizado em Cariacica, onde os resíduos são incinerados e o calor proveniente da combustão é aproveitado para aquecer o fluido do campo solar durante a noite. Economicamente, o empreendimento demonstra um investimento inicial máximo na ordem de R\$522.000.000,00, com retorno em até 07 anos (considerando cenário de atenuação de 60% da receita), o que demonstra a viabilidade do projeto. Entretanto, um capital para aporte inicial desse porte somente se faz viável com suporte de políticas públicas de incentivo a utilização de fontes renováveis e baixas taxas de juros para financiamentos. O investimento e desenvolvimento dessa iniciativa de usina híbrida representa um avanço significativo no setor de energia renovável do estado, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a diversificação da matriz elétrica regional.

Palavras-chave: Usinas Híbridas; Energia Solar Concentrada; Resíduos Sólidos Urbanos; Fontes Renováveis; Energia Limpa.

ABSTRACT

The growing concern about rising global temperatures has sparked debate in various sectors of society. In the context of electricity generation, the transition to more sustainable energy sources is becoming an urgent necessity, given the importance of electricity in all spheres of modern life. This study aims to analyze the technical and economic feasibility of implementing a thermosolar-biomass plant in the state of Espírito Santo, with the aim of providing a clean and sustainable source of energy for both the state and the regional distribution network. The proposed system consists of a combination of technologies, including a solar generation plant with parabolic trough collectors (PTC) together with the combustion of locally generated Municipal Solid Waste (MSW) in order to mitigate the intermittency of the solar source. The methodological approach of the research presented involves localization studies using road routes for transporting the MSW, research into solar irradiation in the location of the plant, simulations using IPSEPro software to thermodynamically analyze the plant and determine electricity generation, as well as preliminary economic feasibility studies, considering basic investment costs and return. The results of the research indicate that it is possible to achieve a generation capacity of between 28MW and 78MW of gross electrical power, depending on the configuration of the hybrid plant. For maximum electricity generation, the plant's solar field is made up of 88 collectors, each 1.50 meters long, installed over an area of approximately 7.2 hectares. To guarantee continuous energy generation, it was estimated that a logistical quantity of 27.04kg/s of MSW could be delivered to the site identified in the studies as ideal for installing the plant, located in Cariacica, where the waste is incinerated and the heat from combustion is used to heat the solar field fluid at night. Economically, the project has a maximum initial investment of around R\$522,000,000.00, with a return of up to 7 years (considering attenuation scenario of 60% of revenue), which demonstrates the viability of the project. However, an initial investment of this size is only feasible with the support of public policies to encourage the use of renewable sources and low interest rates for financing. The investment and development of this hybrid power plant initiative represents a significant step forward in the state's renewable energy sector, contributing to the reduction of greenhouse gas emissions and the diversification of the regional electricity matrix.

Keywords: Hybrid Power Plants; Concentrated Solar Power; Municipal Solid Waste; Renewable Sources; Clean Energy.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distância - Santa Maria de Jetibá	65
Tabela 2 – Distância - Afonso Cláudio	66
Tabela 3 – Distância - Domingos Martins	66
Tabela 4 – Distância média entre aterros (km)	67
Tabela 5 – Distância média entre municípios (km)	67
Tabela 6 – Comparativo entre estudos	70
Tabela 7 – Resumo das entradas	72
Tabela 8 – Relação PTCs x Potência gerada	74
Tabela 9 – Área do campo solar	76
Tabela 10 – Custo fonte solar	78
Tabela 11 – Custo fonte RSU	79
Tabela 12 – Custo Investimento Inicial	79
Tabela 13 – Resumo da receita diária e anual	80
Tabela 14 – Indicadores econômicos - Receita sem atenuação	80
Tabela 15 – Indicadores econômicos - Receita com 40% de atenuação	81
Tabela 16 – Indicadores econômicos - Receita com 60% de atenuação	81
Tabela 17 – Resumo das saídas	82
Tabela 18 – Detalhamento da receita	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Resultados gerais - Análise bibliométrica	18
Figura 2 – Quantidade de publicações por ano	19
Figura 3 – Energia elétrica gerada mundialmente	21
Figura 4 – Porcentagem de oferta de energia elétrica global até 2030	22
Figura 5 – Matriz elétrica brasileira	23
Figura 6 – Potência outorgada em operação, por estado federativo	24
Figura 7 – Classificação RECAI	24
Figura 8 – Porcentagem de acesso à energia elétrica no Brasil em 2022	25
Figura 9 – Matriz elétrica do Espírito Santo por fonte	26
Figura 10 – Tecnologias de concentração solar	34
Figura 11 – Coletor tipo Calha Parabólica - PTC	35
Figura 12 – Esquema básico do ciclo de Rankine	37
Figura 13 – Esquema básico do ciclo de Brayton	37
Figura 14 – Esquemático de planta híbrida com ciclo de potência	38
Figura 15 – Usinas híbridas	43
Figura 16 – Rotas de transporte e descarte de resíduos no estado do Espírito Santo	52
Figura 17 – Mapa da Irradiação Normal Direta no estado do Espírito Santo	54
Figura 18 – Modelagem da combustão da biomassa	60
Figura 19 – Modelagem da planta híbrida	60
Figura 20 – Padrão de espaçamento para não sombreamento dos coletores solares .	63
Figura 21 – Curva de Irradiação Normal Direta por meses do ano	68
Figura 22 – Taxa de transferência de calor por hora do dia típico	74
Figura 23 – Variação da potência gerada com número de coletores	75
Figura 24 – Variação da potência gerada com vazão de HTF	76
Figura 25 – Porcentagem de utilização de fontes em um dia típico	77

LISTA DE SIGLAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
APP - *Advanced Power Plant* (Sistemas Avançados)
BIG-CC - *Biomass Integrated Gasification Combined Cycle* (Ciclo Combinado Integrado com Gaseificação de Biomassa)
C - Carbono
CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCGT - *Combined Cycle Gas Turbine* (Turbina a Gás em Ciclo Combinado)
CH₄ - Metano
CHP - *Combined Heat and Power* (Combinação de Calor e Potência ou Cogeração)
CO - Monóxido de Carbono
CO₂ - Dióxido de Carbono
CO_{2eq} - Dióxido de Carbono equivalente
COP - *Conference Of Parts* (Conferência das Partes)
CRC - Ciclo Rankine Convencional
CSP - *Concentrated Solar Power* (Energia Solar Concentrada)
CUSD - Contrato de Uso do Sistema de Distribuição
CUST - Contrato de Uso do Sistema de Transmissão
DLR - *Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt* (Instituto de Termodinâmica Técnica do Centro Aeroespacial Alemão)
DNI - *Direct Normal Irradiation* (Irradiação Direta Normal)
EFGT - *External Fired Gas Turbine* (Turbina a Gás de Queima Externa)
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
GEE - Gás de Efeito Estufa
GSA - *Global Solar Atlas* (Atlas Solar Global)
H - Hidrogênio
HTF - *Heat Transfer Fluid* (Fluido de Transferência de Calor)
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA - *International Energy Agency* (Agência Internacional de Energia)
N - Nitrogênio
NDC - *National Determinated Contributions* (Contribuições Nacionais Determinadas)
NSRDB - *National Solar Radiation Database* (Base de Dados de Radiação Solar Nacional)
O - Oxigênio
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU - Organização das Nações Unidas
ORC - *Organic Rankine Cycle* (Ciclo Rankine Orgânico)
PBD - *Payback* Descontado

PBS - *Payback* Simples

PNAD - Plano Nacional por Amostragem Domicilar

PTC - *Parabolic Trough Colector* (Coletor tipo Calha Parabólica)

RAS - Resíduo Agrossilvopastoril

RECAI - *Renewable Energy Country Attractiveness Index* (Índice de Atração dos Países à Energia Renovável)

RESS - *Renewable Energy Storage System* (Sistema de Armazenamento de Energia Renovável)

RSU - Resíduo Sólido Urbano

S - Enxofre

TES - *Thermal Energy Storage* (Armazenamento de Energia Térmica)

TIR - Taxa Interna de Retorno

UFES - Universidade Federal do Espírito Santo

VPL - Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa	13
1.2 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos	15
1.3 Organização do Trabalho	15
1.4 Produção Científica	16
1.5 Análise Bibliométrica	16
1.5.1 Critérios de busca	16
1.5.2 Resultados da análise	17
 CAPÍTULO 2: REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 Introdução à Geração de Energia Elétrica	20
2.1.1 Sustentabilidade na geração de eletricidade	20
2.1.2 Panorama global da geração de energia elétrica	21
2.1.3 Panorama brasileiro da geração de energia elétrica	23
2.1.4 Panorama de geração de energia elétrica do Estado do Espírito Santo	26
2.2 Conceitos de Energia Renovável	27
2.2.1 Energia renovável x energia limpa x energia alternativa	27
2.2.2 Tipos de fontes de geração de energia renovável	28
2.2.3 Vantagens e desafios da geração de energia por fontes renováveis	29
2.3 Transição Energética	30
2.3.1 Definição e importância da transição energética	30
2.3.2 Políticas públicas e estratégias para transição energética	31
2.4 Energia Térmica Solar	33
2.4.1 Definição de irradiação solar	33
2.4.2 Tecnologias de conversão solar	34
2.4.3 Ciclos de geração de potência	36
2.5 Biomassa na Geração de Energia	39
2.5.1 Definição de biomassa	39
2.5.2 Tipos de biomassa para geração de energia	39
2.5.3 Rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa	40
2.6 Usinas Híbridas	42
2.6.1 Conceito e classificação de usinas híbridas	42
2.6.2 Tipos de hibridização para geração de energia elétrica	44
2.6.3 Projetos e estudos em usinas híbridas	46

CAPÍTULO 3: METODOLOGIA E ESTUDO DE CASO	48
3.1 Estudos de Viabilidade Econômica e Implantação	48
3.1.1 Viabilidade econômica preliminar	48
3.1.2 Viabilidade de implantação	51
3.1.2.1 Estudo logístico da coleta de biomassa	51
3.1.2.2 Avaliação da irradiação solar	53
3.2 Eficiências Individual e Global	55
3.3 Ferramenta de Modelagem - IPSEPro Software Simulation	56
3.4 Base Teórica para Modelagem da Simulação	57
3.5 Metodologia da Simulação e Estudo de Caso	59
3.5.1 Modelagem adotada	59
3.5.2 Condições de contorno	61
3.5.2.1 Biomassa	61
3.5.2.2 Condições meteorológicas	61
3.5.2.3 Coletores solares	62
3.5.2.4 Resfriamento	63
3.5.2.5 Fluido de transferência de calor	63
3.5.2.6 Outras especificações técnicas	64
CAPÍTULO 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
4.1 Viabilidade de Implantação	65
4.1.1 Viabilidade de localização	65
4.1.2 Viabilidade de irradiação	68
4.1.3 Viabilidade de implantação final	69
4.2 Resumo dos dados de entrada nas simulações	72
4.3 Utilização de Biomassa	73
4.4 Dimensionamento do Campo Solar	74
4.5 Resultados do Sistema	76
4.6 Viabilidade Econômica Preliminar	78
4.7 Resumo dos Resultados Obtidos	82
CAPÍTULO 5: CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	83
5.1 Estudos Futuros	84
REFERÊNCIAS	86
APÊNDICE	92

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Observando o cenário global na ótica da sustentabilidade, as metas e objetivos estabelecidos para combate às mudanças climáticas ainda não são robustas o suficiente para evitar o aumento irreversível da temperatura do planeta - e as terríveis consequências que o seguem.

As negociações e acordos internacionais para combate às mudanças climáticas são consideravelmente recentes. A primeira Conferência da Partes – COP – aconteceu em 1993, mas o primeiro grande acordo internacional, o protocolo de Kyoto, foi criado somente em 1997, e só entrou em vigência em 2005. Em 2015 foi assinado o segundo grande acordo internacional de combate as mudanças climáticas, o Acordo de Paris, um pouco mais abrangente e exigente que o Protocolo de Kyoto, mas ainda assim carecendo de metas mais robustas para a mitigação do efeito estufa [1].

O acordo climático mais recente, o Pacto de Glasgow, efetivado em 2021, tentou apresentar propostas mais impactantes para o combate às mudanças climáticas, exigindo que os países membros iniciassem uma “imediata eliminação gradual” da geração de energia elétrica por meio da utilização de combustíveis fósseis. Porém, alguns países, como Índia e Irã, com grandes reservas de carvão e petróleo respectivamente, foram contra e insistiram na mudança do texto. Depois de diversas revisões e acordo entre os países, o acordo vigente trocou a “eliminação gradual” para “redução gradual”, abrindo assim pretexto para a continuação de utilização de combustíveis fósseis [2].

A geração de energia elétrica por meio de combustíveis fósseis ainda é muito forte no mundo todo. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA - International Energy Agency, em inglês) [3], no mundo são produzidos aproximadamente 25.721 TWh de energia elétrica, sendo que 38% desse total ainda é produzido por queima de carvão em termelétricas.

No entanto, nem todos os países se eximem de se manter na “eliminação gradual” dos combustíveis fósseis. Alguns países vêm tentando ficar firme às metas globais por meio da adoção de políticas de redução e mitigação da utilização de combustíveis poluentes em indústrias, automóveis e, principalmente, para a produção de energia elétrica.

No Brasil, por exemplo, a matriz elétrica é predominantemente renovável, representando cerca de 84% da produção de energia elétrica. Desse total, a principal fonte geradora são as hídricas, com 57,24%, seguida pela energia por fontes eólicas com 13,23%, biomassa com 8,63% e solar com 4,45% [4].

Segundo dados da ANEEL [4], a potência total outorgada do país é estimada em aproximadamente 204GW, gerada por cerca de 24 mil empreendimentos de portes variados. Deste total, aproximadamente 31GW são gerados por fontes solar e biomassa, representando 44% e 56%, respectivamente, distribuídos entre cerca de 19 mil empreendimentos.

No caso da biomassa, o bagaço de cana é o resíduo mais utilizado, seguido por licor

negro, resíduos florestais e biogás de aterro. A soma das potências outorgadas dessas fontes chega a 17,4GW, o que representa quase 97% da potência outorgada advinda de fontes de biomassa e cerca de 8,3% da potência outorgada total no país. A geração por incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU) atualmente representa apenas 24 MW (0,012%) do total outorgado no país [4].

Para a fonte solar, apenas empreendimentos fotovoltaicos são utilizados no país para geração de energia elétrica, injetando cerca de 13,7GW na rede nacional. Plantas com tecnologia térmica não injetam potência na rede nacional, sendo utilizadas apenas como plantas piloto em universidades e/ou fazendas, ou como plantas isoladas da rede, com geração e consumo no mesmo local [4].

Com base em pesquisas mais aprofundadas sobre os tópicos apresentados, desenvolveu-se o presente estudo para implementação de uma usina híbrida termossolar-biomassa no estado do Espírito Santo, utilizando uma combinação de tecnologias de concentração solar com incineração de RSU. O presente estudo foi feito considerando o panorama atual do estado e os fatores relevantes para tal feito, tais como irradiação, volume de resíduo gerado, logística de deposição dos resíduos, local apropriado para construção da usina, entre outros.

O propósito central dessa pesquisa e projeto é de produzir energia elétrica de forma mais limpa, eficiente e sustentável, dando uma melhor destinação para os resíduos urbanos inevitavelmente gerados e também melhorar o aproveitamento dos recursos naturais disponíveis.

1.1 Justificativa

A relativa intermitência de irradiação e o alto investimento inicial são alguns dos principais problemas associados à geração de energia elétrica a partir de fontes solares térmicas. As usinas que utilizam biomassa por rotas de incineração, por sua vez, exigem uma volumosa quantidade de injeção de combustível - quantidade essa que pode não estar tão facilmente disponível para utilização ante a distribuição logística dos rejeitos - para gerar uma quantidade razoável de energia.

Uma solução efetiva e sustentável para geração de energia elétrica utilizando dessas duas fontes pode se dar a partir da utilização conjunta, usando determinada taxa de alimentação de biomassa combinada com a variação da irradiação durante o dia. Esse tipo de configuração é chamada de Usina Híbrida e sua utilização pode reduzir bruscamente a necessidade de armazenamento da energia térmica produzida - por sua produção poder ser ininterrupta - além de minimizar os custos iniciais e de produção.

A premissa das usinas híbridas é a utilização conjunta de duas ou mais fontes de geração de energia, sejam elas renováveis ou não, para produzir mais energia ou produzir

de forma contínua. Quando utilizadas duas fontes renováveis, a intenção da combinação é suprir os períodos de intermitência de ambos os combustíveis usados, melhorando a qualidade e quantidade de energia elétrica, visto que a mesma pode gerar uma quantidade estável de energia ininterruptamente, apenas variando a porcentagem de utilização de cada combustível.

No Brasil, a primeira usina híbrida combinando biogás de resíduos de suinocultura com painéis fotovoltaicos entrou em operação em 2020, no Paraná, abastecendo cerca de 5.000 residências. Usinas híbridas eólico-solares também estão em operação no Nordeste, como as de Taracatu e Caetité, mostrando a viabilidade de integrar diferentes fontes renováveis.

No cenário global, a integração de tecnologias híbridas está em expansão em países como Espanha, Noruega, Índia e Nepal. A combinação de biomassa e energia solar tem se mostrado tecnicamente e economicamente viável, especialmente em plantas híbridas com concentradores solares, que podem compensar a variação de irradiação solar. Estudos indicam que a integração de armazenamento de energia térmica (TES) também é essencial para tornar essas usinas mais eficientes e flexíveis.

Um exemplo significativo é a usina "Plataforma Solar de Almería" na Espanha, um grande centro de pesquisa em energia solar. Já a usina "Termosolar Borges" combina solar e biomassa para garantir a geração de energia nos meses de inverno. Outro campo promissor é a produção de hidrogênio verde, onde o aquecimento da biomassa com tecnologia solar reduz significativamente as emissões de CO₂ em comparação com métodos tradicionais.

Essas usinas híbridas têm grande potencial para diversificar a matriz energética e aumentar a eficiência e resiliência dos sistemas elétricos, sendo uma solução promissora para a transição para uma economia de energia mais sustentável e limpa.

A presente dissertação de mestrado tem como foco iniciar o estudo de uma implantação de usina híbrida termosolar-biomassa para geração de energia limpa no Espírito Santo utilizando concentração solar por calhas parabólica e incineração de RSU. Com geração de energia elétrica por essa rota tecnológica, é esperado que haja uma redução significativa na quantidade de resíduos depositados em aterros juntamente com um melhor aproveitamento da energia solar térmica.

1.2 Objetivos

Nesta seção são apresentados os objetivos gerais e específicos desta pesquisa, visando esclarecer os interesses e pontos focais da dissertação apresentada.

1.2.1 Objetivo Geral

A presente dissertação de mestrado tem como objetivo principal produzir um estudo de viabilidade técnico-econômica preliminar para implantação de um sistema térmico híbrido para geração de energia elétrica no estado do Espírito Santo através da combinação de duas fontes renováveis, sendo elas biomassa advinda de resíduos urbanos e radiação solar.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Apontar a melhora ambiental e energética com a utilização das usinas híbridas;
- Estudar a implantação de uma possível planta híbrida no estado do Espírito Santo, indicando o local mais propício para tal feito, com base na logística da coleta de resíduos urbanos e na irradiação;
- Realizar simulações para quantificar os resíduos e coletores solares necessários para atingir o objetivo de geração definido;
- Executar estudo preliminar de viabilidade econômica para a construção do sistema e a geração de energia elétrica.
- Estimular novos estudos e pesquisa na área de usinas híbridas termossolar-biomassa no Brasil para utilização como futuras referências para implantações reais;

1.3 Organização do Trabalho

A presente dissertação de mestrado está dividida em 5 capítulos, sendo este já iniciado, o primeiro. Os parágrafos a seguir apresentam os principais temas que são abordados por cada capítulo, a partir do segundo.

No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico para embasamento do texto e tema da dissertação. São apresentados temas como geração de energia, fontes renováveis, transição energética, sistemas híbridos e os estudos de viabilidade econômica e logística.

O Capítulo 3 descreve a metodologia utilizada para as simulações do sistema de geração de energia elétrica. Apresenta a base teórica específica para a simulação, bem como os dados necessários para realização da mesma.

O Capítulo 4 é responsável pelos resultados obtidos nas simulações, bem como breves discussões sobre a quantificação de biomassa, dimensionamento do campo de coletores solares e a viabilidade final da usina proposta.

Por último, o Capítulo 5 apresenta as conclusões desta dissertação, com a recapitulação dos objetivos propostos e resultados finais das simulações, bem como sugestões de estudos futuros e a contribuição desta pesquisa na área em que se enquadra.

1.4 Produção Científica

Durante a realização deste trabalho, o seguinte artigo foi publicado:

SANT'ANA, Brunella Bermudes Prati; FARDIN, Jussara Farias; SANTOS, José Joaquim Conceição Soares. **MSW-TO-ELECTRICITY FOR MICROGRIDS: ANALYSIS OF TWO BRAYTON CYCLE TECHNOLOGICAL ROUTES**. Em: 8º Congresso Brasileiro de Geração Distribuída (CBGD 2023). Brasil, 2023.

Os seguintes artigos, sendo o primeiro como autora e o segundo como co-autora, foram aprovados no *20th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering* (ENCIT 2024), e serão apresentados oralmente no congresso em Novembro de 2024:

SANT'ANA, Brunella Bermudes Prati; QUINTÃO, Alexsander Luiz; FONSECA, Francisco Mello; FARDIN, Jussara Farias; SANTOS, José Joaquim Conceição Soares. **FEASIBILITY STUDY OF IMPLEMENTING A HYBRID THERMAL SOLAR-BIOMASS POWER PLANT FOR ELECTRICITY GENERATION IN THE STATE OF ESPÍRITO SANTO**.

QUINTÃO, Alexsander Luiz; SANT'ANA, Brunella Bermudes Prati; FONSECA, Francisco Mello; SANTOS, José Joaquim Conceição Soares. **THERMODYNAMIC EVALUATION OF STEAM TURBINE COGENERATION SYSTEM CONFIGURATIONS FOR THERMAL AND CHEMICAL WASTE ENERGY RECOVERY IN THE ELECTRIC FURNACES OF A CARBOCHEMICAL COMPANY IN BRAZIL**

1.5 Análise Bibliométrica

Nesta seção, é apresentada a análise bibliométrica de documentos relevantes ao presente trabalho, com o objetivo de examinar a progressão, as direções emergentes e os principais avanços discutidos na literatura científica relacionada ao tema desta dissertação.

1.5.1 Critérios de busca

Os critérios de busca definidos para esta análise bibliométrica foram: base de busca, expressão de busca, tipos de publicações e período de publicação.

Para a constituição da base de busca, utilizou-se o banco de dados de periódicos disponibilizado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES),

acessado por meio das credenciais institucionais da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).

As análises foram conduzidas utilizando o pacote *bibliometrix* [5] do *software* RStudio, com dados obtidos das plataformas *SCOPUS* (pertencente à Elsevier) e *Web of Science*. Estas plataformas foram selecionadas devido à sua extensa e diversificada coleção de publicações científicas e em virtude de limitações do *software* utilizado, que embora seja capaz de acessar outras bases de dados, possui uma seleção restrita. Dentre as opções disponíveis, *SCOPUS* e *Web of Science* são as únicas que abrangem predominantemente a área de engenharia.

A expressão de busca foi elaborada com base nas palavras-chave e no tema abordado na dissertação. Após uma análise preliminar, determinou-se que a expressão central de busca inicial seria: “*Hybrid power plant*” AND “*concentrated solar power*” AND “*biomass*”. Optou-se por utilizar a expressão em inglês para facilitar a busca e garantir uma maior abrangência nas plataformas disponíveis.

Como os critérios adotados resultaram em apenas 6 e 5 arquivos nas plataformas *SCOPUS* e *Web of Science*, respectivamente, optou-se por fazer nova pesquisa, alterando a expressão de busca para: “*Hybrid power plants*” AND “*solar power*” AND “*biomass*”, resultando assim em 23 e 7 arquivos, nas respectivas plataformas citadas. Ambas as pesquisas foram inseridas no software para realização da análise.

Os tipos de publicações não foram restritos, a fim de obter uma quantidade abrangente de dados. Quanto ao período de publicação, definiu-se que seria considerado um intervalo de 10 anos completos + o ano corrente, ou seja, de 2014 a 2024.

A base de dados IEEE também foi explorada, com os mesmo critérios de busca, para complementar a análise. No entanto, devido às limitações do *software* utilizado, esse banco de dados não pode ser diretamente analisados no programa, assim, os dados pertinentes foram inseridos manualmente para complementar a pesquisa.

No total, para a plataforma *SCOPUS*, a aplicação dos critérios e expressões de busca resultou em 29 arquivos; na plataforma *Web of Science*, 12 arquivos foram resultantes da pesquisa; e na plataforma IEEE, 9 arquivos foram encontrados.

1.5.2 Resultados da análise

A partir dos arquivos extraídos das bases de pesquisa, eles foram importados para o ambiente de programação *RStudio*. Em seguida, uma análise de sobreposição foi realizada para identificar e excluir os arquivos duplicados. Os documentos provenientes da base de dados da IEEE foram adicionados manualmente ao arquivo final, que foi então submetido à análise utilizando o pacote “*bibliometrix*”. Os resultados finais dessa análise estão representados na figura 1.

A revisão bibliométrica apresentada abrange um período de dez anos, de 2014 a 2024,

Figura 1 – Resultados gerais - Análise bibliométrica



Fonte: Bibliometrix [5] (Traduzido pelo autor)

como já especificado anteriormente, e analisa um total de 35 documentos provenientes de 24 fontes distintas, desde congressos a revistas científicas. Durante esse intervalo, observou-se uma taxa de crescimento anual de 3,81%, refletindo um aumento constante na produção acadêmica ao longo do tempo sobre o assunto pesquisado. O número de autores envolvidos nos documentos totalizou 111, indicando uma colaboração substancial entre pesquisadores.

Destaca-se que nenhum dos documentos revisados foi produzido por um único autor, evidenciando a tendência à colaboração multidisciplinar na pesquisa atual. Além disso, aproximadamente 8,63% dos documentos apresentaram coautoria internacional, o que demonstra a globalização da pesquisa e a troca de conhecimento entre instituições e países.

A análise revelou uma média de 3,65 coautores por documento, indicando uma tendência à colaboração entre múltiplos pesquisadores em cada trabalho. As palavras-chave utilizadas nos documentos totalizaram 145, refletindo a diversidade de temas abordados na literatura revisada e a média de idade dos documentos foi calculada em 5,5 anos.

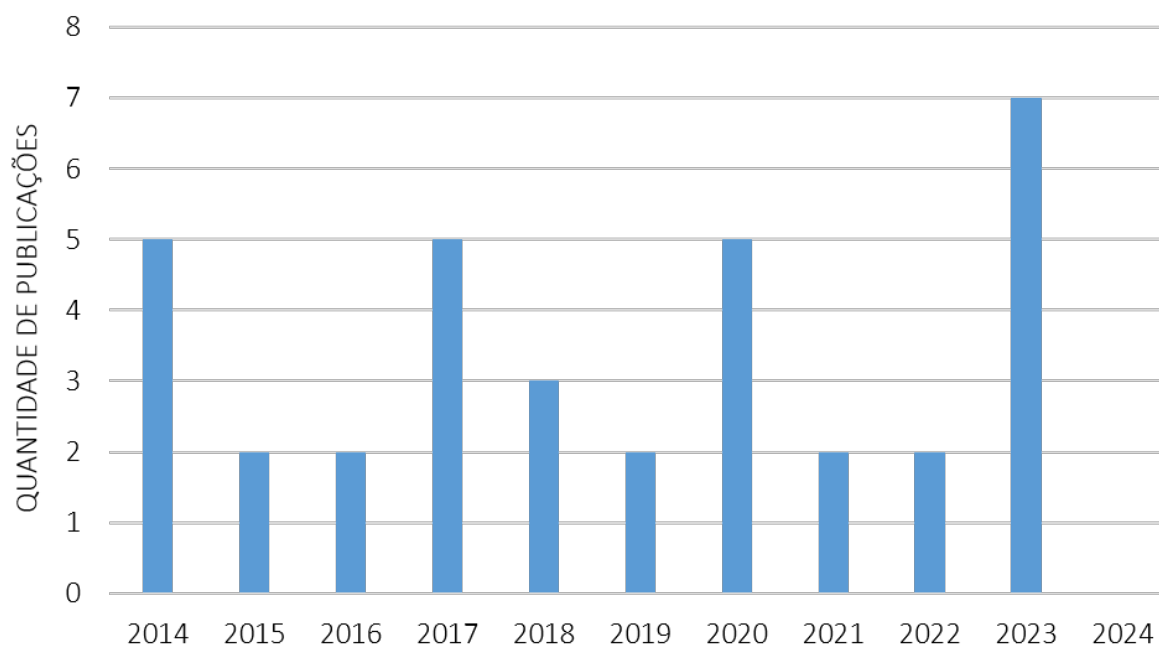
Por fim, a quantidade total de citações dos documentos foi de 730, o que gerou uma média de 20,86 citações por documento, destacando a relevância e o impacto dos trabalhos na comunidade acadêmica.

Uma análise mais aprofundada sobre a distribuição da quantidade de publicações por ano ao longo do intervalo de tempo estabelecido pode ser visualizada na figura 2 abaixo:

Até a realização da análise bibliométrica em questão (março/2024), não foram identificados documentos publicados no ano de 2024 que atendessem aos critérios de busca estabelecidos.

É importante ressaltar que os documentos analisados neste estudo devem ser complementados por pesquisas adicionais, uma vez que 35 documentos podem não ser suficientes para sustentar completamente uma dissertação. Portanto, outras fontes, como livros,

Figura 2 – Quantidade de publicações por ano



Fonte: Autor (com dados da análise bibliométrica [5])

capítulos de livros, sites com dados governamentais e outras fontes relevantes, foram utilizadas para enriquecer a bibliografia deste trabalho.

É crucial destacar que a revisão bibliográfica é um ponto de partida essencial para qualquer pesquisa acadêmica, fornecendo uma base sólida de conhecimento existente e direcionando a investigação para lacunas e áreas de interesse. No entanto, é necessário reconhecer as limitações inerentes à análise bibliométrica, como o tamanho limitado da amostra e a possível exclusão de fontes não indexadas. Portanto, a complementação com outras fontes de informação é crucial para garantir uma visão abrangente e robusta do tema em questão. Além disso, a análise bibliométrica não deve ser vista como uma etapa isolada, mas sim como parte integrante de um processo contínuo de pesquisa e construção do conhecimento científico.

Em suma, a revisão bibliográfica e a análise bibliométrica desempenham papéis essenciais na definição do contexto e na identificação de lacunas no conhecimento existente, fornecendo uma base sólida para a pesquisa acadêmica. Ao integrar dados quantitativos e qualitativos, essas ferramentas oferecem valiosas orientações para formulação de hipóteses, para seleção de metodologias e a interpretação dos resultados.

Assim, uma abordagem holística, combinando análise bibliométrica com pesquisa em outras fontes, é fundamental para uma investigação científica rigorosa e bem fundamentada.

CAPÍTULO 2: REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, são exploradas as bases teóricas que fundamentam a pesquisa. É apresentada uma revisão da literatura sobre os temas centrais do estudo, destacando teorias, modelos conceituais e descobertas anteriores que são essenciais para a compreensão e contextualização do problema de pesquisa.

2.1 Introdução à Geração de Energia Elétrica

Nesta seção são introduzidos conceitos sobre geração de energia e sustentabilidade do processo de geração, definição e diferenças entre fontes renováveis e não renováveis, além de um panorama da geração de energia elétrica em âmbito global, no Brasil e, especificamente, no estado do Espírito Santo, objeto de estudo dessa dissertação.

2.1.1 Sustentabilidade na geração de eletricidade

As definições de fontes renováveis e não renováveis se diferem em um ponto crucial: seu esgotamento com o uso contínuo. Fontes renováveis são caracterizadas por um ciclo de vida regenerativo rápido, se renovando em curtas janelas de tempo. Já fontes não renováveis têm como sua característica marcante o fato de não serem facilmente substituíveis ou regeneradas em uma escala de tempo humana [6].

Tendo em vista os efeitos adversos e os impactos ambientais negativos atrelados ao modelo de geração de energia elétrica atual, fica evidente a necessidade do processo de transição para fontes mais limpas e renováveis. Nesse contexto, nasce a importância da sustentabilidade no setor energético e elétrico, objetivando mitigar os efeitos negativos associados à geração de energia e eletricidade.

As fontes de energia tradicionais, como os combustíveis fósseis, têm desempenhado um papel central na matriz energética global por décadas. No entanto, sua combustão resulta na emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO_2), contribuindo significativamente para as mudanças climáticas [7]. Este impacto negativo ressalta a urgência de transitar para fontes de energia mais limpas e sustentáveis.

A adoção de fontes sustentáveis, como a solar, eólica, hídrica e geotérmica, não apenas reduz as emissões de poluentes, mas também contribui para a diversificação da matriz elétrica, aumentando a resiliência do sistema elétrico [6]. Além disso, a sustentabilidade na geração de energia está alinhada com metas globais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, que buscam assegurar padrões de vida dignos, reduzir a pobreza energética e promover práticas ambientalmente responsáveis [8].

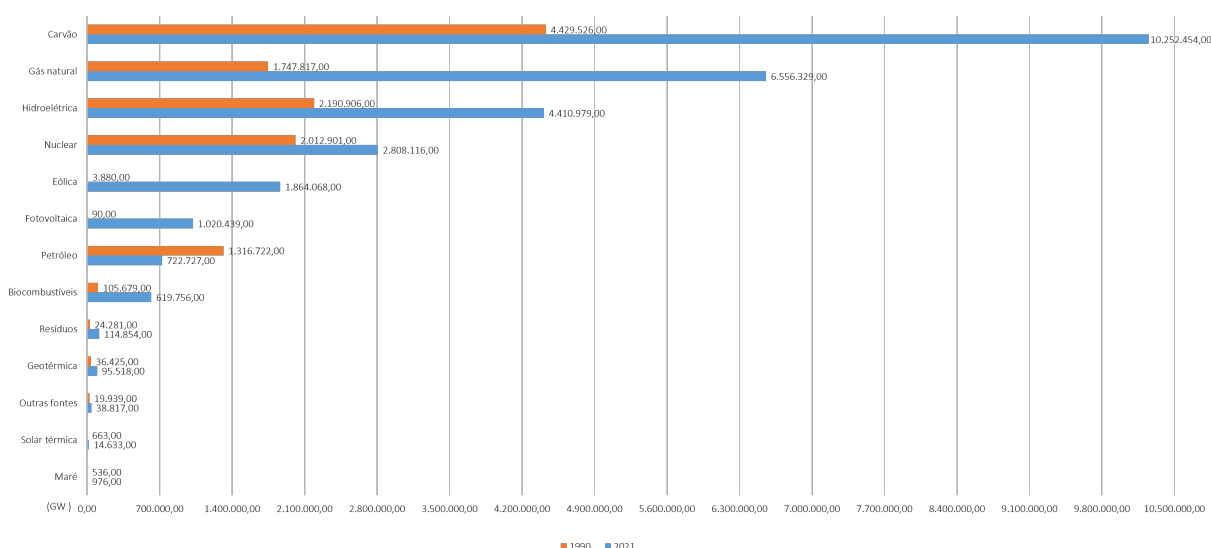
Em síntese, a promoção da sustentabilidade na geração de energia é um imperativo

para enfrentar os desafios ambientais e sociais do século XXI. Ao adotar práticas e tecnologias que priorizam a eficiência energética, o uso de fontes renováveis e a redução de impactos ambientais, é possível construir um futuro mais resiliente e equitativo.

2.1.2 Panorama global de geração de energia elétrica

Segundo a IEA [9], a energia elétrica mundial é gerada principalmente através da queima de combustíveis fósseis, sendo a primeira posição no *ranking* mundial pertencente à utilização do carvão. Em comparação com 1990, no ano de 2021 essa fonte representou mais de 35% de toda geração de energia mundial, como demonstrado na figura 3.

Figura 3 – Energia elétrica gerada mundialmente



Fonte: Autor (com dados da IEA [9])

Ainda que as proporções de geração de energia elétrica por fontes renováveis pareçam tímidas, em comparação com a década de 90, o salto foi significativo. Em apenas 30 anos, a geração de energia elétrica por fonte eólica aumentou em aproximadamente 411% e a fotovoltaica teve o expressivo salto de 9.153%. A geração hídrica pouco mais que dobrou e a geração por fonte geotérmica triplicou durante esse tempo. A geração de energia elétrica através do uso da biomassa também teve um aumento expressivo, de cerca de 5 vezes, no mesmo espaço de tempo [9].

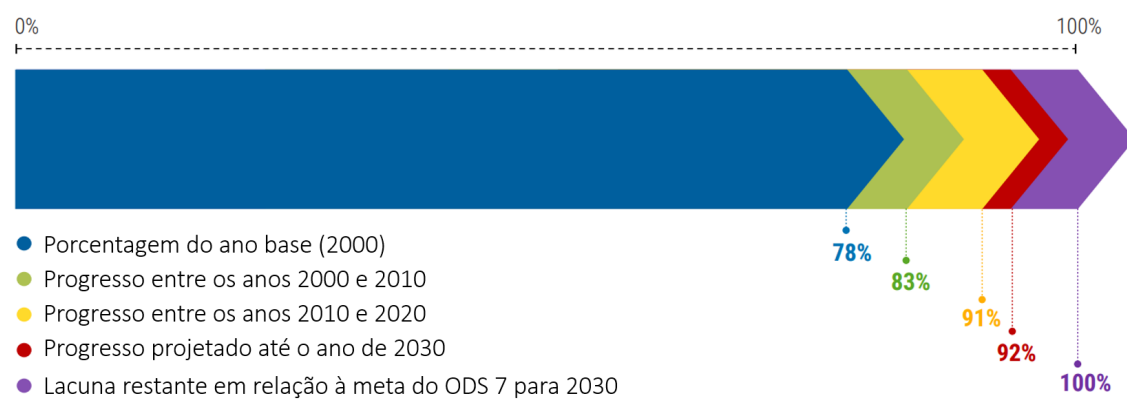
Apesar dos números encorajadores na geração de energia elétrica, é importante reconhecer que ainda existe uma parcela significativa da população global que não tem acesso adequado à eletricidade. Essa situação, conhecida como “pobreza energética” [9], afeta especialmente as comunidades mais vulneráveis em todo o mundo.

A pobreza energética está intimamente ligada à pobreza em geral, criando um ciclo de privação e limitando as oportunidades de desenvolvimento socioeconômico [9]. A falta de eletricidade dificulta a capacidade das pessoas de iluminar suas casas, cozinhar de forma segura, armazenar alimentos adequadamente e acessar informações vitais por meio da tecnologia.

De acordo com relatórios recentes de entidades governamentais relacionada com a ONU [10], cerca de 733 milhões de pessoas ainda vivem sem eletricidade, enquanto aproximadamente 2,4 bilhões ainda dependem de combustíveis prejudiciais à saúde e ao meio ambiente para cozinhar, sendo as áreas rurais da África Subsaariana e do Sul da Ásia as regiões com maior concentração dessa população. Além disso, muitas comunidades em regiões remotas enfrentam acesso irregular ou limitado à eletricidade, o que dificulta o funcionamento de serviços essenciais, como saúde, educação e comunicações.

Alarmantemente, mesmo com os esforços em andamento, projeções recentes indicam que, até 2030, cerca de 670 milhões de pessoas ainda permanecerão sem eletricidade, o que representa um déficit de 10 milhões em relação à meta do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável n° 7 (ODS 7) da ONU [10] (figura 4). Esses números destacam a urgência de intensificar os esforços globais para expandir o acesso à energia elétrica, garantindo que todos tenham a oportunidade de desfrutar de um fornecimento confiável e seguro de eletricidade, além de promover alternativas sustentáveis para o uso de combustíveis poluentes.

Figura 4 – Porcentagem de oferta de energia elétrica global até 2030



Fonte: The Energy Progress Report 2022 [10] (traduzido pelo autor)

Mesmo com o aumento na capacidade de geração de energia elétrica, as lacunas na infraestrutura e no acesso continuam a representar um desafio significativo, deixando muitos sem acesso a serviços básicos e oportunidades essenciais que a eletricidade pode proporcionar. Para enfrentar esse problema de maneira eficaz, são necessários esforços contínuos para expandir o acesso à eletricidade, especialmente em áreas rurais e remotas, garantindo que todos possam desfrutar dos benefícios de uma energia elétrica acessível e

confiável.

2.1.3 Panorama Brasileiro de geração de energia elétrica

No Brasil, a matriz elétrica é majoritariamente renovável, sendo essas fontes responsáveis por mais de 84% da geração de energia elétrica total do país, com cerca de 55% desse valor gerado através das hidrelétricas (figura 5) [4]. Esse valor supera, e muito, a média mundial de geração de energia elétrica por fontes renováveis, que gira em torno dos 33% [9].

Figura 5 – Matriz elétrica brasileira

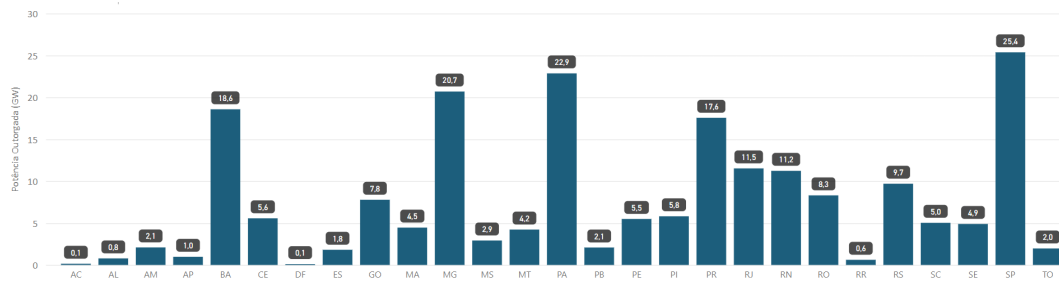


Fonte: ANEEL, 2023 [4]

A capacidade total de geração de energia elétrica do país é substancial, atingindo 371,26GW, com 202,50GW em operação atualmente. Esta capacidade é distribuída entre os diferentes estados federativos, refletindo a diversidade geográfica e econômica do Brasil, como visto na figura 6. Cada estado federativo contribui de forma única para essa capacidade, com uma combinação variada de fontes de energia, incluindo hidrelétricas, termelétricas, eólicas, solares e outras.

O RECAI - *Renewable Energy Country Attractiveness Index* (Índice de Atração dos Países à Energia Renovável, em tradução livre para o Português) (Figura 7) é um índice bianual que classifica os países de acordo com sua atratividade à utilização de energias renováveis. As classificações do índice refletem a avaliação dos fatores que impulsionam atratividade do mercado, em um mundo onde a energia renovável vai além da descarbonização e da dependência de subsídios. Esse índice recolhe e analisa informações de fundamentos como o imperativo energético, estabilidade política dos países, entrega de

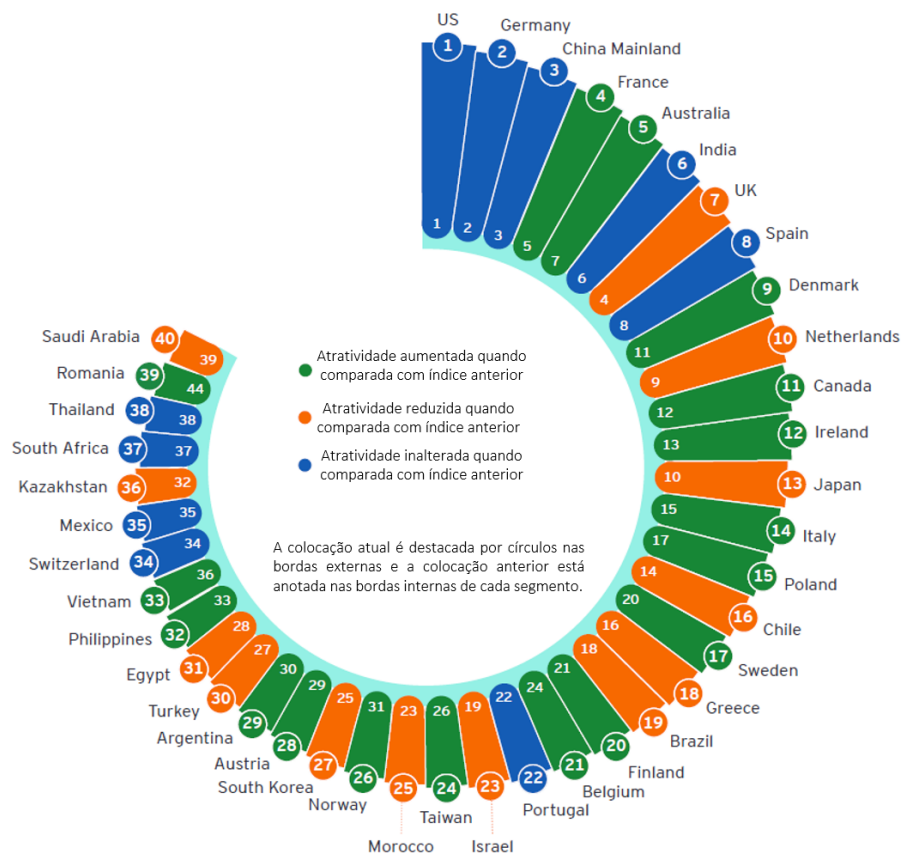
Figura 6 – Potência outorgada em operação, por estado federativo



Fonte: ANEEL, 2023 [4]

projetos de novas plantas de geração sustentável - incluindo disponibilidade de capital - e diversidade de recursos naturais presentes no país que estejam disponíveis para utilização [11].

Figura 7 – Classificação RECAI



Fonte: RECAI [11] (traduzida pelo autor)

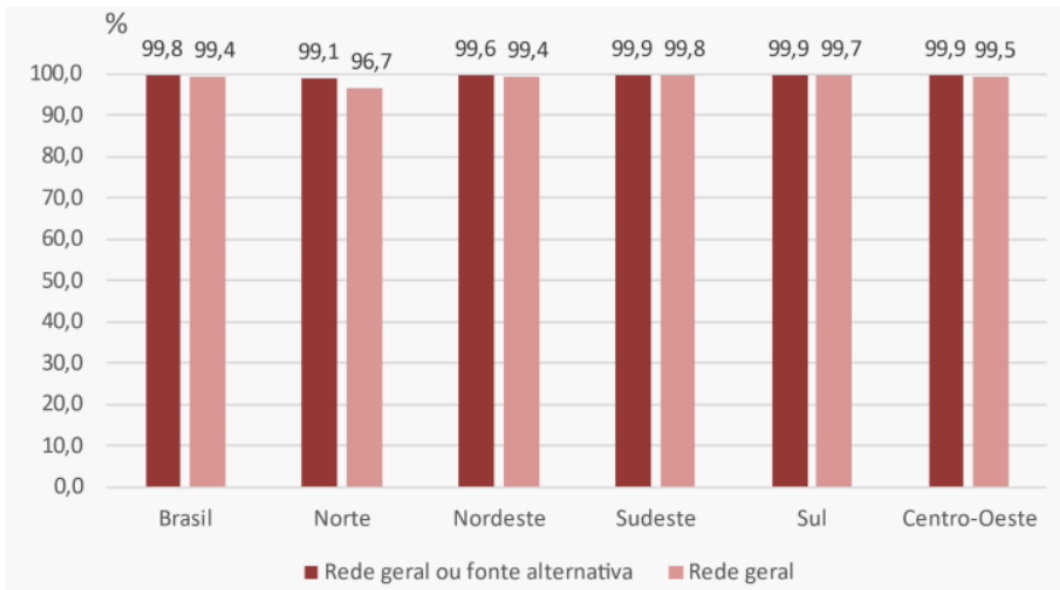
Na 62ª edição do relatório bianual, disponibilizado em novembro de 2023, o Brasil se encontra na 19ª posição do RECAI, tendo caído uma posição em relação ao relatório anterior (figura 7). Essa queda não necessariamente é um ponto negativo, pois o índice revela que isso ocorreu por conta de pequenas lacunas regulatórias com relação a geração

de energia solar fotovoltaica, que os avaliadores acreditam ter sido a causa da leve diminuição do potencial de energias renováveis do país, mas que não é considerado como ponto crítico para uma desaceleração do uso das fontes renováveis no país [11]. Isso pode ser visto através dos planos de utilização de renováveis no país. De acordo com a ANEEL [4], 2.914 novos empreendimentos que utilizam fontes renováveis (usinas hidrelétricas, termelétricas utilizando biomassa natural e resíduos urbanos, plantas fotovoltaicas e parques eólicos) estão liberados para iniciarem suas construções nos próximos anos, somando um total de cerca de 122GW de potência outorgada.

Analisando e comparando o Brasil com o restante do mundo, pode-se dizer que o mesmo está bem à frente com relação a geração de energia elétrica de forma sustentável e com grande potencial para melhorias. Sendo um país de extensão continental, tem um litoral propício para instalação de parques eólicos *offshore* e utilização do movimento das marés e ondas para geração de energia elétrica. Além disso, o país apresenta uma boa quantidade média de irradiação recebida em toda sua extensão territorial, sendo a maior intensidade nas regiões norte e nordeste, o que faz do país um excelente local para exploração de geração de energia elétrica por via solar térmica e fotovoltaica.

Com relação ao acesso dos brasileiros à energia elétrica, os dados também são animadores. Segundo os dados da Pesquisa Nacional por Amostragem Domiciliar (PNAD) [12], liberada em junho de 2023 (ano-base 2022) pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o acesso à energia elétrica nos domicílios atingiu cobertura praticamente universal, como mostra a figura 8.

Figura 8 – Porcentagem de acesso à energia elétrica no Brasil em 2022



Fonte: PNAD [12]

Os números revelam um cenário otimista em relação à disponibilidade de energia elétrica no Brasil, com uma ampla cobertura em todas as regiões do país. A Região

Norte, embora apresente o menor percentual de cobertura pela rede geral, ainda atinge impressionantes 96,7%, indicando um acesso generalizado à eletricidade.

Além disso, a análise por situação do domicílio revela que tanto em áreas urbanas quanto em áreas rurais, a grande maioria dos domicílios possui acesso à energia elétrica, constando-se uma cobertura elevada em ambas as áreas, com uma impressionante taxa de 99,9% nos domicílios urbanos e 99,0% nos domicílios rurais.

Na Região Norte, embora o percentual de domicílios rurais com acesso à eletricidade seja ligeiramente menor, atingindo 96,3%, é importante notar que a maioria desses domicílios ainda tem acesso à energia elétrica por meio da rede geral ou fontes alternativas (cerca de 85%). Esses dados refletem um progresso significativo na expansão da infraestrutura elétrica e demonstram um compromisso sólido com o desenvolvimento e o bem-estar da população brasileira.

2.1.4 Panorama de geração de energia elétrica do Estado do Espírito Santo

O estado do Espírito Santo, local estudado nessa dissertação, é um dos quatro estados que compõe a região Sudeste do Brasil, tendo área total de 46.074,447 km² ocupando a posição de quarto menor estado do país, considerando a sua extensão territorial. O estado tem uma faixa litorânea de cerca de 400 km, banhada pelo Oceano Atlântico [13].

Com relação a produção de energia elétrica, o estado tem potência outorgada em operação de 1,81GW, representando cerca de 0,89% do total gerado e em operação pelo Brasil [4]. A fonte de origem dos combustíveis utilizados para geração de eletricidade no estado são fóssil, hídrica, biomassa e solar, sendo os combustíveis e quantidade de empreendimentos geradores descritos na figura 9.

Figura 9 – Matriz elétrica do Espírito Santo por fonte



Fonte: ANEEL [4] (adaptado pelo autor)

O estado do Espírito Santo ainda apresenta uma forte dependência de fontes não renováveis na geração de energia elétrica, apesar de uma tendência de redução ao longo dos anos. Em 2012, a proporção de utilização de fontes não renováveis na matriz energética

do estado era de 89,9%. No entanto, ao longo do tempo, essa porcentagem diminuiu, alcançando uma taxa atual de cerca de 60% [14].

Com relação à biomassa, aproximadamente 17% da energia elétrica produzida no estado é proveniente da queima ou utilização de resíduos, como restos da produção de cana-de-açúcar e lixiviados [4, 14]. Essa fonte de energia renovável desempenha um papel significativo na matriz energética do Espírito Santo, contribuindo para a diversificação e para a redução da dependência de fontes não renováveis.

O aproveitamento dos resíduos de cana-de-açúcar e dos lixiviados não apenas ajuda a reduzir os impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses materiais, mas também promove a geração de energia limpa e sustentável, alinhada aos objetivos de desenvolvimento sustentável do estado.

Com relação a energia com fontes solares, segundo o *Global Solar Atlas* [15], o Espírito Santo tem incidência solar média diária de 3,82kWh/m², o que é um valor relativamente bom quando comparado com a média nacional, que é de 4,65kWh/m².dia, o que abre caminhos para geração de energia por meio de plantas termossolares e fotovoltaicas no estado.

Um estudo conduzido pela Federação das Indústrias do Espírito Santo (FINDES), em parceria com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [16], revela uma projeção de crescimento anual de 3,0% no consumo de eletricidade no estado, abrangendo o período de 2022 a 2030.

Além disso, a pesquisa identifica a existência de quatro projetos eólicos *offshore* com licenciamento ambiental em andamento no IBAMA, nomeadamente: ES 01 – Votu Winds; ES 02 – Vitória *Offshore* (Geradora Eólica Brigadeiro II); ES 03 – Quesnelia (*Bluefloat Energy* do Brasil); e ES 04 – Projeto Ubu (Shell Brasil). Outro dado relevante da mesma é o potencial energético oceânico estimado do Espírito Santo, que é de 5.940 MW, conforme estudos realizados pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE/UFRJ) e pela *Seahorse Wave Energy*.

2.2 Conceitos de Energia Renovável

A seção busca oferecer uma compreensão geral das tecnologias e tipos de fontes renováveis disponíveis para geração de energia e suas aplicações práticas, além de apresentar as vantagens significativas e os desafios associados ao tema, oferecendo uma visão crítica sobre o papel dessas fontes na transição energética global.

2.2.1 Energia renovável x energia limpa x energia alternativa

Existem diversas formas de geração de energia que são consideradas processos naturais

e ambientalmente corretos, pois não exploram nem esgotam nenhum recurso natural para gerar energia – são as chamadas “energias renováveis” ou “energia sustentável”. Esses processos utilizam fontes que fornecem uma alternativa de geração de energia elétrica mais limpa e de menor impacto ambiental, ajudando a reduzir os efeitos de certas formas de poluição e liberação de gases de efeito estufa [17].

Quando se discute energia renovável, é inevitável mencionar o termo “energia limpa”, embora, apesar de frequentemente usados como sinônimos, esses conceitos tenham definições distintas. Enquanto a energia renovável é derivada de fontes que podem ser regeneradas em um curto período de tempo e apresenta emissões quase nulas de gases de efeito estufa, como a biomassa, a energia limpa refere-se principalmente a fontes de energia com baixas ou nulas emissões de gases de efeito estufa, a maioria das quais é proveniente de recursos renováveis, como a energia solar e eólica [7].

Em meio a esses termos, surge ainda a noção de energia alternativa, que se refere a qualquer forma de energia que se diferencia das fontes convencionais, sem necessariamente causar impactos ambientais ou climáticos significativos. Um exemplo disso é o uso do etanol em regiões como a Europa ou a China, onde não é comum, tornando-se uma opção alternativa às fontes convencionais de energia [7]. Essa diversidade de termos reflete a complexidade do cenário energético global e a necessidade de adotar abordagens mais sustentáveis e ambientalmente conscientes na produção e consumo de energia.

2.2.2 Tipos de fontes de geração de energia renovável

A energia renovável, em sua maioria, tem origem no sol. A luz solar é aproveitada diretamente para aquecimento e iluminação, geração de eletricidade, aquecimento de água e uma variedade de usos comerciais e industriais. Além disso, o calor solar impulsiona os ventos, cuja energia é capturada por turbinas eólicas e transformada em energia elétrica. A evaporação causada pelo sol também contribui para o ciclo da água, onde a água evaporada eventualmente resulta em chuva e essa água em movimento é aproveitada em usinas hidrelétricas para gerar energia elétrica [17].

Junto com a luz do sol, os ventos e a chuva fazem com que as plantas cresçam. A matéria orgânica que compõe essas plantas é conhecida como biomassa e pode ser usada para produzir eletricidade, combustíveis para transporte ou produtos químicos. Um outro tipo de biomassa, os Resíduos Sólidos Urbanos - RSU, produzidos pelos seres humanos, também podem ser aproveitados para geração de energia elétrica [17].

Existem também fontes de energia oceânica que podem ser aproveitadas para a geração de eletricidade, tais como o movimento das marés, a energia das ondas do oceano e a diferença de temperatura entre a superfície e o fundo do mar, originada pelo aquecimento desigual provocado pela incidência solar [17].

Outros tipos de fontes também podem ser aproveitadas para geração de energia. A

energia geotérmica, por exemplo, aproveita o calor interno da Terra para produção de energia elétrica e o aquecimento e resfriamento de edifícios. Já a energia nuclear, se aproveita do calor produzido pela da colisão (fusão nuclear) ou separação (fissão nuclear) de pequenos pedaços de urânio e/ou plutônio para geração de energia. Além da energia gerada pelo hidrogênio, atualmente existem estudo para utilização do mesmo em células à combustível para geração de energia [17].

2.2.3 Vantagens e desafios da geração de energia por fontes renováveis

É notório que a fonte mais usada para geração de energia no mundo seja uma fonte não renovável. Desde a revolução industrial na segunda metade do século XVIII, quando o carvão começou a ser utilizado com mais intensidade para melhorar a viabilidade da utilização das máquinas à vapor, os combustíveis fósseis alavancaram de forma desequilibrada [18].

Essa necessidade de industrialização rápida gerou danos, alguns irreversíveis, para o planeta. A implantação de energia renovável tornou-se crucial em resposta ao aumento das emissões de gases de efeito estufa e ao aquecimento global. As políticas que apoiam a energia renovável desempenham um papel significativo nisso, como destacado por Gorji e Martek [19]. É claro que esse efeito positivo é diferente de acordo com o nível de desenvolvimento dos países.

Os autores ainda indicam que a utilização dos recursos renováveis constitui uma das fundações da transição energética, não apenas devido à redução das emissões de gases de efeito estufa na geração de energia, mas também devido ao incremento de sua competitividade em comparação aos combustíveis fósseis e na melhora no desenvolvimento de países dependentes de fontes não-renováveis.

A geração de energia por meio de fontes renováveis apresenta uma série de vantagens significativas. Em primeiro lugar, essas fontes são inesgotáveis e abundantes [20], o que as torna uma alternativa sustentável e ambientalmente amigável em comparação com os combustíveis fósseis, contribuindo assim para a mitigação das mudanças climáticas e para a melhoria da qualidade do ar.

Outra vantagem é a diversificação da matriz energética, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e aumentando a segurança energética [20].

O desenvolvimento dos Sistemas de Armazenamento de Energia Renovável - RESS (*Renewable Energy Storage Systems*, em inglês), baseados na reutilização e armazenamento de energia, também representa uma etapa crucial para aumentar a disponibilidade e confiabilidade da energia renovável. Esses sistemas proporcionam uma maneira confiável e eficiente de coletar, armazenar e distribuir energia de fontes renováveis em larga escala [21].

O potencial para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, fortalecer a segurança

energética e mitigar os impactos ambientais torna os RESS uma ferramenta essencial na luta contra as mudanças climáticas e, à medida que a tecnologia avança, esses sistemas continuarão a desempenhar um papel central na revolução da energia verde, oferecendo acesso a uma fonte de energia confiável, eficiente e economicamente viável.

No entanto, a geração de energia por fontes renováveis também enfrenta alguns desafios. Um dos principais desafios é a intermitência e variabilidade dessas fontes, que dependem de condições climáticas e sazonais específicas [20].

Além disso, a infraestrutura necessária para a geração de energia renovável pode exigir investimentos consideráveis em termos de tecnologia e logística, especialmente em regiões onde essas fontes são menos desenvolvidas.

Outras questões incluem a necessidade de políticas de incentivo e regulamentações adequadas para promover o desenvolvimento e a adoção de energia renovável, bem como a gestão dos impactos ambientais associados à construção e operação de instalações de energia renovável, como o uso de terra e os efeitos sobre a vida selvagem e os ecossistemas locais.

2.3 Transição Energética

Esta seção aborda os aspectos essenciais da definição e importância desse processo fundamental para a sustentabilidade ambiental e socioeconômica que é a transição energética. Por meio da análise das políticas públicas e estratégias destinadas a impulsionar a transição energética, esta seção busca oferecer uma compreensão abrangente das medidas necessárias para promover uma mudança efetiva em direção a fontes de energia mais limpas e renováveis.

2.3.1 Definição e importância da transição energética

A emergência e a complexidade das mudanças climáticas têm se destacado como uma preocupação constante nas agendas socioeconômicas e políticas em âmbito global. Na tentativa de buscar soluções mais responsáveis e alinhadas com a preservação ambiental, visando a otimização das perspectivas para uma transição rápida em direção à energia limpa, uma oportunidade significativa tem surgido com o movimento de transição energética.

A transição energética para fontes renováveis desempenha um papel fundamental na redução das emissões de gases de efeito estufa associadas à geração de energia, além de impulsionar a competitividade em comparação com os combustíveis fósseis.

Além das fontes de energia renovável diretamente obtidas da natureza, como solar e eólica, a biomassa também desempenha um papel significativo, embora sua geração de

energia envolva a queima de materiais orgânicos, resultando na liberação de CO_2 . No entanto, as emissões decorrentes da queima de biomassa são amplamente compensadas, uma vez que as plantas absorveram o CO_2 durante seu ciclo de crescimento [7].

A transição energética para uma economia de baixo carbono vai muito além de somente uma mudança nas fontes e geração de energia, ela está ligada também a uma profunda transformação de padrões sociais de consumo de energia.

2.3.2 Políticas públicas e estratégias para transição energética

A mitigação das emissões de gases de efeito estufa frequentemente depende da utilização de fontes de energia mais limpas, que emitem pouco ou nenhum CO_2 na atmosfera. Além da transição energética, a neutralização das emissões envolve uma variedade de outros fatores, incluindo a modificação de processos industriais, a gestão eficiente de resíduos e a utilização sustentável da terra. É essencial compreender que a transição para uma economia de baixo carbono é um processo gradual que nos conduz ao objetivo final desejado.

Segundo dados da IEA [20], a matriz energética global está em processo de transformação significativa pelos próximos cinco anos, com a adição iminente de mais de 3.700GW de capacidade instalada gerada por fontes renováveis entre 2023 e 2028. Esse impulso é resultado de políticas de apoio adotadas por mais de 130 países durante a última convenção do clima da ONU.

Ao longo desses cinco anos, se as políticas públicas forem devidamente aplicadas, prevê-se que a energia eólica e a solar fotovoltaica superarão a geração hidrelétrica, as energias renováveis ultrapassarão o carvão em 2025 como a principal fonte de eletricidade global, e, em 2028, contribuirão com mais de 42% da geração global, com a energia eólica e solar fotovoltaica dobrando para 25% [20].

Por meio das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs), dispostas no Acordo Climático de Paris, o Brasil assumiu o compromisso de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em 37% abaixo dos níveis de 2005 até 2025, com uma contribuição subsequente indicativa de redução em 43% abaixo dos níveis de 2005 até 2030 [22].

Segundo relatório apresentado por Thiago Barral, Secretário Nacional de Transição Energética e Planejamento do Brasil [23], a Política Nacional de Transição Energética abarca uma variedade de objetivos e diretrizes essenciais. Isso inclui a promoção de uma industrialização em bases renovadas, mais sustentáveis e tecnológicas, bem como o combate à pobreza e a promoção da inclusão social. Além disso, busca-se impulsionar o desenvolvimento socioeconômico, criando oportunidades de emprego. A participação social ativa e a valorização da diversidade também são aspectos importantes. A política visa ainda mitigar as emissões de carbono, reduzir o desmatamento e fomentar a economia verde. Por fim, destaca-se a necessidade de adaptação climática para lidar com os impactos

das mudanças climáticas.

A integração de políticas públicas, investimentos em pesquisa e desenvolvimento, e a colaboração entre diversos setores da sociedade são fundamentais para impulsionar essa transição rumo a um sistema energético mais sustentável e responsável. Essa abordagem não apenas contribui para mitigar as mudanças climáticas e preservar os recursos naturais, mas também promove o desenvolvimento econômico e social de forma inclusiva e duradoura.

Segundo o Plano de Descarbonização do Espírito Santo [24] o governo do estado pretende neutralizar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) emitidos pelo estado até 2050. Para tal feito, o plano conta com 7 diretrizes para mitigação, sendo elas: Geração de eletricidade com fontes limpas e maximização de potencial (EI1); Emprego de biocombustíveis e novos combustíveis (EI2); Ecossistema de Negócios e Infraestrutura para Energias Renováveis (EI3); Indústria de baixo carbono (EI4); Edificações de baixo carbono (EI5); Estímulo a medidas de compensação de emissões de GEE (EI6); e Desenvolvimento da captura, utilização e armazenamento de CO₂ (EI7).

As medidas EI1 e EI2, especialmente, podem ser atendidas com sucesso por uma usina de geração de energia híbrida termossolar-biomassa, pois envolvem tanto a geração de energia solar, conforme detalhado na EI1, quanto a destinação adequada de RSU, conforme descrito na EI2.

A medida EI1 visa integrar iniciativas que promovam o crescimento rápido do setor de geração de eletricidade por fontes renováveis, com foco nas fontes eólicas e solares. Para fontes solares, medida EI1.2 do plano, essa abordagem não apenas amplia o número de pequenos produtores de energia elétrica, mas também aumenta o apelo para projetos de geração de médio e grande porte, com foco em tecnologias tanto fotovoltaicas, quanto de concentração solar. Com a adoção desta medida para fontes solares, existe um potencial de mitigação de até 1,189 milhões de toneladas de CO₂ por ano.

Já a medida EI2 visa a utilização biocombustíveis, como hidrogênio, biomassa e gás natural como insumos térmicos na indústria. Tendo em vista que o potencial de produção de biogás e biometano a partir de RSU e RAS (resíduos agrossilvopastoris) no Espírito Santo é bastante significativo, a medida EI2.2 do plano instiga a utilização desses resíduos como insumos e/ou combustíveis para indústrias e geração de energia elétrica, tendo um potencial de redução de emissões de GEE próximo à 2,7 milhões de toneladas de CO₂ por ano.

A implantação de uma usina híbrida termossolar-biomassa representa uma convergência estratégica entre as duas medidas, promovendo a meta de descarbonização do estado. Com a adoção de medidas de incentivo e financiamento para tal empreendimento, as taxas de mitigação de emissão de GEE podem ser alcançadas dentro dos padrões e prazos esperados.

A trajetória de transição deve incorporar tanto os aspectos tecnológicos quanto os

econômicos e sociais. Um processo de transição bem gerido pode fomentar o desenvolvimento econômico de setores que se beneficiam das oportunidades oferecidas pela economia global descarbonizada. Dessa forma, a abordagem multidimensional da transição energética não só promove a sustentabilidade ambiental, mas também estimula o crescimento econômico e a inclusão social.

2.4 Energia Térmica Solar

A seção explora as diversas tecnologias de conversão térmica solar, para captura e utilização da energia solar para a geração de calor e eletricidade. Dentro deste escopo, serão discutidos os diferentes tipos de coletores solares e a integração dessas tecnologias à rede elétrica, destacando os desafios e oportunidades associados à inserção da energia solar térmica na matriz energética.

2.4.1 Definição de irradiação solar

A irradiância é a magnitude usada para descrever a potência por unidade de área, geralmente descrita na unidade de kW/m^2 . Já a irradiação é conceituada como a quantidade de energia incidente (Wh) em uma determinada superfície (m^2) ao longo de um intervalo de tempo, sendo sua unidade de medida expressa em Wh/m^2 por uma unidade temporal, como dias, meses ou anos [25].

As vantagens da energia solar incluem, além de ser uma fonte gratuita, o baixo impacto ambiental de sua instalação, pois não envolve a emissão de poluentes. A energia gerada pode ser armazenada e utilizada como fonte de alimentação em residências, especialmente em áreas rurais e afastadas. No entanto, sua competitividade limitada no momento, devido ao desempenho ainda não otimizado das tecnologias atuais, se revela como principal impedimento de uso, além de investimentos iniciais elevados e grandes espaços para a instalação de painéis/coletores, o que pode ser um fator limitante em regiões densamente povoadas ou com restrições de uso do solo [25].

A irradiação solar pode ser classificada em três tipos principais: irradiação normal direta (DNI - *Direct Normal Irradiation*), irradiação difusa (DHI - *Diffuse Horizontal Irradiation*) e irradiação global (GHI - *Global Horizontal Irradiation*).

A DNI, também conhecida como radiação de feixe, refere-se à irradiação solar que atinge a superfície da Terra sem sofrer alteração na direção. Por outro lado, a DHI é aquela que alcança a superfície terrestre após ser dispersa na atmosfera, vindo de todas as direções. Geralmente seu valor é menor que a DNI por conta da dispersão. A GHI, por sua vez, é a soma da radiação de feixe e da radiação difusa, representando a totalidade da radiação solar recebida em determinado local [26].

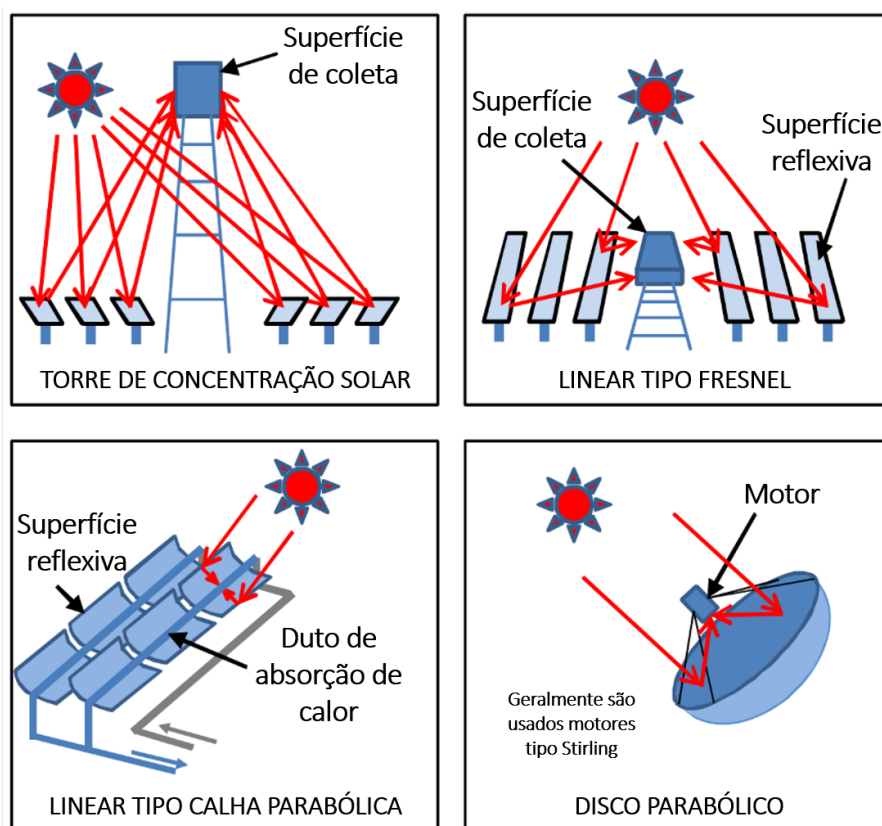
2.4.2 Tecnologias de conversão solar

Existem duas modalidades predominantes de aproveitamento da irradiação solar, sendo elas através da abordagem fotovoltaica e térmica.

No método fotovoltaico, a energia é produzida por meio de painéis que absorvem a radiação solar e a convertem em energia elétrica mediante o emprego de dispositivos conversores. Por outro lado, na modalidade térmica, a irradiação é captada para aquecimento de um fluido de transferência de calor, conhecido como HTF (*Heat Fluid Transfer*), que é então utilizado para a geração de energia através de algum ciclo de potência, geralmente Rankine ou Brayton [26].

Com relação à aplicação térmica, a tecnologia de concentração solar, ou CSP - *Concentrated Solar Power* -, pode ser implementada por meio de quatro técnicas distintas, conforme ilustrado na figura 10. A maioria das aplicações, como calor para processos industriais, refrigeração ou condicionamento de ar por ciclo de refrigeração por absorção e geração de energia por ciclo de vapor ou gás, está na faixa de 800°C a 2500°C , enquanto a tecnologia solar concentrada pode ser utilizada.

Figura 10 – Tecnologias de concentração solar



Fonte: Rick Sturdivant e Edwin Chong [27] (traduzido pelo autor)

Sturdivant e Chong [27] explicam que o método da torre solar emprega refletores, geralmente espelhos, posicionados abaixo e ao redor de um coletor de calor principal

montado em uma torre. Nesse processo, a energia solar é refletida em direção à torre, onde é coletada e transferida para o HTF, aquecendo o fluido de trabalho.

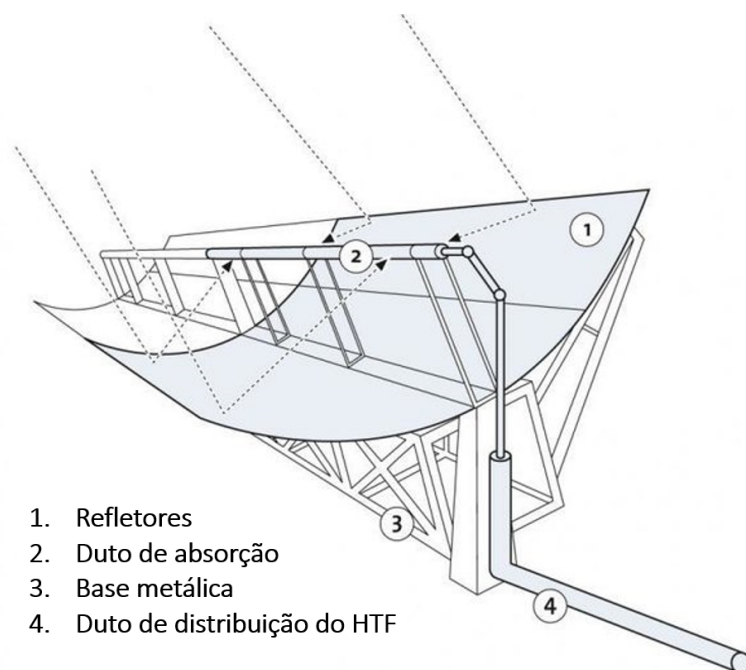
Os autores descrevem o método Linear tipo Fresnel - LFR (*Linear Fresnel Reflector*), como um método que utiliza uma matriz linear contínua de refletores para direcionar a irradiação solar a um coletor de calor central, por onde passa o HTF, aquecendo-o.

Tem-se também, no mesmo estudo, a abordagem do disco parabólico, que utiliza um dispositivo de disco, semelhante a uma grande antena parabólica, e um motor de conversão de calor para gerar eletricidade, sendo esse motor geralmente do tipo Stirling. O método não utiliza fluido de trabalho e converte diretamente calor em eletricidade.

Por fim, os autores destacam também a metodologia de coletores cilíndrico-parabólicos - PTC, sigla para *Parabolic Trough Collectors*, nos quais calhas refletoras compridas e levemente curvada, em forma de parábola, concentram a energia solar em coletores de calor (como dutos) que transportam o HTF, que é aquecido ao longo do trajeto e posteriormente encaminhado para distribuição (figura 11).

A metodologia PTC se distingue do método LFR na organização e disposição dos refletores. Enquanto no LFR os espelhos permanecem fixos ao solo, concentrando o calor em dutos externos, no PTC, os dutos são integrados aos espelhos, os quais possuem uma estrutura metálica base que permite o movimento em sincronia com a trajetória solar. Isso resulta em um aquecimento mais eficaz do HTF e em uma menor dispersão de calor [28].

Figura 11 – Coletor tipo Calha Parabólica - PTC



Fonte: Patrick Hubert Wagner [28] (traduzido pelo autor)

A energia solar concentrada possibilita a produção de energia de maneira confiável, estável, segura, eficiente e sustentável, uma vez que reduz, ou até mesmo elimina por

completo, as emissões poluentes de gases de efeito estufa, durante a operação do equipamento. Uma das principais vantagens dos sistemas de energia solar concentrada é sua capacidade de hibridização com outras fontes de energia e de armazenamento da energia solar na forma de calor, permitindo a geração de eletricidade conforme necessário e complementando e ajustando o fornecimento de calor solar, que é naturalmente variável [29].

A eficiência de uma usina de energia solar térmica é determinada pelo produto da eficiência do campo de coletores e da eficiência do ciclo de vapor. A eficiência do coletor depende do ângulo de incidência da luz solar e da temperatura no tubo absorvedor, podendo atingir até 75%. A eficiência do ciclo de vapor tem a influência mais significativa na eficiência geral do sistema, sendo geralmente em torno de 35% [25]. Com esses dados, o valor da eficiência global de uma usina nesses parâmetros pode chegar em torno de 26%.

2.4.3 Ciclos de geração de potência

Com relação aos ciclos de potência que podem ser empregados, o ciclo Rankine é amplamente reconhecido como ideal para operações envolvendo vapor e mudanças de fase, enquanto o ciclo Brayton é mais adequado para situações em que não ocorre mudança de fase, mantendo o fluido em estado vaporoso contínuo.

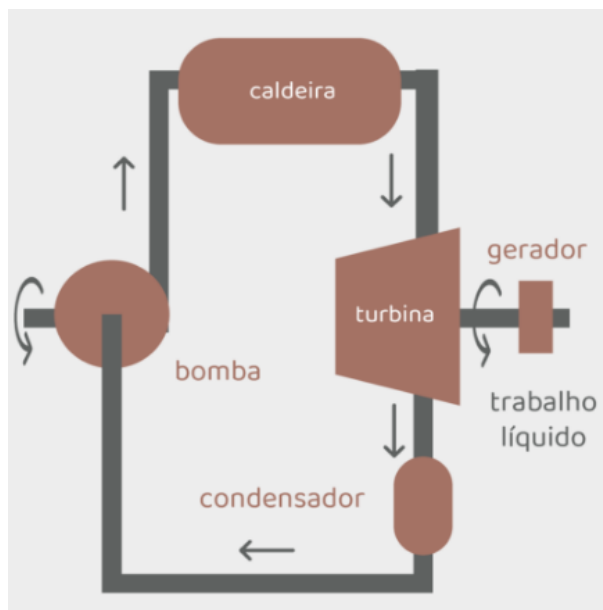
O ciclo Rankine, representado na figura 12, é um ciclo fechado que utiliza a água como fluido de trabalho. Nele, a água é bombeada para uma caldeira e é aquecida até virar vapor. O vapor, por sua vez, expande em uma turbina cujo eixo está conectado a um gerador, que é acionado, transformando energia mecânica em elétrica. Após perder temperatura e pressão no processo de expansão, esse vapor é encaminhado para o condensador, onde retorna ao estado líquido e reinicia o ciclo [30]. É comum neste ciclo a implementação de melhorias visando aumentar sua eficiência, tais como compressão ou expansão em múltiplos estágios e reaquecimento da água/vapor entre esses estágios.

Em sistemas solares térmicos, essa caldeira pode ser substituída por trocadores de calor que transportam HTF aquecido em campos solares compostos por PTCs ou LRFs.

No entanto, o processo de condensação do ciclo Rankine geralmente demanda uma considerável quantidade de água, pois depende da troca de calor entre a água do ciclo (quente) e a água corrente (fria) para sua condensação. Em situações em que o suprimento de água é limitado, pode-se recorrer ao uso de uma torre de resfriamento [32]. Contudo, é importante notar que a descarga de água morna ou quente proveniente do ciclo pode ocasionar poluição térmica nos corpos d'água, sendo necessário seguir as diretrizes ambientais locais.

Já o ciclo Brayton, representado na figura 13 tem um funcionamento diferente, pois é considerado um ciclo aberto e utiliza o ar como HTF. O ar inicia sendo comprimido em um compressor e vai para uma câmara de combustão, onde ocorre a mistura com o combustível e gera um gás de combustão, gás esse que vai para um processo de expansão,

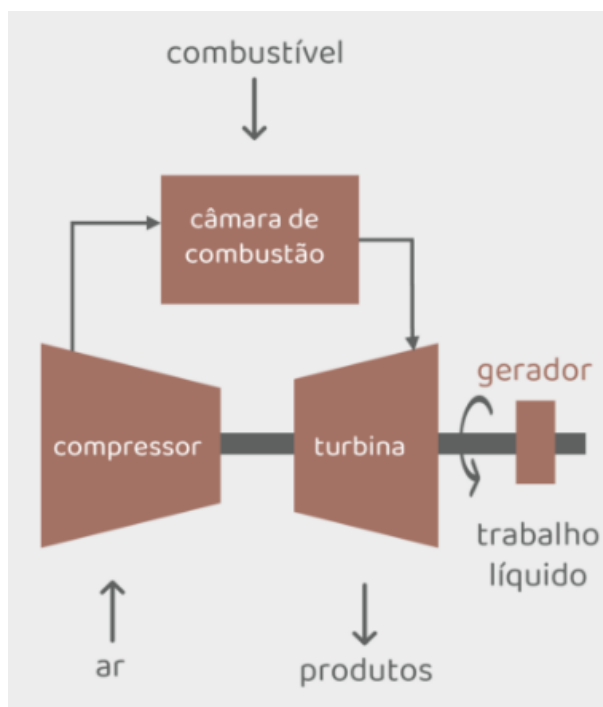
Figura 12 – Esquema básico do ciclo de Rankine



Fonte: João Lucas Soares [31]

com princípio semelhante ao ciclo anterior com a turbina conectada ao eixo do gerador para gerar eletricidade [30].

Figura 13 – Esquema básico do ciclo de Brayton



Fonte: João Lucas Soares [31]

São comuns ciclos com pelo menos dois estágios de expansão (2 turbinas), onde o gás que sai da primeira turbina pode ser reaquecido utilizando trocadores de calor com HTF

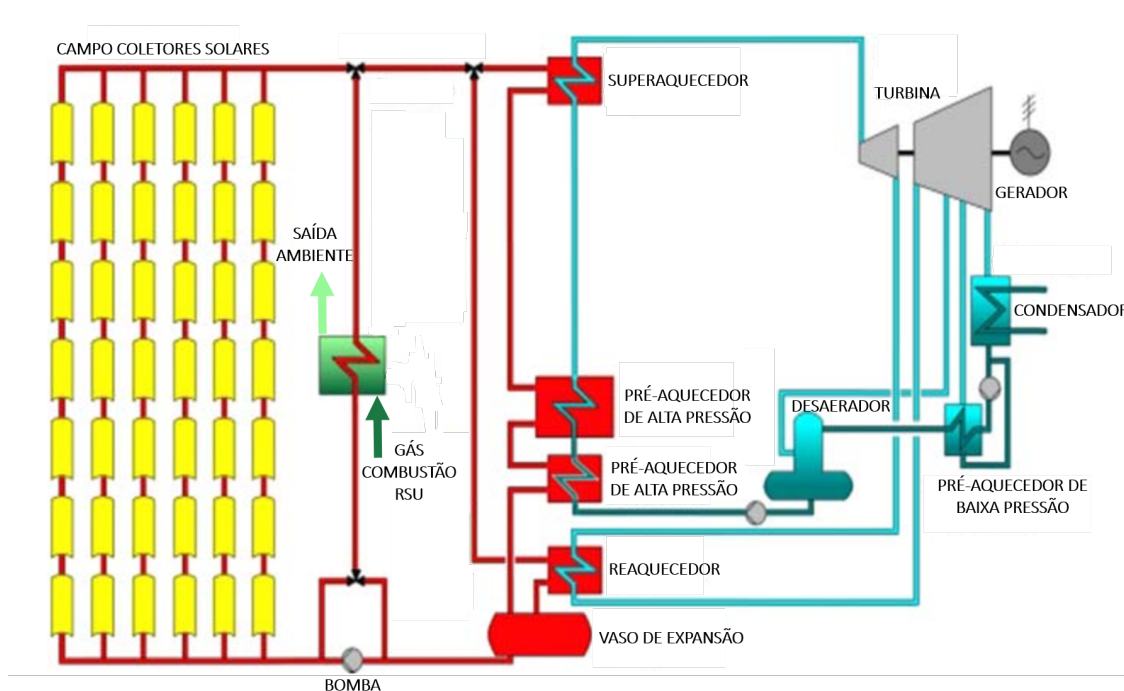
aquecido por tecnologias de concentração solar, como os PTCs e LRFs, antes de entrar na segunda turbina para realizar a próxima expansão.

É comum a associação dos ciclos Brayton e Rankine, formando o que é conhecido como "ciclo combinado". Nesse arranjo, os gases quentes provenientes da turbina (Brayton) são empregados para aquecer a água na caldeira do ciclo Rankine, proporcionando um processo mais eficiente [30].

Os ciclos de potência, especialmente o ciclo Rankine, são frequentemente otimizados pela adição de diversos equipamentos auxiliares. A eficiência desse ciclo pode ser substancialmente aumentada com a introdução de pré-aquecedores, que utilizam o calor do vapor extraído da turbina para pré-aquecer a água de alimentação antes de entrar na caldeira, reduzindo a quantidade de combustível necessária para aquecer a água à temperatura de ebulição e, assim, aumentando a eficiência global do ciclo. O desaerador é outro equipamento crucial, responsável por remover gases dissolvidos na água de alimentação, como oxigênio e dióxido de carbono, que podem causar corrosão nos componentes da caldeira e turbina. A eliminação desses gases melhora a confiabilidade e a vida útil do sistema.

A figura 14 representa um diagrama de uma planta híbrida com um ciclo Rankine aprimorado com a inclusão de vários componentes auxiliares. Ao reutilizar o calor do vapor extraído e remover gases prejudiciais, o sistema reduz a necessidade de energia adicional e minimiza perdas, resultando em uma operação mais eficiente e sustentável.

Figura 14 – Esquemático de planta híbrida com ciclo de potência



Fonte: [25] (adaptado e traduzido pelo autor)

Durante o período em que há sol, os coletores solares térmicos utilizam o calor proveniente dele para aquecer um fluido térmico, que então transfere calor para a água no

ciclo de potência, gerando energia mecânica que é posteriormente convertida em energia elétrica. Durante períodos sem irradiação solar, o RSU é utilizado, sendo incinerado, e o gás proveniente deste processo é o que aquece o fluido térmico nesse período para que o sistema continue a gerar energia elétrica continuamente. A combinação de tecnologias solares e processos térmicos exemplifica uma abordagem híbrida que maximiza a utilização de recursos energéticos renováveis.

2.5 Biomassa na Geração de Energia

A seção aborda definições e conceitos fundamentais relacionados à biomassa, incluindo sua origem e composição. Além disso, são abordados os diferentes tipos de biomassa utilizados para geração de energia e apresentadas as principais rotas para conversão da biomassa em energia, destacando suas aplicações e eficiência.

2.5.1 Definição de biomassa

Há pouco mais de um século, iniciou-se um declínio na predominância histórica da biomassa como fonte energética, sendo gradualmente substituída pelo carvão, seguindo a revolução industrial. Posteriormente, com o advento do petróleo e do gás natural e seu crescimento contínuo e quase exponencial, a utilização da biomassa foi progressivamente relegada, quase que exclusivamente, às residências privadas localizadas em regiões rurais e campestres.

O conceito de biomassa foi introduzido pelo Doutor em Física e Ciências Eugene Adam como um conjunto de matéria orgânica produzida por organismos vivos, ou com capacidade regenerativa de curto prazo, a partir da absorção de nutrientes do solo e energia solar, passando por todas as etapas da cadeia trófica [33]. Pode-se então perceber que, mesmo que os combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural advenham de matéria orgânica natural, não se enquadram como biomassa por sua natureza não ser regenerativa de curto prazo.

Os combustíveis fósseis são provenientes de matéria orgânica decomposta ao longo de milhões de anos, enquanto a biomassa e seus derivados são obtidos a partir de materiais orgânicos recentemente coletados, onde ocorre a absorção de carbono durante o cultivo desses materiais, por meio do processo de fotossíntese, o que compensa as emissões de carbono durante a queima para geração de energia [7].

2.5.2 Tipos de biomassa para geração de energia

Com base nos conceitos apresentados, a biomassa como fonte de energia renovável

refere-se a materiais biológicos vivos ou mortos recentemente, que podem ser usados como combustível ou para produção industrial, como matéria vegetal ou animal usada para a produção de fibras, produtos químicos, potência ou calor. Nesse quesito, a biomassa para geração de energia também inclui Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) e resíduos industriais biodegradáveis que podem ser queimados e utilizados como combustível ou fonte de calor [17].

Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são os restos das atividades humanas, considerados como indesejáveis ou descartáveis, caracterizados pelos diversos impactos negativos ao ser humano e ao meio ambiente quando descartados de maneira incorreta [34]. São inclusos nessa definição lixo doméstico, lixo de serviços de limpeza urbana, e lixo industrial/comercial. Sua geração está diretamente relacionada ao local onde as atividades são realizadas, isto porque a produção de resíduos é resultado direto do processo de aquisição e consumo de bens e produtos das mais diversas naturezas [35].

Seguindo a definição apresentada, a biomassa abrange qualquer material residual gerado por atividades humanas ou processos naturais. Dada a quantidade substancial de resíduos gerados pelas atividades humanas, é razoável assumir que o RSU é produzido em volumes significativos e não há previsão para a redução em sua geração, devido aos padrões atuais de vida da sociedade.

Geralmente, RSU é composto por materiais orgânicos (degradáveis e não degradáveis) e materiais inorgânicos. Se esses materiais inorgânicos forem descartados no ambiente, podem levar centenas de anos para se decompor, e sua acumulação contribui para a redução da vida útil do aterro sanitário [35].

Portanto, de certa forma, sua utilização como fonte de geração de energia pode ser considerada contínua, o que não apenas ajudaria a diminuir a quantidade de RSU nas cidades, mas também contribuiria para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) liberados na atmosfera, auxiliando assim na mitigação das mudanças climáticas.

2.5.3 Rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa

Existem basicamente duas grandes categorias de rotas tecnológicas para geração de energia através da biomassa: um é baseado em processos biológicos e o outro é baseado em processos térmicos [36].

Em processos biológicos, como digestão anaeróbia ou fermentação, microrganismos são utilizados para “digestão” ou decomposição de material biológico, tendo como produto desse processo geralmente o biogás, rico em gás metano (CH_4) [27]. Esse gás tem alto poder calorífico e pode ser utilizado para queima em motores à combustão, depois de passado por processos de purificação e dessulfurização.

Os processos térmicos incluem a combustão, a gaseificação e a pirólise. A pirólise e a gaseificação utilizam calor para decompor material orgânico em temperaturas elevadas

e ambientes pobres ou ausentes de oxigênio para produzir gás de síntese (*syngas*), sem que o material entre em processo de queima [37]. Os gases gerados, além de poderem ser queimados diretamente em motores à combustão (desde que sejam submetidos a um processo de purificação e limpeza) podem ser aplicados nos mesmos dois ciclos mencionados na seção anterior [38].

Já a combustão é um processo em que a biomassa sólida é queimada em câmaras de combustão para gerar gases de exaustão em altas temperaturas que são utilizados em processos ou para aquecimento de fluidos de trabalho [37, 39].

No caso dos ciclos Rankine, os gases quentes resultantes dos desse processo têm a capacidade de aquecer a água do ciclo, através de trocadores de calor. Por outro lado, nos ciclos Brayton, esses gases podem ser empregados para expansão direta na turbina em ciclos conhecidos como EFGT (*External Fire Gas Turbine*; em português, Turbinas a Gás de Queima Externa) ou utilizados em processos de reaquecimento, conforme também mencionado anteriormente [38].

A eficiência global de geração de energia elétrica com turbina a gás utilizando incineração de biomassa geralmente oscila entre 15% e 30%, podendo gerar até 50MW em apenas uma planta [40]. Apenas uma fração reduzida da energia total derivada da combustão da biomassa é efetivamente convertida em eletricidade.

Já para gaseificação, quando o sistema emprega ciclos a vapor para a produção de energia, a eficiência global geralmente varia de 9% a 20%, sem reaproveitamento de calor residual. Quando um motor a gás é utilizado, a eficiência global fica em torno de 13% a 24%, o que ainda fica aquém de alcançar eficiências mais altas em comparação com a incineração direta. Somente com a implementação de uma Turbina a Gás de Ciclo Combinado - CCGT (*Combined Cycle Gas Turbine*, em inglês) é possível obter melhores resultados, variando aproximadamente de 22% a 26% [37].

Os Sistemas de Cogeração, ou *Combined Heat and Power* (CHP), concentram-se na captura desse calor excedente para aplicações práticas. A otimização da eficiência na produção de energia pelos sistemas CHP não apenas resulta em economias nos custos de energia, mas também contribui para a redução do desperdício de calor e das emissões de CO₂ [38].

As diferentes abordagens de conversão energética para biomassa oferecem oportunidades únicas para aproveitar o potencial dessa fonte de energia renovável. Além disso, a integração de políticas de incentivo, investimentos em infraestrutura e a colaboração entre o setor público e privado são essenciais para impulsionar a adoção dessas rotas tecnológicas e acelerar a transição para um sistema energético mais limpo e sustentável.

2.6 Usinas Híbridas

Nesta seção, é abordado o conceito e o funcionamento das usinas híbridas, que combinam diversas tecnologias, como solar, eólica, biomassa, entre outras, com o objetivo de otimizar a eficiência energética e reduzir os impactos ambientais. Além disso, são apresentados projetos e estudos realizados em diferentes partes do mundo que exploram o potencial e as aplicações desses sistemas híbridos.

2.6.1 Conceito e classificação de usinas híbridas

Larazov [41] define usinas híbridas quando há a utilização de uma ou mais fontes renováveis ou não renováveis combinadas em um único sistema podendo estar conectado ou não a uma rede de distribuição central.

A distinção entre as diversas combinações possíveis é crucial na análise dos benefícios e impactos de cada solução. Em particular, é essencial esclarecer a diferença entre usinas verdadeiramente híbridas e aquelas que simplesmente compartilham infraestrutura ou acordos contratuais. Existem 4 modelos definidos como “híbridos” pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE): Usinas adjacente, usinas associadas, usinas híbridas e Portfólios Comerciais [42].

De acordo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [43], existem dois contratos importantes quanto à geração e distribuição de energia elétrica no país, o CUST e o CUSD.

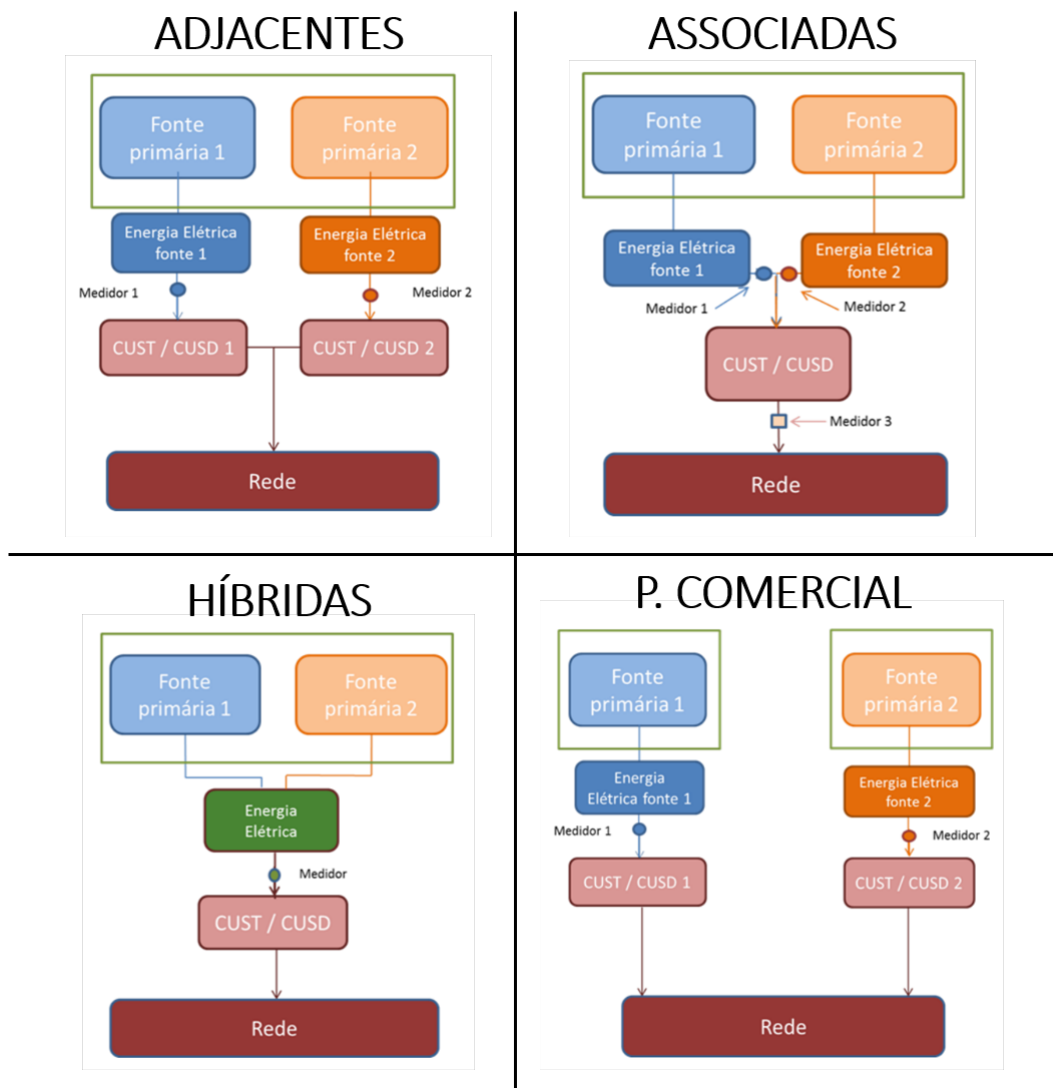
O Contrato de Uso do Sistema de Distribuição (CUSD) refere-se ao acordo celebrado entre o consumidor e a distribuidora de energia elétrica. Ele estabelece os termos e condições para a utilização do sistema de distribuição de energia, bem como, quando aplicável, as condições para a conexão à rede de distribuição e o fornecimento de energia elétrica, garantindo os direitos e obrigações de ambas as partes no contexto da prestação de serviços de energia elétrica.

Já o Contrato de Uso do Sistema de Transmissão (CUST) é um acordo formal firmado entre o ONS e os usuários que estão conectados ao sistema de transmissão de energia elétrica. Este contrato estabelece os termos e condições gerais que regem o uso da Rede Básica pelos usuários do sistema de transmissão.

Em resumo, enquanto o CUST se refere ao uso da rede de transmissão e é celebrado entre o ONS e os usuários do sistema de transmissão, o CUSD trata do uso do sistema de distribuição e é firmado entre o consumidor e a empresa distribuidora de energia elétrica. Essas etapas são fundamentais para garantir a eficiência e segurança do sistema elétrico, bem como para estabelecer as responsabilidades e direitos das partes envolvidas.

Esses termos são relevantes no contexto da hibridização para geração de energia elétrica, pois a aplicação de diferentes fontes de energia pode implicar em arranjos contratuais distintos. A figura 15 representa os tipos de hibridização estabelecidos pela EPE.

Figura 15 – Usinas híbridas



Fonte: EPE [42] (adaptada pelo autor)

Como observado, as usinas adjacentes são instalações de geração de energia elétrica que utilizam duas fontes distintas, localizadas em áreas muito próximas entre si. Em alguns casos, essas usinas podem até compartilhar o mesmo terreno e infraestrutura. Do ponto de vista da conexão à rede elétrica, cada usina deve firmar contratos individuais para o uso da rede, cada um com seus próprios medidores e contratos de transmissão e distribuição (CUST e CUSD) associados à rede local. Esse tipo de associação é comumente observado em parques eólicos que integram outra fonte de energia, como a fotovoltaica, por exemplo.

As usinas associadas são instalações que podem compartilhar o mesmo terreno ou estar localizadas em proximidade geográfica, apresentando características de produção complementares entre as fontes. Embora sejam vistas pelo ONS como única injeção de potência na rede, viabilizando o compartilhamento físico e contratual da infraestrutura de

conexão e acesso à rede elétrica, refletindo em um único contrato de integração na rede, abrangendo ambas as unidades de geração, essas usinas diferem-se das usinas híbridas por operar com medidores individuais para cada unidade e mais um medidor antes da rede para verificação da geração total injetada.

As usinas híbridas propriamente ditas, modelo utilizado nessa dissertação, são instalações nas quais a energia elétrica é gerada a partir de duas ou mais fontes no mesmo terreno ou em proximidade geográfica. Essas fontes operam de forma integrada, compartilhando um único medidor que não distingue quanta eletricidade é gerada por cada fonte individualmente, mas apenas registra o valor final. Dessa forma, não seria possível distinguir qual fonte primária foi responsável pela produção de determinada quantidade de energia elétrica. Nesse modelo, assim como nas usinas associadas, existe apenas um contrato com o ONS e somente uma injeção de potência no sistema, o que visa a simplificação comercial e melhora na estabilidade do sistema de transmissão.

Os portfólios comerciais referem-se a usinas de energia elétrica que são completamente distintas, localizadas em terrenos diferentes e operando com fontes de geração diversas. Cada uma dessas usinas possui medidores individuais para monitorar a geração de eletricidade de cada fonte, contratos separados e pontos de conexão distintos na rede elétrica. A finalidade dos portfólios comerciais é primariamente comercial, visando reduzir exposições contratuais a preços de curto prazo, especialmente em contratos baseados em quantidades específicas de energia elétrica. A composição de portfólios é vantajosa para usinas que possuem recursos complementares, independentemente de sua proximidade geográfica.

Como mencionado, esta dissertação aborda o modelo de usinas híbridas propriamente ditas para a geração de energia elétrica, focando especificamente na integração de fonte solar térmica com biomassa proveniente de resíduos sólidos urbanos. Quando essas fontes são combinadas, a integração se mostra benéfica em diversos aspectos, especialmente em termos de sustentabilidade e redução da emissão de gases poluentes.

2.6.2 Tipos de hibridização para geração de energia elétrica

Ao analisar as configurações apresentadas, torna-se evidente a ampla gama de possíveis combinações de hibridização entre diversas fontes de geração de energia elétrica. Essa abordagem pode trazer benefícios significativos tanto para os produtores quanto para os consumidores. A integração de fontes de energia renovável, limpa e/ou alternativa destaca-se como uma estratégia ainda mais vantajosa, proporcionando vantagens adicionais em termos de sustentabilidade e impacto ambiental positivo.

A combinação de energia eólica e fotovoltaica tem sido considerada uma estratégia viável em diversos estudos como em [44] e em [45], devido às variações na incidência de ventos ao longo do dia em diferentes regiões. Essa abordagem pode resultar em otimização dos custos de operação e investimento, especialmente em relação à injeção de potência no

ponto de conexão à rede de distribuição.

A combinação de energia hidrelétrica e fotovoltaica apresenta uma proposta interessante de aproveitamento de recursos energéticos. Devido à extensa disponibilidade de área nos espelhos d'água das hidrelétricas, projetos estão sendo desenvolvidos para instalar painéis fotovoltaicos em flutuadores sobre as áreas alagadas [46]. Projetos-pilotos já estão sendo implementados em usinas como Balbina (AM), Porto Primavera (SP) e Sobradinho (BA), demonstrando o potencial e a viabilidade dessa solução inovadora.

Gaseificação da biomassa combinada com gás natural oferece uma estratégia interessante para melhorar o desempenho e a eficiência das usinas de bagaço de cana. Walter *et al.* [47] exploram o aproveitamento desse resíduo por três rotas tecnológicas: substituição completa do gás natural por gás de sintetização de biomassa em usinas de ciclo combinado; uso parcial de gás de sintetização de biomassa em conjunto com gás natural em usinas de ciclo combinado; e uso exclusivo de gás de sintetização de biomassa para aumentar a produção de vapor, empregado no ciclo secundário de usinas de ciclo combinado. O estudo também indica que a co-queima pode ser um ponto importante para o desenvolvimento da tecnologia de gasificação de biomassa integrada a ciclos combinados - BIG-CC (*Biomass-Integrated Gasification Combined Cycle*, em inglês) em seus estágios iniciais.

Os autores explicam ainda que a introdução da queima de gás natural nessas instalações prolongaria o período de operação das usinas e aumentaria a eficiência global do ciclo térmico. Essa sinergia entre biomassa e gás natural possibilita uma maior flexibilidade operacional e contribui para a estabilidade do fornecimento de energia, além de potencializar a utilização de fontes renováveis na matriz energética.

A biomassa combinada com outros combustíveis, como energia heliotérmica, também apresenta uma perspectiva promissora para aumentar a eficiência e a confiabilidade das usinas. Nos sistemas heliotérmicos, onde o calor ou irradiação solar são concentrados para gerar eletricidade, a inclusão de um combustível adicional pode elevar o fator de capacidade da planta, gerando energia elétrica de forma contínua e estável [48].

Mohaghegh *et al.* [48] destacam que entre as tecnologias aplicadas para utilizar energia proveniente de combustíveis de biomassa, a combustão tem se mostrado uma entrada de calor mais economicamente viável para usinas de energia típicas do que a gasificação. Por outro lado, a gasificação ofereceu uma opção melhor para uma escala maior, já que o custo geral diminuiu significativamente com a escala.

Em lugares como o Brasil, onde a irradiação é alta e estável ao longo do ano, mesmo nos meses de inverno, plantas híbridas de concentração solar e combustão de biomassa podem ser bastante promissoras, assim que a tecnologia de CSP estiver mais acessível e desenvolvida [49]. Essa abordagem oferece vantagens em termos de estabilidade e flexibilidade operacional, contribuindo para a integração sustentável de múltiplas fontes de energia na matriz elétrica.

É importante destacar que os exemplos aqui mencionados não esgotam todas as possibilidades. Existem inúmeras outras combinações que podem ser exploradas, cada uma com seus próprios desafios e considerações específicas para sua viabilização.

2.6.3 Projetos e estudos em usinas híbridas

As fontes renováveis têm o potencial de se integrar a diversos outros sistemas para uma ampla gama de aplicações. Conforme destacado anteriormente, a biomassa e as fontes solares demonstram uma complementaridade eficaz, já que uma pode compensar a intermitência da outra.

No Brasil, em outubro de 2020 entrou em operação a primeira usina híbrida do país, unindo biogás produzido a partir de resíduos de suinocultura e painéis fotovoltaicos para gerar energia elétrica de forma sustentável e contínua, que abastece aproximadamente 5.000 residências no estado do Paraná, na região sul do país. Diariamente nesta usina são utilizados 700 mil litros de resíduos de 40 suinocultores parceiros que, em combinação com os painéis fotovoltaicos, geram 2,5MWh de energia elétrica por dia, além de tratar a água dos resíduos antes de devolver ao ambiente e ainda gerar fertilizante sustentável que é entregue aos produtores dos suínos para utilizarem nas suas fazendas [50].

Existem também duas plantas híbridas eólica-solar no Nordeste, nos estados do Pernambuco e Bahia, que entraram em operação em 2021. A usina de Taracatu em Pernambuco tem capacidade instalada de 80MW eólicos e 11MWp solares fotovoltaico. Essa usina já operava como usina eólica anteriormente e em 2021 os painéis solares entraram em operação conjunta. Já a usina de Caetitê e Igaporã na Bahia tem capacidade instalada de 21,6MW eólicos e 4,8MWp solares fotovoltaico e sua premissa era ser uma usina híbrida desde sua fundação [51].

No mundo, usinas híbridas estão cada vez mais presentes na Europa, como na Espanha e Noruega, e em países da Ásia Meridional e Central, em países como Índia, Paquistão e Nepal. Segundo Pantaleo [52], biomassa pode ser uma alternativa interessante para compensar a variação da irradiação, sendo plantas híbridas de concentradores solares combinados com combustão de biomassa alternativas tecnicamente e economicamente viáveis em relação às plantas de combustíveis fósseis convencionais.

Pantaleo [52] também pontua que a inércia térmica dos fornos de biomassa torna essa tecnologia adequada para operações de cargas estáveis e constantes, mas não para cargas variáveis ou demandas espontâneas, ante a uma possível não constância de fornecimento. Para tanto, se faz necessário a integração de armazenamento de energia térmica - TES (*Thermal Energy Storage*, em inglês) para compensar a variação de irradiação e superar as desvantagens individuais da energia solar e biomassa como fontes primárias de energia, facilitando assim estratégias de operação mais flexíveis.

Na Alemanha, o Instituto de Termodinâmica Técnica pertencente ao Centro Aeroes-

pacial Alemão - DLR (*Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt*, em alemão) realizou estudos para plantas de dessalinização de água no país, analisando plantas híbridas, sua funcionalidade e sua capacidade de produzir calor e potência [53]. Dentre as usinas híbridas analisadas no estudo referido, a usina “Plataforma Solar de Almería” instalada na Espanha, ainda um projeto piloto à época do estudo, demonstrou grande potencial de crescimento e produção de energia elétrica. Atualmente, em pleno funcionamento, a usina é o maior centro de pesquisa, desenvolvimento e testes da Europa dedicado a estudos e desenvolvimento de tecnologias de concentração solar [54].

A usina citada acima funciona gerando energia elétrica a partir da combinação de um sistema de torre de concentração solar para aquecimento de um fluido de trabalho, e sua utilização em turbinas a gás. Altas eficiências podem ser alcançadas com turbinas a gás aquecidas por energia solar, que podem ser aumentadas ainda mais em processos de ciclo combinado. Nesse caso, pouca ou nenhuma capacidade de *backup* de usinas de combustível fóssil é necessário e alta capacidade de produção se verifica durante todos os dias do ano [53].

Na Europa, apenas uma usina de energia híbrida solar-biomassa, a “Termosolar Borges”, está atualmente operando na Espanha, utilizando tecnologia de torre central devido às suas características de desempenho global moderadas e instalação relativamente fácil. As condições climáticas europeias, onde a DNI média anual pode chegar até 1.800 kWh/m², são adequadas para a hibridização de CSP. No entanto, a distribuição sazonal da energia solar justifica a integração da biomassa para garantir a produção de energia elétrica durante os meses de inverno [55].

Há também uma crescente investigação sobre o potencial da hibridização da biomassa e da energia solar na produção de hidrogênio verde. Conforme demonstrado por Takeda *et al.* [56], a extração de hidrogênio utilizando tecnologias solares para o aquecimento da biomassa no processo de gaseificação apresenta um impacto ambiental significativamente menor em comparação com os métodos convencionais. O estudo citado revela que, para cada quilograma de hidrogênio produzido pelo método híbrido, apenas 1,04 kg de CO₂ equivalente são emitidos, o que representa uma redução substancial em relação aos 2,67 kg CO₂*eq*/kgH₂ associados ao processo atual de gasificação de biomassa, destacando a importância de continuar explorando e investindo em tecnologias que promovam a transição para uma economia de energia mais limpa e resiliente ao clima.

Em suma, as usinas híbridas representam uma abordagem promissora para a diversificação da matriz energética, oferecendo soluções eficientes e sustentáveis para atender à crescente demanda por energia elétrica. Seu potencial de integração de diversas fontes renováveis e convencionais as torna uma opção viável para aumentar a resiliência e a eficiência dos sistemas de energia elétrica.

CAPÍTULO 3: METODOLOGIA E ESTUDO DE CASO

Neste capítulo é abordada a metodologia da simulação apresentada para a usina híbrida, bem como o estudo de caso para a mesma. São apresentados os estudos de localização e irradiação, uma breve introdução teórica básica para a modelagem, o modelo final e seu detalhamento, bem como o *software* utilizado para tal modelagem e estudo.

3.1 Estudos de Viabilidade Econômica e Implantação

Esta seção apresenta uma análise abrangente dos aspectos cruciais para determinar a viabilidade do projeto, abrangendo tanto a viabilidade econômica preliminar quanto a viabilidade de implantação. Por meio da investigação de estudos financeiros básicos, estudos logísticos e de irradiação solar, este segmento visa fornecer uma compreensão abrangente dos fatores que influenciam o sucesso e a eficácia da iniciativa de implantação de uma usina híbrida, considerando os aspectos locais do estado do Espírito Santo.

3.1.1 Viabilidade econômica preliminar

De maneira bem simples, pode-se considerar que o retorno financeiro positivo de um projeto ocorre quando os custos de investimentos são pagos pela receita gerada, ao longo de um tempo. Quanto menor esse tempo, mais satisfatório é o retorno desse empreendimento [57].

O estudo de viabilidade econômica preliminar é conduzido quando se tem o objetivo de avaliar a rentabilidade e a viabilidade financeira de um projeto específico, no caso dessa pesquisa, uma usina termossolar-biomassa.

Primeiramente, definiu-se o escopo e os objetivos do estudo, identificando o projeto a ser analisado e estabelecendo os objetivos específicos da análise de viabilidade econômica. Em seguida, foi realizada a coleta de dados financeiros, técnicos e de mercado relevantes para o projeto, utilizando fontes confiáveis, como relatórios de mercado, estudos anteriores e bancos de dados setoriais. Essa etapa incluiu a reunião de informações sobre custos de capital, custos operacionais, receitas projetadas e incentivos fiscais ou subsídios disponíveis.

A etapa seguinte envolveu a estimativa detalhada dos custos de capital, incluindo a aquisição de equipamentos, infraestrutura e instalação, bem como o cálculo dos custos operacionais, como manutenção, operação e insumos necessários. Além disso, foram considerados os custos indiretos, como seguros, impostos e despesas administrativas.

O sistema pode ser dividido em três etapas, a saber: a planta solar (I), a incineração da biomassa (II) e o ciclo de potência (III). A etapa I considera os custos relacionados aos

coletores e aos dutos de distribuição do fluido de trabalho. A etapa II envolve os custos associados à queima do RSU, incluindo a câmara de combustão, mas desconsiderando os custos de transporte. A etapa III abrange os custos dos equipamentos utilizados e definidos na simulação, para geração de eletricidade como produto final.

Para cada etapa foi considerada uma equação de custos de investimento básicos (CIB_n), dada pela equação 1, onde n representa o número da etapa.

$$CIB_n = Equipamentos + Instalação + Custos indiretos \quad (1)$$

O custo de cada equipamento e sua instalação, bem como os custos indiretos foram encontrados por pesquisa de mercado e artigos relacionados.

Para o custo de investimento básico total (CBI_t), somam-se os valores individuais, conforme a equação 2.

$$CIB_t = \sum_{i=3}^n CIB_{n_i} \quad (2)$$

Para a projeção de receitas (brutas e líquidas), foram estimadas as receitas geradas pelo projeto com base em dados de mercado e projeções de demanda, considerando-se a porcentagem de geração de cada fonte (RSU e solar térmica) e os preços de venda da energia elétrica gerada por cada fonte de acordo com pregões e leilões recentes da ANEEL e artigos relacionados.

Em casos de geração híbrida, por duas ou mais fontes, o valor bruto total recebido em um dia de geração de energia elétrica considera a porcentagem de potência gerada por cada fonte específica e o valor atribuído a cada quilowatt gerado por essas fontes. Para calcular o valor diário (equação 3), é necessário determinar os valores recebidos a cada hora, levando em conta a proporção de energia elétrica gerada por cada fonte em cada hora do dia e o respectivo valor monetário por kWh gerado. Assim, o cálculo diário incorpora a variação horária na contribuição de cada fonte de energia e seus respectivos preços.

$$V_{\text{diário}} = \sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^n P_{h,i} \cdot V_i \quad (3)$$

Onde, $V_{\text{diário}}$ é o valor líquido total recebido em um dia; $P_{h,i}$ é a porcentagem de potência gerada pela fonte i na hora h ; V_i é o valor em reais (ou outra unidade monetária) por kWh gerado pela fonte i ; e n é o número total de fontes de energia.

Esta fórmula soma, para cada hora do dia (de 1 a 24), a contribuição de cada fonte de energia multiplicada pelo seu respectivo valor por kWh. Para valores anuais, basta multiplicar o resultado por 365 dias.

Com o fluxo de caixa projetado, calcularam-se indicadores financeiros chave, como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), *Payback* Simples (PBS) e *Payback* Descontado (PBD) [58].

O Valor Presente Líquido (VPL) é uma medida utilizada na análise de viabilidade de investimentos, que calcula a diferença entre o valor presente das entradas de caixa futuras esperadas e o valor presente dos custos do investimento inicial. A fórmula do VPL é descrita na equação 4.

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+r)^t} \quad (4)$$

Onde, R_t é o fluxo de caixa no período t ; r é a taxa de desconto; t é o período de tempo; e n é o número total de períodos.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa de desconto que torna o Valor Presente Líquido (VPL) de um projeto igual a zero. Em outras palavras, é a taxa que equilibra os valores presentes dos fluxos de caixa positivos e negativos de um investimento. A TIR é encontrada resolvendo a equação 5.

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1 + \text{TIR})^t} \quad (5)$$

Onde, R_t é o fluxo de caixa no período t ; TIR é a taxa interna de retorno; t é o período de tempo; e n é o número total de períodos.

O *Payback* Simples (PBS) é o período de tempo necessário para que o valor dos fluxos de caixa recebidos de um investimento iguale o valor do investimento inicial. A equação básica do PBS pode ser dada pela equação 6.

$$PBS = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Fluxo de Caixa Anual Médio}} \quad (6)$$

Onde, o Investimento Inicial é o custo do projeto ou investimento e o Fluxo de Caixa Anual Médio é a média dos fluxos de caixa anuais gerados pelo investimento.

Já *Payback* Descontado (PBD) é o período de tempo necessário para que o valor presente dos fluxos de caixa recebidos de um investimento se iguale ao valor do investimento inicial, levando em consideração o valor do dinheiro no tempo (taxa de desconto). A equação básica do PBD pode ser dada pela equação 7.

$$PBD = \frac{\text{Investimento Inicial}}{\sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+r)^t}} \quad (7)$$

Onde o Investimento Inicial é o custo do projeto ou investimento; R_t é o fluxo de caixa no período t ; r é a taxa de desconto; t é o período de tempo; e n é o número total de períodos.

Estas métricas são amplamente utilizadas na análise de investimentos para avaliar a viabilidade e a rentabilidade de projetos, proporcionando uma base sólida para a tomada de decisões financeiras.

3.1.2 Viabilidade de implantação

A determinação da localização ótima para a implantação de uma usina híbrida solar-biomassa requer a condução de um estudo bifásico, composto por uma análise de incidência solar e uma avaliação da logística associada à coleta e descarte de resíduos.

O estudo de incidência solar tem como objetivo identificar a região no estado do Espírito Santo que recebe a máxima irradiação solar, destacando-se como a localidade mais propícia para a instalação de sistemas destinados à captação da luz ou calor solar com vistas à geração de potência e/ou energia elétrica.

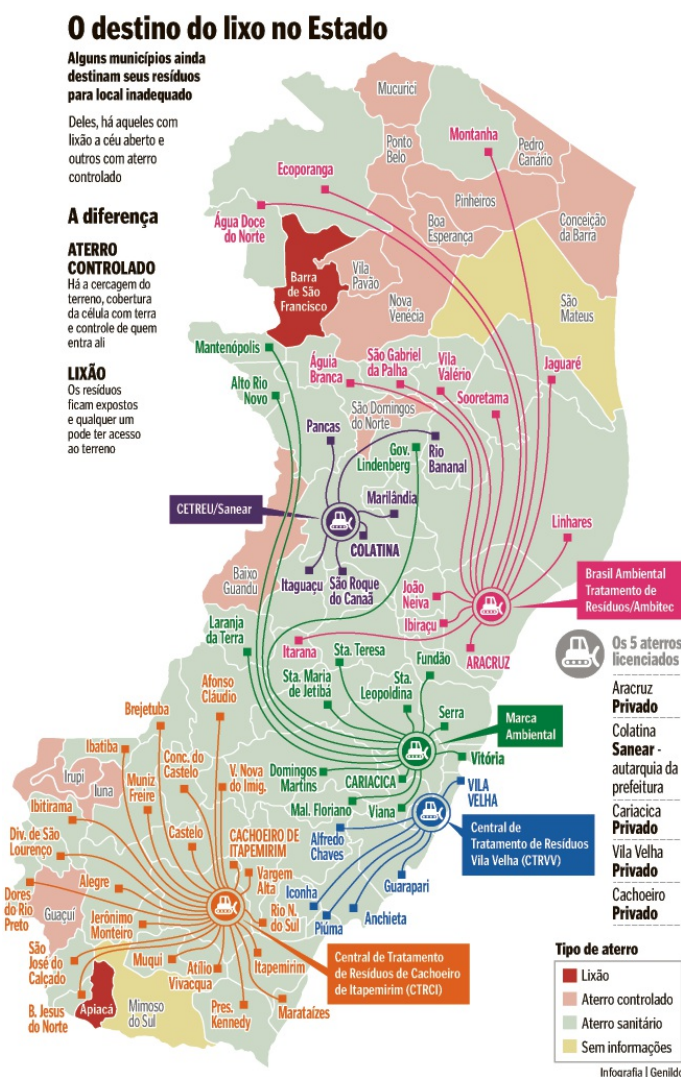
Por outro lado, o estudo logístico visa determinar a proximidade em relação aos aterros sanitários ativos ou a localização que proporcione facilidades no transporte dos resíduos gerados. A convergência desses dois estudos resultará na identificação da localidade que oferece a mais apropriada combinação de eficiência logística e irradiação solar, considerando-se a premissa de que ambos os fatores não se alinhem de maneira perfeita.

3.1.2.1 Estudo logístico da coleta de biomassa

De acordo com a Assembleia Legislativa, no estado do Espírito Santo, há a presença de cinco aterros sanitários devidamente licenciados para a recepção de resíduos, sendo que apenas um deles é administrado pela esfera municipal, enquanto os demais são de iniciativa privada. Esses locais estão estrategicamente distribuídos nos municípios de

Aracruz, Colatina, Cariacica, Vila Velha e Cachoeiro de Itapemirim. O infográfico (figura 16) apresenta de maneira elucidativa a dinâmica logística associada à entrega de resíduos em cada um desses aterros.

Figura 16 – Rotas de transporte e descarte de resíduos no estado do Espírito Santo



Fonte: A Gazeta, 2019

Como é possível observar, todos os aterros sanitários se encontram concentrados na região centro-sul do estado, deixando a porção norte do estado com a maior concentração de aterros controlados. No escopo exclusivo da área de maior concentração de aterros, destaca-se que a região centro-leste dessa área apresenta uma propensão a ser a localidade com a logística mais vantajosa.

Para determinar a melhor rota logística para as regiões utilizou-se do cálculo de média aritmética a partir da obtenção das rotas de cada cidade, considerando a distância viária entre as cidades. A média aritmética de um conjunto de n valores $x_1, x_2, \dots, x_n$ é dada pela equação 8:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

Onde $\bar{x}$ é a distância média entre os municípios avaliados, n representa a quantidade de rotas avaliadas e os valores $x_1, x_2, \dots, x_n$ representam os dados coletados, em quilômetros.

Após a coleta e análise dos dados, estes foram organizados em tabelas e comparados utilizando o critério de menor distância entre as observações. É importante destacar que as distâncias analisadas consideram apenas trajetos rodoviários viáveis, em rotas de estradas pavimentadas ou não, onde seja possível o trânsito de veículos automotores. O tempo de viagem não foi considerado um aspecto relevante para o estudo, pois o foco está nas distâncias percorridas. Além disso, cada veículo trafega sob condições específicas, como velocidade e tempo de pausa do motorista, e há trechos com velocidades variáveis, o que interfere diretamente no tempo de trajeto.

3.1.2.2 Avaliação da irradiação solar

Transitando para a segunda fase deste estudo preliminar, enfoca-se a análise da irradiação. No presente estudo, a irradiação será analisada em kWh/m².ano, visando proporcionar uma avaliação abrangente dos dados coletados.

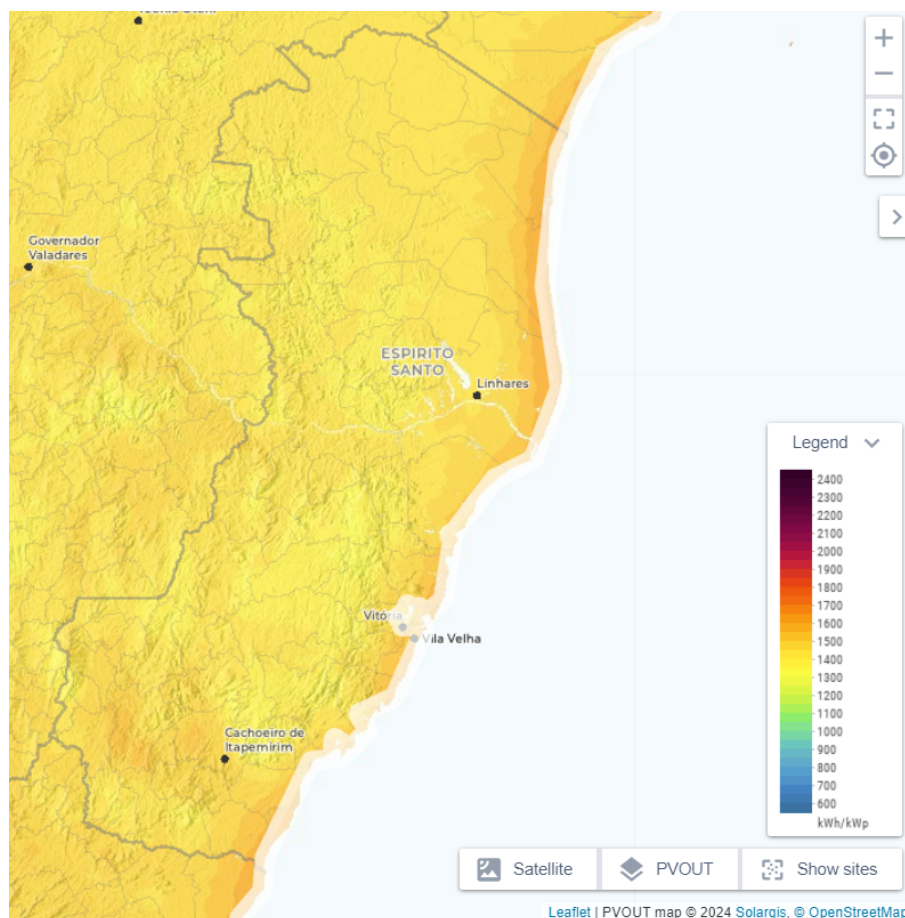
Com o intuito de obter informações atualizadas, o site “*Global Solar Atlas*” [15] constitui a fonte de dados para este estudo de irradiação. Neste portal, são disponibilizadas medições instantâneas mais recentes, assim como compilações de dados de séries históricas desde o ano de 2003. Esses dados são essenciais para conduzir uma análise mais precisa, contribuindo para a elaboração de relatórios detalhados disponíveis no referido site.

Os dados extraídos para este estudo foram referentes à DNI (*Direct Normal Irradiation*, ou Irradiação Normal Direta, em português). Essa variável é fundamental para a análise da quantidade de energia solar incidente de forma direta sobre uma localidade específica, desempenhando um papel crucial na avaliação da viabilidade e potencial para a geração de energia solar na região em estudo.

Inicialmente, procedeu-se à consulta do mapa solar do Espírito Santo, conforme ilustrado na figura 17.

A legenda do mapa indica que os tons mais quentes (como laranja, vermelho e vinho) representam áreas com maior irradiação solar, enquanto os tons mais frios (como verde e azul) indicam valores menores. No Espírito Santo, a irradiação média anual é de 1.447,22 kWh/m².ano. Ao analisar o mapa, observa-se uma considerável uniformidade na irradiação solar em todo o estado demonstrada pela coloração amarelada no mapa, com a

Figura 17 – Mapa da Irradiação Normal Direta no estado do Espírito Santo



Fonte: Global Solar Atlas, 2024

exceção da faixa litorânea, que apresenta uma coloração levemente alaranjada, denotando uma maior irradiação nessas localidades.

Posteriormente, foi realizado um estudo das curvas de incidência solar por hora ao longo dos meses do ano em diversas cidades, utilizando exclusivamente a análise de dados secundários e informações disponíveis. Este estudo se baseou na coleta e interpretação de dados históricos de irradiação solar, padrões climáticos e outras variáveis ambientais pertinentes.

A metodologia empregada envolveu a análise estatística e comparativa dos dados, sem a necessidade de experimentação *in situ* e aplicações matemáticas, visto que os dados foram encontrados de forma direta. Tal abordagem permitiu a obtenção de resultados robustos e confiáveis, fundamentados em informações pré-existentes e devidamente verificadas, fornecendo uma base sólida para as conclusões e recomendações apresentadas.

3.2 Eficiências individual e global

A eficiência de um sistema (η) é a medida de quão bem o sistema converte as entradas (recursos, energia, matéria-prima, etc.) em saídas úteis (produtos, serviços, energia, etc.). É geralmente expressa como a relação entre a saída útil obtida e a entrada total aplicada, frequentemente dada em forma de porcentagem. Uma alta eficiência indica que o sistema está utilizando seus recursos de maneira eficaz, minimizando desperdícios e perdas. Em termos matemáticos, η pode ser representada na forma simplificada pela equação 9:

$$\eta = \frac{Produtos}{Insumos} \times 100 \quad (9)$$

Para calcular a eficiência de um sistema através da troca de calor, especialmente em um contexto termodinâmico, pode-se usar a eficiência térmica. Essa equação é comumente usada em sistemas com motores térmicos, caldeiras, e ciclos de potência, como por exemplo o Ciclo de Rankine.

A eficiência térmica ($\eta_{térmica}$) é definida como a razão entre o trabalho líquido realizado pelo sistema (W_{liq}) e a quantidade de calor fornecida ao sistema ($Q_{entrada}$). Esta eficiência pode ser expressa pela equação 10:

$$\eta_{térmica} = \frac{W_{liq}}{Q_{entrada}} \times 100 \quad (10)$$

A potência líquida do sistema (W_{liq}) pode ser definida como a subtração entre consumo dos equipamentos, como as bombas e motores (W_{bomba}), e a potência bruta (W_{bruta}) gerada pelo sistema (equação 11). Já o calor fornecido ao sistema ($Q_{entrada}$) em trocadores de calor pode ser definido como o produto da massa do fluido pelo diferencial de entalpia entre a saída e a entrada, conforme demonstrado na equação 12.

$$W_{liq} = W_{bruta} - W_{bomba} \quad (11)$$

$$Q_{entrada} = \dot{m} \times (h_{saída} - h_{entrada}) \quad (12)$$

Substituindo 11 e 12 em 10, tem-se a equação 13, que demonstra a eficiência térmica de cada sistema.

$$\eta_{térmica} = \frac{W_{bruta} - W_{bomba}}{\dot{m} \times (h_{saída} - h_{entrada})} \times 100 \quad (13)$$

Em um sistema de geração de energia hibridizado, a eficiência total do sistema (η_{global}) é o produto das eficiências térmicas individuais de cada etapa, para os casos em que a energia de saída da fonte geradora é a energia de entrada para o ciclo termodinâmico (equação 14).

$$\eta_{global} = \prod_{i=1}^n \eta_i \quad (14)$$

Onde η_{global} é a eficiência total do sistema, $\prod$ denota o produto de uma série de termos, η_i representa a eficiência de cada etapa individual e n é o número de etapas do sistema.

Para o caso específico de um sistema híbrido solar-biomassa com duas etapas, a eficiência global pode ser calculada segundo a equação 15.

$$\eta_{global} = \eta_{solar} \times \eta_{ciclo} \quad (15)$$

3.3 Ferramenta de Modelagem - *IPSEPro Software Simulation*

O *software* IPSEpro [59] é uma ferramenta versátil e abrangente, projetada para realizar cálculos de balanços de calor e massa, bem como simular uma variedade de processos industriais. Sua gama de módulos permite o desenvolvimento de modelos precisos para uma ampla variedade de aplicações industriais, garantindo a utilização contínua desses modelos ao longo do ciclo de vida das instalações de processos.

Além disso, o IPSEpro oferece uma interface intuitiva e recursos avançados de visualização de dados, tornando-o uma escolha ideal para engenheiros e pesquisadores que buscam otimizar o desempenho e a eficiência de seus sistemas industriais.

Através das bibliotecas especializadas do IPSEpro, como Energia Solar Concentrada (*Concentrated Solar Power* - CSP, em inglês), Processos de Refrigeração e Processos de

Dessalinização, os usuários podem acessar modelos pré-desenvolvidos e adaptá-los às suas necessidades específicas. Uma das características distintivas do IPSEpro é a sua biblioteca de Sistemas Avançados (*Advanced Power Plant* - APP, em inglês), que oferece ferramentas poderosas para simular e analisar processos em usinas de energia avançadas.

Com sua capacidade de modelagem precisa e flexível, o IPSEpro se destaca como uma ferramenta essencial para o projeto e otimização de sistemas industriais complexos, proporcionando observações valiosas para melhorar a eficiência e sustentabilidade das operações industriais.

3.4 Base Teórica para Modelagem da Simulação

Além do exposto no capítulo anterior, que serviu de referência para a elaboração desta pesquisa, foram também utilizados artigos especializados e específicos para aprofundar a compreensão dos parâmetros a serem empregados nas simulações, bem como o esquemático das mesmas. A incorporação desses estudos adicionais fortaleceu a fundamentação teórica e prática deste trabalho, enriquecendo a metodologia adotada e contribuindo para uma análise mais abrangente e fundamentada dos resultados obtidos.

A simulação da usina híbrida objeto de estudo foi fundamentada em três modelos de plantas térmicas solares, todas localizadas na Espanha e caracterizadas por empregar tecnologias de concentração solar. No contexto desta pesquisa, esses modelos foram adaptados para integrar o suporte da biomassa durante os períodos de intermitência solar, contemplando as variações de DNI durante um dia típico, caracterizadas em intervalos de uma hora.

As plantas em questão são as plantas de AndaSol, Almería e Les Borges. A intenção da pesquisa foi combinar os aspectos mais vantajosos das plantas de AndaSol e Almería, ambas reconhecidas por suas tecnologias de concentração solar, com a hibridização feita em 2020 na planta térmica solar de Les Borges, o que permitiu que a planta gerasse energia elétrica de forma diária contínua, sem a necessidade de armazenamento.

O *software* IPSEPro disponibiliza um modelo demonstrativo da planta de AndaSol, entretanto, a parte relacionada à concentração solar era representada por coletores genéricos, sem considerar fatores ambientais cruciais, como a incidência solar e as horas de sol por dia. Para que a simulação ficasse mais próxima de uma operação real, os coletores genéricos foram substituídos por PTCs com inserção de dados mais detalhados sobre localização definida no item 2.7.2.3.

A composição dos resíduos gerados pode variar conforme a população e o nível de industrialização em cada região. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) [60], aproximadamente 45,3% da composição do RSU brasileiro é de matéria orgânica, seguida por plástico (16,8%), papel e papelão

(10,4%) e outros materiais. Com base no relatório "Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil", com dados de 2022, verifica-se que em média 1,043 kg de resíduos são produzidos por pessoa diariamente, totalizando cerca de 82 milhões de toneladas por ano no país.

Considerando dados do relatório citado em que a taxa de coleta de resíduos é de 98,6%, e destes, 74,3% são encaminhados para os aterros na região Sudeste, onde está localizado o estado do Espírito Santo, apenas 73,26% do total de RSU são descartados corretamente, alcançando os aterros licenciados para uma destinação ambientalmente adequada [60]. A quantidade de RSU produzida e destinada a aterros somente no estado do Espírito Santo é de aproximadamente 3 toneladas por ano, correspondendo a uma taxa de descarte de cerca de 33,80 kg/s [39].

Estudos mais detalhados e cálculos realizados indicaram que até 80% do RSU gerado no estado consegue alcançar o destino definido diariamente, sendo correspondente a 27,04kg/s, valor este utilizado para as simulações e cálculos futuros.

O trabalho descrito em [39] também inclui uma análise da composição química do RSU do estado estudado, resultando em valores da fração de massa de Carbono (C), Oxigênio (O), Hidrogênio (H), Nitrogênio (N), Enxofre (S), Água e Cinzas calculados com base na composição dos RSU, resultando nos seguintes dados: C: 0,21 kg/kg, O: 0,25 kg/kg, H: 0,07 kg/kg, N: 0,01 kg/kg, S: 0,01 kg/kg, Água: 0,30 kg/kg e Cinzas: 0,15 kg/kg, o que compõe uma biomassa com poder calorífico de 10.505kJ/kg.

Para o presente trabalho, adotou-se a mesma composição dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) utilizada no estudo mencionado. Além disso, foram analisadas rotas logísticas para o transporte dos RSU até os aterros e até a localização ótima, definida no item 2.7.2.3.

Diante do explicitado, a abordagem adotada consistiu em integrar as melhores características das demonstrações de concentração solar, com PTCs detalhados, conforme descrito nos principais artigos de referência/apoio para a simulação do presente estudo [61], [62], [63] e [64], além de adicionar a queima de biomassa, como na planta de Les Borges [55], visando alcançar um modelo mais específico e representativo da usina híbrida em estudo.

Os artigos em questão levam em consideração alguns parâmetros relacionados aos coletores solares e aos fluidos termodinâmicos, que serão discutidos mais a frente, além de avaliar os aspectos técnicos e a eficiência do bloco de potência, especialmente da planta de AndaSol, que é um dos modelos mais estudados.

A adaptação para o estudo apresentado levou em consideração uma geração de potência variando em relação aos insumos disponível, tais quais a quantidade de RSU que consegue chegar na localização da usina e quantidade e distribuição dos PTCs.

Com relação à ciclos de potência, tecnologias como o Ciclo Rankine Orgânico (ORC), o Ciclo Rankine Convencional (CRC) o motor de combustão interna (ICE) com gás de gaseificação alcançaram um alto nível de maturidade, conforme eram aplicadas e estudadas. As eficiências de geração nesses sistemas variam de 10% a 36% [36], com os sistemas

mais eficientes caracterizados pelo CRC com recuperação e aquecimento regenerativo e pelas unidades de gaseificação e motor de combustão interna, sendo o primeiro sistema adotado para o presente trabalho.

3.5 Metodologia da Simulação e estudo de caso

A seção apresentada aborda os aspectos fundamentais relacionados às condições de contorno e à modelagem adotada no processo de simulação. Por meio desta análise, são detalhados os parâmetros e limites estabelecidos para garantir a precisão e a representatividade dos resultados. A compreensão desses aspectos é essencial para o desenvolvimento e a interpretação adequada dos modelos simulados.

3.5.1 Modelagem adotada

Para a elaboração do presente modelo, foram requeridas a utilização de duas bibliotecas distintas, resultando na realização de duas simulações independentes. Isso ocorreu devido à incompatibilidade entre as bibliotecas, inviabilizando uma integração direta por meio do *software* em questão, dado que a versão utilizada não oferecia tal recurso. As bibliotecas empregadas foram a APP, destinada à simulação da combustão da biomassa, e a CSP, voltada para a modelagem da planta híbrida e sua capacidade de geração de energia.

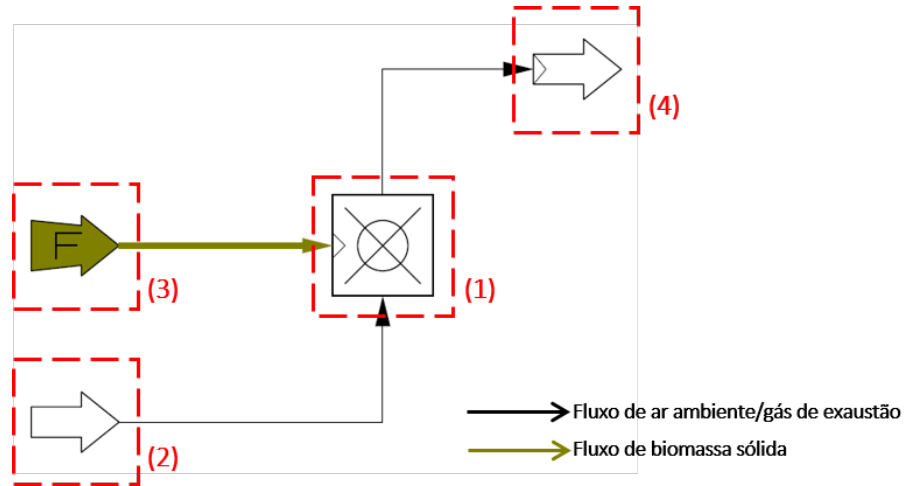
Para contornar essa limitação, os dados gerados na simulação utilizando a biblioteca APP foram migrados e posteriormente incorporados na simulação realizada com a biblioteca CSP. Dessa forma, apesar da necessidade de realizar simulações separadas devido à incompatibilidade entre as bibliotecas, não houve impacto no resultado final do modelo. A transferência dos dados entre as simulações permitiu que as análises e conclusões sobre o desempenho da planta híbrida e sua capacidade de geração de energia elétrica fossem conduzidas de maneira integrada e coerente.

A primeira consistiu na queima da biomassa para a geração de gás de exaustão, que por sua vez é utilizado para aquecer o HTF durante os períodos de intermitência solar.

O funcionamento da simulação pode ser resumido da seguinte forma: uma câmara de combustão (1) é alimentada com ar ambiente (2) e biomassa (3), sendo a biomassa queimada para produzir um gás de exaustão (4), conforme ilustrado na figura 18. Este gás é então direcionado para a planta híbrida, onde auxilia no aquecimento do HTF do sistema.

Para a simulação da planta híbrida final (figura 19), o modelo adotado consiste em linhas de PTCs (1), os quais são alimentados com um HTF, cujo aquecimento inicial é realizado pela refração dos raios solares nos espelhos dos coletores. O HTF, ao circular no sistema, é aquecido gradualmente e realiza a troca de calor com a biomassa em um

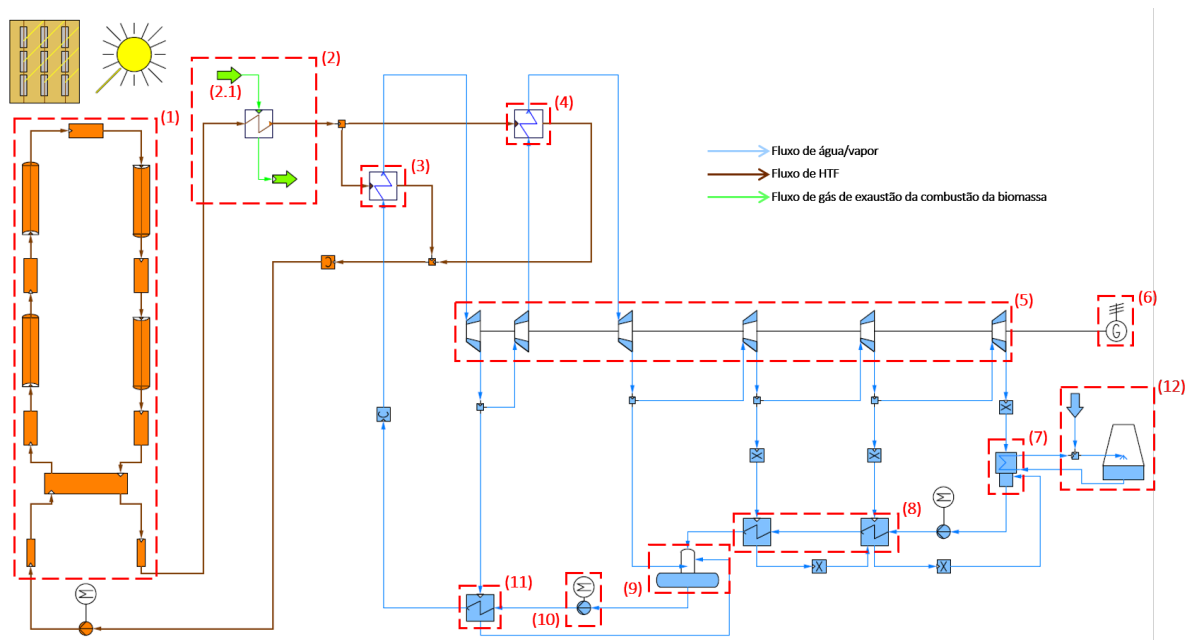
Figura 18 – Modelagem da combustão da biomassa



Fonte: Autor

trocador de calor (2), sendo que a entrada deste trocador (2.1) é o gás de exaustão proveniente da simulação anterior. Neste processo, o HTF atinge sua temperatura máxima. Em seguida, o HTF é conduzido para trocas de calor com o bloco de potência, utilizando trocadores de calor contracorrente (3 e 4), visando aquecer o fluido de trabalho do bloco.

Figura 19 – Modelagem da planta híbrida



Fonte: Autor

O bloco de potência adota um Ciclo Rankine Convencional - CRC, no qual a energia é gerada pela expansão do vapor d'água em turbinas (5). A energia mecânica produzida por cada turbina é somada e transmitida para um mesmo eixo, onde é convertida em

energia elétrica pelo gerador (6), sendo então distribuída pela rede de transmissão. O vapor saturado proveniente da última turbina é encaminhado para um condensador (7), onde uma torre de resfriamento (12) ajuda no processo de condensação desse vapor, que após condensado, passa por pré-aquecedores de baixa pressão (8) a fim de aumentar gradualmente sua temperatura. Além disso, passa por um desaerador (9) para separar o vapor condensado da água líquida, para que não haja prejuízos nos equipamentos. Este vapor é combinado com o reaproveitamento do vapor quente proveniente das extrações das turbinas durante o ciclo.

Por fim, a água já líquida é enviada a uma bomba (10) para elevar a pressão, e passa por outro pré-aquecedor para aumentar sua temperatura (11), reiniciando assim o processo de troca de calor com o HTF (3 e 4) e prosseguindo com o ciclo de geração de potência.

3.5.2 Condições de contorno

Como citado no item 3.2, foram necessárias adaptações nos modelos dos artigos de referência, visto que consideram localidades diferentes, com variação de aspectos físicos e ambientais, bem como diferentes composições de HTF e biomassa e diferenças de organização dos linhas dos PTCs. Para a simulação da usina proposta nesta dissertação as condições de contorno foram separadas em aspectos meteorológicos e mecânicos, para facilitar o entendimento e organização do modelo.

3.5.2.1 Biomassa

Para a simulação da combustão da biomassa, as condições de contorno definidas foram:

- Fluxo mássico de RSU de 27,04kg/s, representando 80% da quantidade de biomassa disponível para utilização;
- Temperatura e pressão de entrada do ar ambiente e do combustível (biomassa) de 25°C e 1 bar;
- Composição da biomassa conforme descrito no item 3.4.

3.5.2.2 Condições meteorológicas

Para as condições de contorno meteorológicas foram coletadas as informações com base na localidade definida no Estudo de Localização, item 3.1.2, que foi a cidade de Cariacica. Os dados meteorológicos utilizados para a presente simulação foram coletados do GSA [15] (*Global Solar Atlas* - Atlas Solar Global, em português) e NSRDB [65] (*National Solar Radiation Database* - Base de Dados de Radiação Solar Nacional, em português), adotando-se os seguintes dados e seus respectivos valores:

- DNI diário anual médio de 4.076 kWh/m^2 ;
- Temperatura média e umidade relativa de 25°C e 70%, conforme base de dados de séries históricas extraídas das referências citadas.

A simulação final foi segmentada em horas do dia, devido ao cálculo realizado pelo programa em intervalos horários. Considerando a localização em Cariacica e os dados meteorológicos utilizados, extraídos de séries históricas, o programa identificou que o período em que a irradiação solar é significativa nos coletores ocorre das 07:00 às 17:59, denominado como período “dia”. Por outro lado, o período compreendido entre as 18:00 e as 06:59 foi designado como período “noite”, uma vez que durante esse intervalo a irradiação solar é negligenciável.

Uma das premissas da pesquisa é aproveitar o calor solar para gerar energia sem suporte de biomassa durante o pico de irradiação do dia. Para tal, foi determinado o horário de meio-dia, pois a inclinação solar em relação aos coletores é de 0° , o que resulta em uma coleta mais otimizada do calor incidente. O dimensionamento e posicionamento das linhas de coletores foram feitos com base nessa consideração.

3.5.2.3 Coletores solares

Os coletores utilizados são do tipo PTC, específicos do modelo *EuroTrough 150*, que é um dos modelos disponíveis no próprio programa, fornecendo todos os dados completos necessários. Além disso, esse modelo de coletor também é amplamente empregado em artigos de referência, o que justifica a escolha de mantê-lo ao invés de projetar um coletor do zero. A complexidade de considerar todas as variáveis necessárias para projetar um coletor a partir do zero, juntamente com a dificuldade em encontrar todos os dados relevantes, levou à decisão de utilizar um modelo já estabelecido e validado como o *EuroTrough 150*.

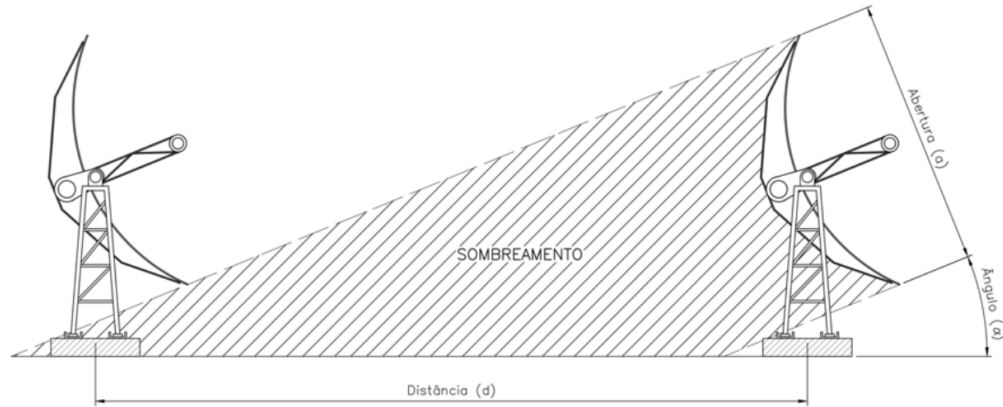
Considerando as informações supracitadas, cada unidade do PTC utilizado possui 150 metros de comprimento e 5,77 metros de largura, totalizando uma área de $865,5 \text{ m}^2$ cada, com uma área livre de coleta de $817,5 \text{ m}^2$ por coletor.

A configuração escolhida consiste em linhas compostas de duas sessões paralelas com dois PTCs em série em cada uma. Embora tenham sido consideradas outras configurações com variações de série e paralelo, a configuração mencionada foi identificada como a ótima para o sistema em questão.

O espaçamento entre as sessões paralelas foi calculado para evitar sombreamento entre os coletores, como demonstrado na figura 20.

A equação 16 determina o ângulo de rastreamento solar para encontrar o valor ótimo do espaçamento entre as fileiras paralelas a fim de minimizar ou anular o sombreamento entre coletores. O ângulo ideal para baixo ou nulo sombreamento é o mais próximo possível da linha do horizonte, ou seja, quanto menor o ângulo, menor será o sombreamento [66].

Figura 20 – Padrão de espaçamento para não sombreamento dos coletores solares



Fonte: Jonas Rafael Gazoli *et al* [66]

$$\alpha = \arctg \left(\frac{a}{d} \right) \quad (16)$$

Onde α é o ângulo, em graus, de rastreamento solar em relação à linha do horizonte; “a” é a abertura do coletor, em metros; e “d” é a distância ótima entre as fileiras de coletores.

Para o tipo de coletor escolhido, o ângulo ótimo é de $13^{\circ}31'5,9''$ e sua abertura é de 5,77 metros. Substituindo os valores na fórmula e realizando o cálculo, o valor ótimo de espaçamento entre as fileiras encontrado é de 24 metros, valor este incorporado na simulação.

3.5.2.4 Resfriamento

Considerando a distância do local adotado para implantação em relação a uma fonte de água corrente, como lagos ou mares, que poderia ser canalizada ou bombeada, tornou-se necessário implementar uma torre de resfriamento adjacente ao condensador, conforme ilustrado como item (12) na figura 19. Essa torre de resfriamento foi utilizada para reduzir a temperatura da água proveniente do bloco de potência, através da troca de calor entre a água quente que sai do ciclo com a água em temperatura ambiente.

3.5.2.5 Fluido de transferência de calor

O fluido térmico utilizado foi o Therminol VP-1, escolhido devido ao seu uso recorrente em estudos de referência e à sua estabilidade comprovada em plantas termossolares. As especificações do fabricante indicam que o Therminol VP-1 apresenta uma faixa de operação recomendada entre 20°C e 400°C , com uma pressão máxima de aproximadamente 11 bar. Fora desses parâmetros, a estabilidade do produto não é garantida, uma vez

que temperaturas abaixo de 20°C podem levar o HTF à zona de congelamento, enquanto temperaturas acima de 400°C podem resultar na zona de autoignição, com um ponto de ignição em 450°C.

Para a simulação, foram adotados valores de 390°C para a temperatura máxima e 10 bar para a pressão máxima do HTF. Essa escolha foi baseada no princípio de priorizar a segurança, seguindo as recomendações da tabela da ficha técnica do produto.

3.5.2.6 Outras especificações técnicas

Outras condições de contorno foram adotadas como segue:

- Trocadores de calor contracorrente com 50% da massa de HTF indo para cada trocador de calor;
- Temperatura do HTF retornando ao campo solar em 280°C;
- Temperatura máxima do vapor d'água de 350°C;
- Perda de calor para o ambiente de 1% em cada trocador de calor;
- Eficiência mecânica de 100% e eficiência isentrópica de 90% para todas as turbinas;
- Eficiência mecânica e elétrica de 98% para o gerador;
- Eficiência das bombas em 70%;
- Perda de massa de água na torre de resfriamento de 1,6%.

Foram incluídos dois conectores para o balanço de massa: um no ponto de retorno do HTF para o campo solar e outro no ponto de retorno da água para a troca de calor. Além disso, foram instalados verificadores de título no bloco de potência em locais estratégicos, permitindo a observação das fases da água durante os processos. Essas adições foram implementadas para facilitar a monitorização e garantir a eficiência dos sistemas envolvidos.

É importante ressaltar que o rigor metodológico adotado neste estudo foi fundamental para garantir a confiabilidade e a validade dos resultados obtidos. A aplicação de técnicas específicas, a seleção criteriosa dos procedimentos e a análise detalhada dos dados contribuíram para uma abordagem sistemática e abrangente do problema em questão. Assim, a metodologia empregada forneceu uma estrutura sólida para investigar as questões de pesquisa propostas, permitindo uma análise precisa e fundamentada, essencial para alcançar os objetivos do estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o processo de simulação, visando avaliar a eficácia, eficiência e viabilidade do sistema proposto.

De acordo com o boletim energético mais recente do Espírito Santo (dados de janeiro a março de 2024), o estado possui uma capacidade instalada de 2.439,20 MW, dos quais 25,3% são gerados internamente. Com a implantação da usina proposta neste estudo, a capacidade instalada do Espírito Santo pode aumentar aproximadamente 0,5%, elevando a geração interna para 25,8%. Este incremento não apenas melhora a capacidade de geração de eletricidade do estado, mas também abre portas para outros projetos que possam contribuir para a autossuficiência energética do Espírito Santo no futuro.

4.1 Viabilidade de implantação

Esta seção demonstra os resultados do estudo de viabilidade de implantação, onde constam os estudos de localização e de irradiação, para a definição da melhor localização possível para implantação da usina.

4.1.1 Viabilidade de localização

Três municípios foram selecionados para uma análise das distâncias entre eles e os aterros, a saber: Santa Maria de Jetibá (tabela 1), Afonso Cláudio (tabela 2) e Domingos Martins (tabela 3). A seleção desses municípios baseou-se primeiramente em uma avaliação visual de proximidade em relação à área de concentração dos aterros.

No intuito de determinar qual município possui o melhor potencial logístico, realizou-se uma análise das distâncias, utilizando informações obtidas a partir do *Google Maps*. As tabelas citadas apresentam os resultados desta pesquisa.

Tabela 1 – Distância - Santa Maria de Jetibá

Rotas	Rota A (km)	Rota B (km)	Média (km)
Colatina - Santa Maria	73,30	99,00	86,15
Aracruz - Santa Maria	84,00	-	84,00
Cariacica - Santa Maria	65,00	-	65,00
Vila Velha - Santa Maria	94,70	-	94,70
Cachoeiro - Santa Maria	148,00	204,00	176,00

Fonte: Autor

Tabela 2 – Distância - Afonso Cláudio

Rotas	Rota A (km)	Rota B (km)	Rota C (km)	Média (km)
Colatina - Afonso Cláudio	113,00	113,00	119,00	115,00
Aracruz - Afonso Cláudio	144,00	167,00	229,00	180,00
Cariacica - Afonso Cláudio	143,00	147,00	143,00	144,33
Vila Velha - Afonso Cláudio	148,00	148,00	197,00	164,33
Cachoeiro - Afonso Cláudio	119,00	122,00	-	120,50

Fonte: Autor

Tabela 3 – Distância - Domingos Martins

Rotas	Rota A (km)	Rota B (km)	Rota C (km)	Média (km)
Colatina - Domingos Martins	182,00	134,00	129,00	148,33
Aracruz - Domingos Martins	133,00	132,00	-	132,50
Cariacica - Domingos Martins	47,20	-	-	47,20
Vila Velha - Domingos Martins	55,40	52,10	52,10	53,20
Cachoeiro - Domingos Martins	143,00	127,00	-	135,00

Fonte: Autor

Observa-se que as rotas de Santa Maria de Jetibá para a maioria dos aterros apresentam distâncias menores em comparação aos outros dois municípios analisados. Apesar dessa vantagem, as distâncias entre Domingos Martins e os dois principais aterros do estado (Cariacica e Vila Velha) equivalem aproximadamente à metade das distâncias de Santa Maria. Portanto, o volume de resíduos que poderia ser direcionado para o município compensa a distância mais longa nas outras rotas.

As rotas entre os aterros e o município de Afonso Cláudio se revelaram bem insatisfatórias, pois todas as distâncias superam 100 km. Embora outros municípios tenham sido avaliados, todos apresentaram desempenho igual ou inferior ao de Afonso Cláudio, razão pela qual não foram incluídos nas tabelas.

Após variadas análises e comparações no âmbito avaliado, o município de Domingos Martins emergiu como uma possível escolha vantajosa do ponto de vista logístico, notadamente devido à considerável quantidade de resíduos que pode ser direcionada para essa localidade sem a necessidade de deslocamentos significativos. A proximidade relativamente curta entre Domingos Martins e os principais aterros implica não apenas em uma eficiente gestão de distâncias, mas também na viabilidade de realizar múltiplas viagens ao longo do dia. Tal fator, por conseguinte, amplia ainda mais a capacidade de recebimento de resíduos pelo município.

Foi conduzida uma investigação adicional, examinando os municípios que abrigam aterros sanitários e as distâncias entre eles, utilizando os mesmos parâmetros previamente analisados. O resultado da distância média, considerando todas as rotas retiradas do

mapa, está apresentado na tabela 4 a seguir:

Tabela 4 – Distância média entre aterros (km)

Rotas	Colatina	Aracruz	Cariacica	Vila Velha	Cachoeiro
Colatina	0,00	77,80	129,67	143,00	239,00
Aracruz	76,90	0,00	81,10	89,77	207,00
Cariacica	135,50	81,70	0,00	27,97	135,00
Vila Velha	143,50	92,37	28,73	0,00	135,50
Cachoeiro	239,00	207,00	134,00	135,00	0,00

Fonte: Autor

Observando os resultados apresentados, nota-se que o município de Cachoeiro de Itapemirim demonstra os resultados mais desfavoráveis, encontrando-se a uma distância superior a 100 km de todos os demais aterros, o que acarreta em diversos obstáculos logísticos e ambientais devido à necessidade de extensas viagens de caminhão para o transporte dos resíduos até o destino.

Observa-se também que as distâncias entre Aracruz e os demais aterros, assim como entre Cariacica e os demais aterros, são as menores, com isso trazendo condições mais favoráveis, considerando que os principais aterros do estado estão situados em Cariacica e Vila Velha, com distâncias entre esses aterros na faixa de 80 km, com exceção da distância para Cachoeiro, previamente mencionada.

As menores distâncias entre os aterros de maior concentração e recebimento de resíduos tornam esses dois municípios, Cariacica e Aracruz, logisticamente promissores, uma vez que uma parcela considerável dos resíduos pode ser encaminhada a eles sem necessidade de longas viagens de caminhão, além disso, devido à menor distância, é possível realizar múltiplas viagens diárias.

Ao comparar os municípios de Domingos Martins, Aracruz e Cariacica em relação à sua proximidade com os aterros sanitários, observa-se que a distância entre Domingos Martins e Aracruz é superior a 100 km, enquanto a rota de Cariacica para ambos ultrapassa ligeiramente os 80 km na direção de Aracruz (tabela 5), tornando-se, portanto, uma alternativa mais favorável em termos de distância.

Tabela 5 – Distância média entre municípios (km)

Rotas	Aracruz	Cariacica	Domingos Martins
Aracruz	0,00	81,10	132,50
Cariacica	81,70	0,00	47,20
Domingos Martins	125,50	47,60	0,00

Fonte: Autor

Ao utilizar os valores apresentados nas tabelas anteriores para comparar a distância entre os municípios que se destacaram, Domingos Martins e Cariacica, com o município

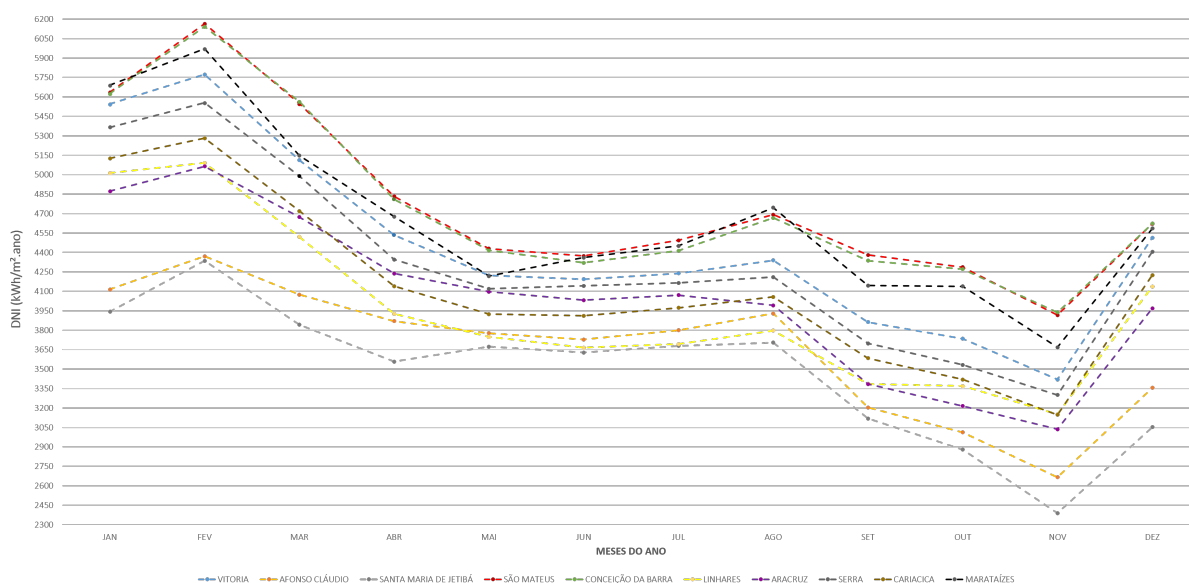
de Vila Velha, um dos maiores aterros sanitários, observa-se que a distância de Cariacica para Vila Velha é aproximadamente a metade da distância entre Domingos Martins e Vila Velha, sendo 27,97 km e 53,20 km, respectivamente. Isso torna o município de Cariacica uma alternativa logística favorável para a instalação da usina híbrida, considerando que possui um dos maiores aterros e está mais próximo de outro grande aterro, o que facilita o transporte de resíduos.

4.1.2 Viabilidade de irradiação

Ao observar os dados de DNI nos municípios litorâneos, destaca-se o município de São Mateus, apresentando uma irradiação média de 1.620,90 kWh/m².ano, com um valor máximo de 1.745,10 kWh/m².ano registrado no balneário de Barra Nova, bairro pertencente ao referido município. Outro destaque é o município de Conceição da Barra, que exibe uma média de 1.737,55 kWh/m².ano. Na região sul do estado, o município de Marataízes se sobressai, apresentando uma média de 1.697,10 kWh/m².ano.

Considerando uma análise preliminar das curvas de incidência solar por hora ao longo dos meses do ano, foram selecionados alguns municípios com maior irradiância anual para representação gráfica e comparação, a saber: Vitória, Afonso Cláudio, Santa Maria de Jetibá, São Mateus, Balneário de Barra Nova, Linhares, Aracruz, Serra, Cariacica e Marataízes. A figura 21 apresenta a síntese essa análise.

Figura 21 – Curva de Irradiação Normal Direta por meses do ano



Fonte: Autor (com dados do GSA [15])

Durante os meses de janeiro e fevereiro, é observado que a irradiância solar alcança níveis elevados devido à estação do ano ser o verão. Conforme as estações se alternam,

há uma diminuição gradual na irradiância, atingindo os valores mais baixos do ano em novembro, mês de inverno, e experimentando um aumento significativo em dezembro, marcando o início do verão novamente.

Com os dados estudados, pode-se notar que o município de Santa Maria de Jetibá possui os dados menos satisfatórios, atingindo o índice mais baixo dentre os analisados, mesmo nos meses de maior irradiação. Outros municípios como Afonso Cláudio e Linhares apresentaram resultados semelhantemente insatisfatórios e portanto foram descartados como possíveis localidades para instalações solares.

Como destaques positivos tem-se os municípios de São Mateus e Conceição da Barra praticamente empatados, Marataízes e Vitória, visto que possuem irradiâncias elevadas durante todo o ano, mesmo nos meses de menores temperaturas.

Os municípios de Cariacica, Aracruz e Serra apresentam resultados medianos e relativamente satisfatórios, por isso podem ser considerados como potenciais localidades de implantação da usina híbrida, quando combinados com outros fatores, como a logística, mencionada no item anterior.

4.1.3 Viabilidade de implantação final

Como mencionado anteriormente nesta seção, apenas a análise logística ou de irradiação solar por si só não é suficiente para determinar qual seria o município ideal para a instalação de uma usina híbrida, dado que tal usina utiliza tanto a energia solar quanto a biomassa para a geração de eletricidade. Portanto, é necessária a combinação dos estudos de ambos os aspectos. Entretanto, uma grande inconsistência é observada com relação à localização dos municípios destacados nos estudos individuais.

Quando examinada a irradiação solar no município de Domingos Martins, um dos destaques positivos identificados no estudo logístico, os valores encontrados não foram satisfatórios. A média de irradiação solar no município é de 1.306,80 kWh/m².ano, ficando inclusive abaixo da média do estado, que é de 1.447,22 kWh/m².ano.

Quando analisada a logística entre Conceição da Barra e São Mateus para com os municípios onde estão localizados os aterros, os municípios teve média de 269 km de distância para os aterros, onde a maior distância foi entre o município de Conceição da Barra e Cachoeiro de Itapemirim, com 437 km. As distâncias entre Conceição da Barra e os aterros foram superiores inclusive às de Afonso Cláudio, que foi o destaque negativo do estudo logístico.

Para abordar a questão da otimização entre a distância média mais favorável e os níveis de irradiação solar, foi realizada uma avaliação abrangente de todos os municípios situados na faixa litorânea do centro-sul. Os resultados desse processo de análise foram consolidados na tabela 6 a seguir, exibindo somente a comparação entre os valores dos

municípios mais satisfatórios para o estudo, levando em consideração tanto os aspectos logísticos quanto os de irradiação solar.

Tabela 6 – Comparativo entre estudos

Município analisado	Aterros	Distância média (km)	Irradiação média (kWh/m ² .ano)
Aracruz	Colatina	76,90	1.479,56
	Aracruz	0,00	
	Cariacica	81,10	
	Vila Velha	89,77	
	Cachoeiro	207,00	
Serra	Colatina	107,00	1.576,34
	Aracruz	57,30	
	Cariacica	38,20	
	Vila Velha	30,40	
	Cachoeiro	164,00	
Cariacica	Colatina	135,50	1.512,30
	Aracruz	81,70	
	Cariacica	0,00	
	Vila Velha	27,97	
	Cachoeiro	135,00	
Marataízes	Colatina	270,67	1.697,10
	Aracruz	221,00	
	Cariacica	135,00	
	Vila Velha	132,00	
	Cachoeiro	49,10	
Vitória	Colatina	146,00	1.626,96
	Aracruz	88,20	
	Cariacica	16,03	
	Vila Velha	11,67	
	Cachoeiro	133,00	

Fonte: Autor

Embora o município de Marataízes esteja situado na região sul do estado e apresente a maior irradiação solar entre os municípios analisados, a distância até quase todos os aterros sanitários é superior a 100 km. Esse cenário pode ser interpretado como uma complicação logística, uma vez que as viagens necessárias para o transporte de resíduos são muito longas, o que representa um ponto negativo do ponto de vista ambiental.

Na outra extremidade, encontra-se o município de Aracruz, que possui menor irradiação solar em comparação com outros municípios. No entanto, a distância entre os aterros sanitários é satisfatória, com exceção da distância até Cachoeiro de Itapemirim, que é a mais longa entre todos os municípios analisados.

Os municípios que demonstraram resultados satisfatórios em ambos os estudos foram Serra e Cariacica, apresentando uma irradiação média anual acima da média do estado e distâncias razoáveis entre os aterros sanitários, que não são consideradas obstáculos

significativos para o transporte de resíduos. Embora o município de Serra tenha distâncias menores entre os aterros em comparação com Cariacica, ao calcular a média das distâncias, observa-se que elas são bastante semelhantes, com a média de 79,38 km para Serra e 80,75 km para Cariacica.

Outra vantagem significativa de Cariacica é a presença de um dos maiores aterros sanitários do estado, que recebe uma quantidade substancial de resíduos, além de estar localizado na menor distância, entre os municípios analisados, de outro importante aterro sanitário do estado, localizado em Vila Velha, perdendo apenas para Vitória. Como resultado, a quantidade estimada de resíduos disponíveis para utilização na usina híbrida é consideravelmente alta. Além disso, é importante destacar que, entre os municípios avaliados, Cariacica apresenta uma das menores distâncias até Cachoeiro de Itapemirim, ficando atrás apenas de Marataízes.

Em questão de irradiação solar, o município apresenta valores satisfatórios e constantes durante o ano, mesmo nos meses de baixas temperaturas, como pode ser observado no estudo solar.

Conforme a análise descrita nos itens desta seção, pode-se concluir que, nas atuais condições logísticas e de irradiação solar estudadas e expostas, o município mais adequado para a instalação de uma usina híbrida seria Cariacica. Isso se deve ao fato de que o município apresenta uma irradiação solar satisfatória e consistente ao longo de todo o ano, além de possuir uma infraestrutura logística favorável. Além disso, a presença de um grande aterro sanitário em Cariacica reduz significativamente a necessidade de transporte de resíduos, o que contribui para a viabilidade e eficiência operacional da usina híbrida.

Um aspecto importante a ser considerado na escolha da localização ideal para usinas desse porte é a tríplice fronteira entre Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia. Esta região é caracterizada por uma excelente irradiação solar, o que torna a localização particularmente vantajosa para a geração de energia solar. Além disso, a proximidade de três estados aumenta a disponibilidade de resíduos sólidos urbanos, já que a coleta poderia ser realizada em uma área mais ampla, abrangendo as três unidades federativas.

Para viabilizar a instalação da usina nessa região, é fundamental a implementação de políticas públicas que promovam a cooperação interestadual. Estas políticas devem incluir acordos de auxílio e colaboração entre os governos estaduais de Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia. A cooperação entre os estados é essencial para garantir o sucesso do projeto, facilitando aspectos logísticos, regulatórios e financeiros, e assegurando que a usina possa operar de maneira eficiente e sustentável.

Como esta pesquisa foi focada na geração de energia elétrica no estado do Espírito Santo, optou-se pela melhor escolha de localização dentro do estado, levando em conta os dados e a metodologia adotada. A seleção da localização ideal foi baseada em critérios como a disponibilidade de irradiação solar, a proximidade de fontes de resíduos sólidos urbanos, e a viabilidade logística e econômica. Este enfoque assegura que a usina proposta

maximizará sua eficiência e contribuirá significativamente para a capacidade de geração de energia elétrica do estado.

Para trabalhos futuros, o estudo da implantação de uma usina híbrida na tríplice fronteira entre Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia pode abrir caminho para esse tipo de instalação e o desenvolvimento de tecnologia. Explorar essa possibilidade pode resultar em avanços significativos na geração de energia sustentável e na colaboração interestadual para projetos de grande escala.

4.2 Resumo dos dados de entrada nas simulações

Para facilitar a identificação e interpretação dos resultados das simulações, a tabela 7 sumariza os dados inseridos para as simulações, cujos resultados serão debatidos a seguir.

Tabela 7 – Resumo das entradas

Parâmetro	Especificação
Dados solarimétricos	GSA e NSRDB
Temperatura ambiente	25°C
Umidade relativa	70%
Pressão ambiente	1 bar
Espaçamento entre as linhas	24 metros
Número de linhas	8 - 22
Tipo de HTF	Therminol VP-1
Temperatura de entrada no campo solar	280°C
Perdas de calor nos trocadores de calor	1%
Temperatura mínima do HTF	20°C
Temperatura máxima do HTF	400°C
Temperatura de operação HTF	390°C
Pressão máxima HTF	11 bar
Pressão de operação HTF	10 bar
Temperatura do vapor no ciclo	350°C
Perda de massa de água na torre de resfriamento	1,6%
DNI diária máxima	4,076kW/m ²
Ângulo de inclinação do coletor	0°
Ângulo ideal para não sombreamento	13°31'5,9"
Modelo de PTC adotado	EuroTrough150
Área de concentração do coletor	817,5m ²
Fluxo mássico de RSU	27,04 kg/s
Período diurno	07:00 às 17:59
Período noturno	18:00 às 06:59

Fonte: Autor

4.3 Utilização de biomassa

A primeira simulação conduzida consistiu na combustão da biomassa, na qual uma vazão de 27,04 kg/s de biomassa sólida, à temperatura ambiente, foi introduzida na câmara de combustão e queimada, resultando na produção de um gás de exaustão. Esse gás gerado apresentou um fluxo mássico de 318,7 kg/s e uma temperatura média de 791,18°C, devido à queima com um excesso de ar de 200%. Tal excesso foi empregado com o intuito de manter a temperatura abaixo de 1000°C, em conformidade com as limitações físicas dos materiais utilizados. Posteriormente, esse gás foi direcionado para a troca de calor com o HTF na planta híbrida, visando alcançar a temperatura máxima do sistema durante os períodos de intermitência solar.

Mesmo que o sistema tenha sido projetado para gerar energia elétrica sem auxílio da combustão de biomassa no horário de pico, o programa adota uma restrição termodinâmica que impede que o HTF passe pelo trocador de calor sem haver uma troca mínima de calor.

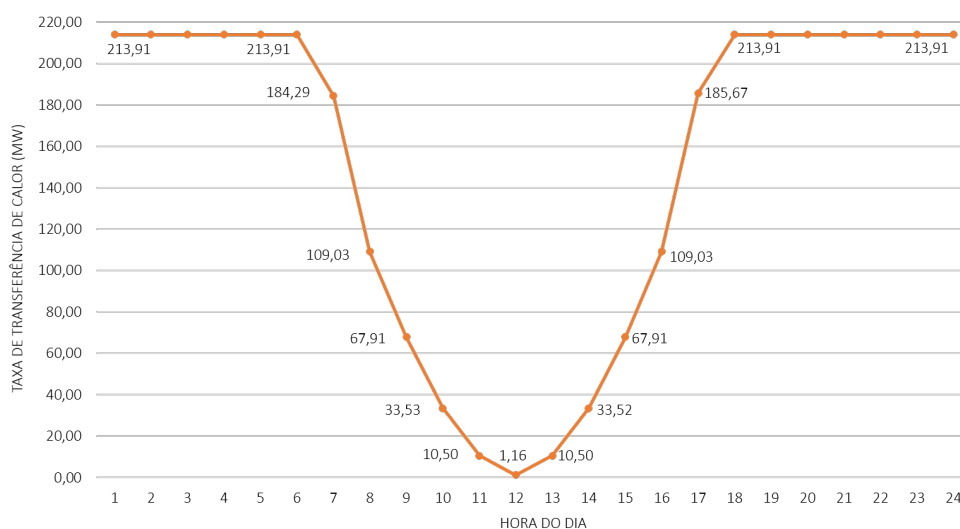
Pelas especificações das matrizes de cálculos realizados pelo programa, não é permitido que o HTF entre e saia do trocador de calor com a mesma temperatura de 390°C, tendo de existir uma diferença de, no mínimo, 0,1°C. Na configuração de dimensionamento máximo considerada para o sistema, a troca mínima ficou em 0,6°C, calculada internamente pelo programa, resultando em uma troca mínima de calor durante o horário de máxima irradiação.

Durante o período de pico da geração solar, observou-se que o calor transferido do gás de exaustão para o HTF foi de aproximadamente 1 MW. Por outro lado, durante o período sem irradiação solar, essa transferência de calor atingiu cerca de 214 MW. O gráfico apresentado na figura 22 ilustra a taxa de transferência de calor ao longo de um dia típico no cenário de geração máxima de 78 MW.

Ao comparar os resultados obtidos com os outros cenários de geração, observou-se que o aumento da taxa de transferência de calor é proporcional à diferença entre as temperaturas de entrada no trocador de calor. Como essa discrepância era de apenas 2°C, como visto no item anterior, a variação na taxa de transferência de calor entre os cenários era mínima. Portanto, optou-se por representar graficamente apenas um dos cenários, a fim de evitar a redundância de gráficos semelhantes.

A temperatura de saída do gás de combustão pós-troca de calor também foi objeto de análise, uma vez que apresenta valores consideráveis durante o dia, atingindo cerca de 788°C, e mantém níveis razoáveis durante a noite, em torno de 220°C. Esses valores sugerem a viabilidade de sua utilização em processos de cogeração ou em aplicações industriais.

Figura 22 – Taxa de transferência de calor por hora do dia típico



Fonte: Autor

4.4 Dimensionamento do Campo Solar

Conforme mencionado no capítulo anterior, o posicionamento dos PTCs foi realizado de maneira otimizada, com a disposição de duas fileiras paralelas, cada uma composta por dois coletores em série, contendo então 4 coletores em cada linha. Um estudo paramétrico foi conduzido para analisar as diferentes quantidades de PTCs na melhor configuração para a geração de energia elétrica, considerando-se o limite da troca de calor do gás de exaustão da biomassa.

O estudo paramétrico foi conduzido por meio de oito simulações, variando o número de linhas dos coletores de forma arbitrária. As simulações foram realizadas aumentando de duas em duas linhas, dentro da faixa de 8 a 22 linhas, o que corresponde a uma variação de 32 a 88 coletores, com incrementos de quatro em quatro. A tabela 8 apresenta os resultados iniciais desse estudo.

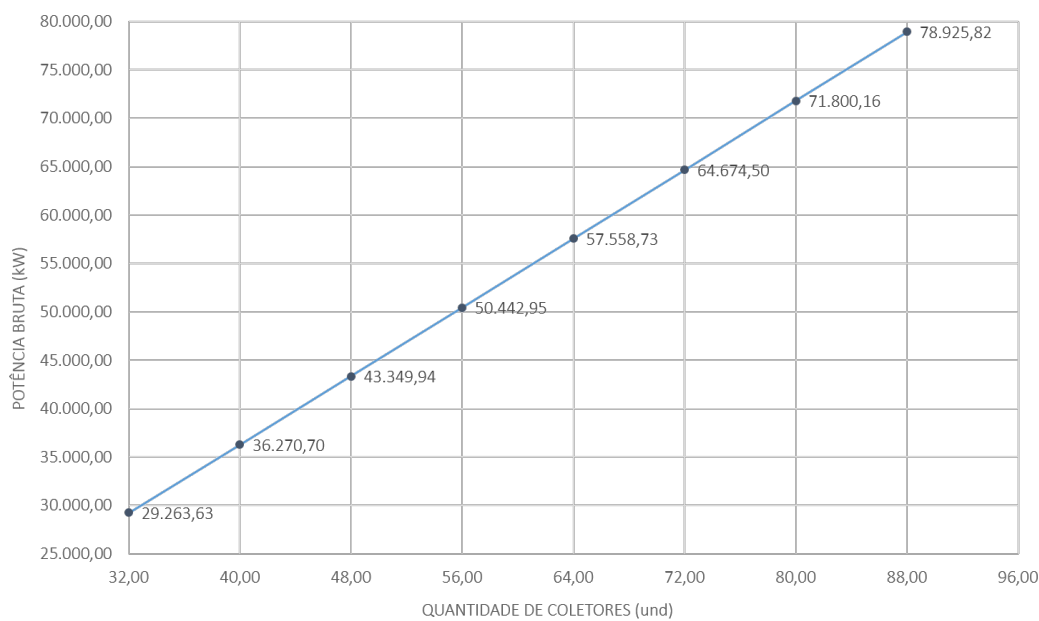
Tabela 8 – Relação PTCs x Potência gerada

Cenário	linhas (4 coletores cada)	Coletores (und)	Potência Bruta (kW)	Potência Líquida (kW)
A	8,00	32,00	29.263,63	28.789,55
B	10,00	40,00	36.270,70	35.683,09
C	12,00	48,00	43.349,94	42.647,70
D	14,00	56,00	50.442,95	49.625,75
E	16,00	64,00	57.558,73	56.626,25
F	18,00	72,00	64.674,50	63.626,75
G	20,00	80,00	71.800,16	70.636,97
H	22,00	88,00	78.925,82	77.647,19

Fonte: Autor

É evidente que o aumento da quantidade de coletores resulta em um aumento na potência gerada, por conta do aumento da área de absorção de calor. No entanto, uma análise mais detalhada revelou que esse aumento ocorreu de forma praticamente linear, como ilustrado na figura 23 abaixo.

Figura 23 – Variação da potência gerada com número de coletores



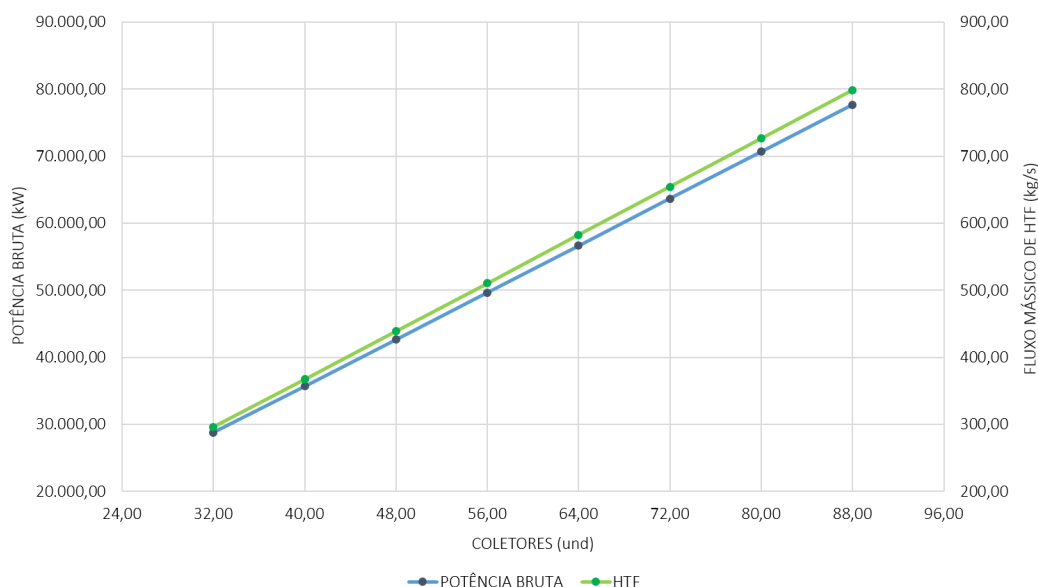
Fonte: Autor

Conforme a quantidade de coletores aumenta e mais potência é gerada, é necessário também aumentar a quantidade de HTF circulando no sistema. Observou-se que esse aumento segue a mesma tendência de linearidade mencionada anteriormente, conforme ilustrado na figura 24.

A área do campo solar também foi estudada e relacionada com a produção de potência nos cenários avaliados. A tabela 9 demonstra essa relação. Notoriamente, quanto mais coletores, mais potência é gerada e uma área maior é necessária para alocação correta dos coletores.

O aumento da quantidade de coletores resulta em uma maior capacidade de captura e conversão de energia solar em calor. Essa expansão da infraestrutura, por sua vez, contribui para o aumento da área total ocupada pela usina, proporcionando uma maior superfície para a exposição aos raios solares. Consequentemente, o aumento da área de captação solar está diretamente relacionado ao aumento da potência gerada pela usina, uma vez que mais energia solar é absorvida e convertida em calor, alimentando o ciclo de geração de eletricidade.

Figura 24 – Variação da potência gerada com vazão de HTF



Fonte: Autor

Tabela 9 – Área do campo solar

Cenário	Coletores (und)	Área (m ²)	Potência Líquida Usina (kW)
A	32,00	26.160,00	28.789,55
B	40,00	32.700,00	35.683,09
C	48,00	39.240,00	42.647,70
D	56,00	45.780,00	49.625,75
E	64,00	52.320,00	56.626,25
F	72,00	58.860,00	63.626,75
G	80,00	65.400,00	70.636,97
H	88,00	71.940,00	77.647,19

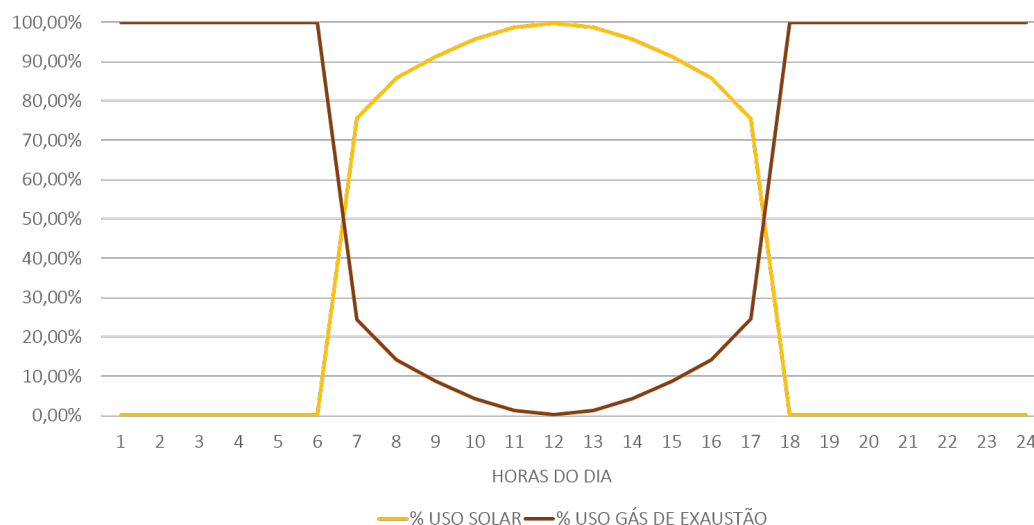
Fonte: Autor

4.5 Resultados do sistema

Ao analisar a linearidade dos dados, foi viável determinar a proporção percentual de utilização de cada fonte de energia durante cada hora do dia típico, mantendo-se consistente em todos os cenários simulados. A representação gráfica desses cálculos é apresentada na Figura 25, evidenciando os resultados obtidos.

A intermitência solar durante períodos sem luz solar direta, no caso da simulação realizada sendo das 00h às 06h e das 18h às 23h, é compensada pela utilização do gás de combustão da biomassa. Durante esses intervalos, quando a geração solar é inexistente, a usina pode operar inteiramente com a queima de biomassa para manter a produção contínua de eletricidade. O gás resultante da combustão da biomassa é utilizado para aquecer o fluido do campo solar durante a noite, garantindo a continuidade da geração

Figura 25 – Porcentagem de utilização de fontes em um dia típico



Fonte: Autor

de eletricidade. Essa estratégia permite que a usina opere de forma eficiente e confiável, fornecendo energia elétrica mesmo durante os períodos de baixa irradiação solar.

Além disso, a utilização combinada de solar e biomassa permite uma gestão flexível da produção de energia elétrica ao longo do dia e em dias que a irradiação não atinja os valores máximos ou ideais. Durante os horários de maior incidência solar, a geração de eletricidade é predominantemente solar, reduzindo a dependência da biomassa ou até mesmo zerando sua utilização. Por outro lado, nos horários de baixa insolação, a usina pode aumentar a utilização do gás de combustão para compensar a falta de geração solar, garantindo uma produção constante de eletricidade. Essa abordagem híbrida permite uma utilização mais eficiente dos recursos disponíveis, maximizando a produção de energia limpa e sustentável ao longo do dia.

A relação entre o fluxo de água do condensador e a água de resfriamento da torre de resfriamento foi analisada, revelando uma proporção de aproximadamente 37 vezes. Esta proporção encontra-se dentro do padrão recomendado, que varia geralmente de 30 a 80 vezes, indicando uma adequada eficiência no processo de resfriamento do sistema.

Os resultados obtidos a partir das análises das simulações realizadas revelaram indicadores significativos sobre a eficiência do sistema híbrido termossolar-biomassa. A eficácia do campo solar, medida em termos de conversão de energia solar em calor, alcançou uma taxa de 71,79%. Por outro lado, a eficiência da caldeira de RSU apresentou o resultado de 76,08%. A eficiência do ciclo de Rankine Convencional (CRC), responsável pela conversão do calor em energia elétrica, foi calculada em 37,00%. Esses valores encontram-se em conformidade com os padrões previamente estabelecidos e corroboram com a viabilidade técnica do projeto.

Considerando o sistema como um todo, a eficiência global, que representa a proporção

de energia solar e energia térmica do gás de exaustão convertida em eletricidade, foi determinada em 26,57% durante o dia e 28,15% durante a noite. Esse resultado demonstra a eficácia do sistema híbrido em integrar múltiplas fontes de energia renovável e maximizar a utilização de recursos disponíveis, corroborando com os números encontrados nos estudos e explicitados no referencial teórico desta pesquisa.

4.6 Viabilidade econômica preliminar

Os valores utilizados neste estudo estão expressos em reais (BRL). Quando necessário, para a conversão para o Real Brasileiro foi utilizada a cotação de R\$5,14 para cada Dólar Americano (USD).

Cada coletor do modelo adotado (*EuroTrough 150*) tem um custo médio de USD\$300 por metro quadrado, incluindo sua instalação [67]. Considerando o coletor escolhido, a quantidade de coletores a serem utilizados e a geração da planta descritos na tabela 9, além de um adicional de 4% para serviços extras e auxiliares, o custo total para a implantação de uma planta de concentração solar desse porte variar de acordo com a tabela 10.

Tabela 10 – Custo fonte solar

Coletores (und)	Área (m ²)	Valor (USD/m ²)	Serviços Auxiliares (%)	Valor total (R\$)
32	26.160,00	300,00	4%	41.952.268,80
40	32.700,00	300,00	4%	52.440.336,00
48	39.240,00	300,00	4%	62.928.403,20
56	45.780,00	300,00	4%	73.416.470,40
64	52.320,00	300,00	4%	83.904.537,60
72	58.860,00	300,00	4%	94.392.604,80
80	65.400,00	300,00	4%	104.880.672,00
88	71.940,00	300,00	4%	115.368.739,20

Fonte: Autor

Em ciclos Rankine convencionais, a estimativa do valor inicial de investimento leva em conta a caldeira, a turbina, método de resfriamento e os sistemas auxiliares necessários para a operação. Para o resfriamento, as torres de resfriamento em geral são financeiramente dispendiosas e construídas apenas para retornos à longo prazo ou em locais onde o fluxo de água natural não é de fácil acesso. Para a caldeira, o valor varia de acordo com o material e volume a ser queimado, além de qual será a temperatura de trabalho para definição do material mais apropriado.

Dependendo da capacidade instalada, sistemas convencionais com resfriamento por torre de resfriamento por convecção natural geralmente custam entre USD\$910 e USD\$1.050 por kW gerado. Para incineração de biomassa, os valores podem chegar a US\$1.200 [67,68]. Nessa pesquisa foi assumido o valor médio de USD\$980 por kW e, considerando também

um adicional de 4% para serviços extras e auxiliares, a tabela 11 demonstra o valor total estimado para investimento por fonte de RSU.

Tabela 11 – Custo fonte RSU

Potência (kW)	Valor (USD/kW)	Serviços Auxiliares (%)	Valor total (R\$)
28.789,55	980,00	4%	150.819.459,63
35.683,09	980,00	4%	186.932.595,82
42.647,70	980,00	4%	223.417.995,27
49.625,75	980,00	4%	259.973.834,11
56.626,25	980,00	4%	296.647.258,98
63.626,75	980,00	4%	333.320.683,32
70.636,97	980,00	4%	370.045.043,95
77.647,19	980,00	4%	406.769.404,06

Fonte: Autor

O valor total do investimento inicial de acordo com a quantidade de coletores e a potência líquida gerada é representado na tabela 12.

Tabela 12 – Custo Investimento Inicial

Coletores (und)	Potência (kW)	Custo fonte solar (R\$)	Custo fonte RSU (R\$)	Investimento total (R\$)
32	28.789,55	41.952.268,80	150.819.459,63	192.771.728,43
40	35.683,09	52.440.336,00	186.932.595,82	239.372.931,82
48	42.647,70	62.928.403,20	223.417.995,27	286.346.398,47
56	49.625,75	73.416.470,40	259.973.834,11	333.390.304,51
64	56.626,25	83.904.537,60	296.647.258,98	380.551.796,58
72	63.626,75	94.392.604,80	333.320.683,32	427.713.288,12
80	70.636,97	104.880.672,00	370.045.043,95	474.925.715,95
88	77.647,19	115.368.739,20	406.769.404,06	522.138.143,26

Fonte: Autor

Para o cálculo da receita estimada, utilizou-se o valor de venda de energia elétrica estabelecido nos leilões da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para geração por incineração RSU e geração por fonte solar [69]. Como não existem usinas de geração por tecnologia de concentração solar catalogadas pela ANEEL, o valor considerado para a receita da componente solar foi equivalente ao da tecnologia fotovoltaica.

No Apêndice I são descritos todos os valores da receita por hora do dia e por geração de potência, conforme descrito na metodologia. A tabela 13 demonstra o resumo dos valores de receita encontrados.

Com os dados de investimento e receita estabelecidos, os indicadores econômicos foram calculados. Foram considerados juros de 15% ao ano, tempo de vida de 20 anos e taxa de operação e manutenção de 4%. Os indicadores foram calculados para 100% do valor total da receita e também para cenários de atenuação de 40% e 60% do valor total da receita.

A atenuação de receita refere-se à prática de ajustar as projeções financeiras para considerar riscos e incertezas. Este ajuste é essencial para fornecer uma visão mais realista

Tabela 13 – Resumo da receita diária e anual

Potência (kW)	Investimento total (R\$)	Receita diária (R\$/dia)	Receita anual (R\$/ano)
28.789,55	192.771.728,43	328.655,23	119.959.160,72
35.683,09	239.372.931,82	407.350,46	148.682.917,71
42.647,70	286.346.398,47	486.856,89	177.702.766,39
49.625,75	333.390.304,51	566.516,83	206.778.641,33
56.626,25	380.551.796,58	646.432,99	235.948.042,14
63.626,75	427.713.288,12	726.349,16	265.117.442,53
70.636,97	474.925.715,95	806.376,32	294.327.356,76
77.647,19	522.138.143,26	886.403,48	323.537.270,56

Fonte: Autor

das receitas esperadas, especialmente em projetos de longo prazo. A atenuação leva em conta variáveis como flutuações de mercado, mudanças regulatórias, variabilidade de demanda e possíveis interrupções operacionais [70].

Contingências de riscos envolvem a identificação e mitigação de potenciais ameaças que podem impactar negativamente o fluxo de caixa. Exemplos incluem riscos tecnológicos, riscos de mercado, e riscos regulatórios. Incorporar essas contingências nas projeções financeiras ajuda a criar um *buffer* (mecanismo de proteção ou reserva usado para absorver impactos inesperados ou variações), assegurando a viabilidade econômica do projeto [71].

As tabelas a seguir demonstram os resultados os indicadores econômicos calculados com os dados obtidos no estudo para cada cenário de geração, considerando 0% de atenuação (tabela 14), 40% de atenuação (tabela 15) e 60% de atenuação (tabela 16).

Tabela 14 – Indicadores econômicos - Receita sem atenuação

Investimento total (R\$)	Receita anual (R\$/ano)	Indicadores econômicos			
		VPL (R\$)	TIR (%/ano)	PBS (anos)	PBD (anos)
192.771.728,43	119.959.160,72	550.381.552,69	59,84	1,61	2,06
239.372.931,82	148.682.917,71	681.707.817,33	59,72	1,61	2,07
286.346.398,47	177.702.766,39	814.500.264,22	59,67	1,61	2,07
333.390.304,51	206.778.641,33	947.570.141,10	59,64	1,61	2,07
380.551.796,58	235.948.042,14	1.081.103.137,90	59,62	1,61	2,07
427.713.288,12	265.117.442,53	1.214.636.132,63	59,60	1,61	2,07
474.925.715,95	294.327.356,76	1.348.369.743,14	59,59	1,61	2,07
522.138.143,26	323.537.270,56	1.482.103.351,58	59,58	1,61	2,08

Fonte: Autor

Os resultados da análise de viabilidade financeira do projeto demonstraram robustez e atratividade econômica sob diversas condições de atenuação. O VPL revelou-se positivo e distante do valor de investimento em todas as simulações realizadas, indicando que o projeto é financeiramente viável independentemente das variações nas condições de atenuação. Este resultado positivo sugere que o investimento no projeto proporcionará

Tabela 15 – Indicadores econômicos - Receita com 40% de atenuação

Investimento total (R\$)	Receita anual (R\$/ano)	Indicadores econômicos			
		VPL (R\$)	TIR (%/ano)	PBS (anos)	PBD (anos)
192.771.728,43	71.975.496,43	250.035.892,59	35,90	2,68	3,87
239.372.931,82	89.209.750,63	309.445.550,76	35,83	2,68	3,88
286.346.398,47	106.621.659,83	369.580.056,77	35,80	2,69	3,88
333.390.304,51	124.067.184,80	429.851.717,98	35,78	2,69	3,89
380.551.796,58	141.568.825,28	490.352.335,36	35,77	2,69	3,89
427.713.288,12	159.070.465,52	550.852.951,72	35,76	2,69	3,89
474.925.715,95	176.596.414,05	611.452.748,05	35,75	2,69	3,89
522.138.143,26	194.122.362,34	672.052.543,35	35,75	2,69	3,89

Fonte: Autor

Tabela 16 – Indicadores econômicos - Receita com 60% de atenuação

Investimento total (R\$)	Receita anual (R\$/ano)	Indicadores econômicos			
		VPL (R\$)	TIR (%/ano)	PBS (anos)	PBD (anos)
192.771.728,43	47.983.664,29	99.863.062,53	23,93	4,02	7,05
239.372.931,82	59.473.167,08	123.314.417,48	23,89	4,02	7,07
286.346.398,47	71.081.106,56	147.119.953,04	23,87	4,03	7,08
333.390.304,51	82.711.456,53	170.992.506,42	23,85	4,03	7,09
380.551.796,58	94.379.216,86	194.976.934,09	23,85	4,03	7,09
427.713.288,12	106.046.977,01	218.961.361,27	23,84	4,03	7,10
474.925.715,95	117.730.942,70	242.994.250,50	23,84	4,03	7,10
522.138.143,26	129.414.908,23	267.027.139,24	23,83	4,03	7,10

Fonte: Autor

retornos superiores aos custos iniciais, fortalecendo a confiança na sua sustentabilidade financeira a longo prazo.

Além disso, a TIR variou entre aproximadamente 24% e 60%, refletindo um retorno significativo sobre o investimento inicial. O PBS situou-se na faixa de 1,6 a 4 anos, enquanto o PBD variou entre 2 e 7 anos, aproximadamente. Esses indicadores de retorno e de recuperação do investimento demonstram que o projeto não apenas recupera os investimentos iniciais rapidamente, mas também proporciona rendimentos atraentes.

A combinação de uma TIR elevada e períodos de payback curtos evidencia a lucratividade e a eficiência do projeto, tornando-o uma opção financeiramente sólida e atraente para investidores.

4.7 Resumo dos resultados obtidos

A tabela 17 sumariza os dados resultantes das simulações e viabilidade financeira, além das eficiências e dados relevantes.

Tabela 17 – Resumo das saídas

Parâmetro	Especificação
Localização escolhida	Cariacica
Área do campo solar	2,1ha - 7,2ha
Temperatura de saída do campo solar	278,9°C - 389,4°C
Potência bruta máxima gerada	29,26 - 78,92MW
Potência líquida máxima gerada	28,79 - 77,65MW
Eficiência do campo solar	71,79%
Eficiência da caldeira de RSU	76,08%
Eficiência do ciclo de potência	37,00%
Eficiência global do sistema - diurna	26,57%
Eficiência global do sistema - noturna	28,15%
Investimento inicial (R\$M)	192,77 - 522,14
Cenário sem atenuação	
Valor Presente Líquido (R\$M)	550,38 - 1.482,10
Taxa Interna de Retorno	59,84% - 59,58%
<i>Payback</i> simples	1,61 anos
<i>Payback</i> descontado	2,06 - 2,08 anos
Cenário com atenuação de 40%	
Valor Presente Líquido (R\$M)	250,03 - 672,05
Taxa Interna de Retorno	35,90% - 35,75%
<i>Payback</i> simples	2,68 - 2,69 anos
<i>Payback</i> descontado	3,87 - 3,89 anos
Cenário com atenuação de 60%	
Valor Presente Líquido (R\$M)	99,86 - 267,03
Taxa Interna de Retorno	23,93% - 23,83%
<i>Payback</i> simples	4,02 - 4,03 anos
<i>Payback</i> descontado	7,05 - 7,10 anos

Fonte: Autor

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A principal contribuição desta dissertação foi propor um estudo de viabilidade técnico-financeira preliminar para a implementação de um sistema térmico híbrido destinado à geração de energia elétrica no estado do Espírito Santo. Este projeto inovador integra duas fontes renováveis: biomassa proveniente de resíduos urbanos e radiação solar, visando não apenas o aumento da capacidade de geração de energia elétrica, mas também a sustentabilidade ambiental e a gestão eficiente de resíduos.

O estudo abordou diversos objetivos, incluindo a análise dos benefícios ambientais e energéticos proporcionados pelas usinas híbridas, a avaliação da viabilidade técnica e financeira preliminar para a instalação de uma planta híbrida no Espírito Santo, e a identificação da localização mais adequada com base em critérios logísticos para a coleta de resíduos urbanos e na disponibilidade de irradiação solar. Além disso, foram realizadas simulações detalhadas para determinar a quantidade necessária de resíduos e coletores solares a fim de atingir as metas de geração de energia elétrica estabelecidas.

Os resultados do estudo indicaram que a implantação da usina híbrida em Cariacica é viável. A área do campo solar necessária varia entre 2,1 e 7,2 hectares, com temperaturas de saída do campo solar entre 278,9°C e 389,4°C. A potência bruta máxima gerada pelo sistema foi estimada entre 29,26 MW e 78,92 MW, enquanto a potência líquida máxima gerada variou entre 28,79 MW e 77,65 MW. Estes números são bastante expressivos, demonstrando a capacidade do sistema em fornecer uma quantidade significativa de energia para a região.

A eficiência do campo solar foi de 71,79%, a eficiência da caldeira de RSU atingiu 76,08%, e a eficiência do ciclo de potência foi de 37,00%. A eficiência global do sistema variou entre 26,57% durante o dia e 28,15% durante a noite, o que é notável, considerando-se as variabilidades inerentes às fontes renováveis.

A pesquisa também revelou dados financeiros promissores: o investimento inicial variou entre R\$192,77 milhões e R\$522,14 milhões. Em um cenário sem atenuação, o Valor Presente Líquido (VPL) foi estimado entre R\$550,38 milhões e R\$1,482,10 bilhões, com uma Taxa Interna de Retorno (TIR) entre 59,58% e 59,84%. O *Payback* Simples (PBS) foi de 1,61 anos, e o *Payback* Descontado (PBD) variou entre 2,06 e 2,08 anos. Mesmo em cenários de atenuação de 40% e 60%, os resultados financeiros se mantiveram positivos, destacando a robustez econômica do projeto. Estes resultados não apenas demonstram a viabilidade econômica do projeto, mas também sua atratividade como um investimento potencialmente lucrativo e sustentável.

Além dos benefícios econômicos, a utilização de biomassa de resíduos urbanos oferece vantagens ambientais significativas, como a melhoria na gestão de resíduos sólidos e a redução do impacto ambiental. A pesquisa demonstrou que a quantidade de resíduos disponíveis é suficiente para atender às necessidades de uma planta híbrida, reforçando a

importância de políticas públicas para garantir a coleta eficiente desses resíduos e promover a integração de diferentes fontes renováveis de energia.

Ao concluir esta dissertação, é evidente que os estudos realizados abriram novas perspectivas e destacaram a viabilidade de implantação de sistemas térmicos híbridos. Espera-se que este trabalho contribua para ampliar o conhecimento sobre usinas híbridas, especificamente aquelas que combinam tecnologias termossolar e biomassa, estimulando pesquisas adicionais e servindo como referência para estudos semelhantes. O sucesso desta pesquisa pode fomentar o interesse por tecnologias de geração de energia renovável, promovendo uma expansão significativa não só na melhoria ambiental e energética, mas também no desenvolvimento econômico e social de regiões como o estado do Espírito Santo e além.

Com base nos resultados alcançados, abre-se um horizonte promissor para a expansão e aprimoramento das tecnologias de geração de energia renovável. Este trabalho demonstra que, com a integração adequada de diferentes fontes de energia e a implementação de tecnologias avançadas, é possível não apenas atender às demandas energéticas de uma região, mas também contribuir para um desenvolvimento sustentável e ambientalmente responsável.

5.1 Estudos futuros

Alguns tópicos sugeridos para trabalhos futuros incluem:

- Investigação dos impactos na eficiência e no desempenho global da planta híbrida a partir da alteração da configuração do sistema, movendo o trocador de calor da combustão da biomassa para outro ponto do ciclo, encurtando assim o caminho do fluido pelo sistema durante períodos sem irradiação.
- Realizar uma análise comparativa de diferentes configurações de sistemas híbridos, combinando diversas tecnologias solares (como concentradores parabólicos e torres solares) e diferentes tipos de biomassa, com foco em identificar quais combinações oferecem os melhores resultados em termos de eficiência energética, custos operacionais e impacto ambiental.
- Explorar a viabilidade e os benefícios da utilização de tecnologias de gaseificação ou pirólise como fontes de gás para a produção de energia elétrica em plantas híbridas em diversos ciclos de potência.
- Simulações avançadas e modelos computacionais para prever o desempenho energético de usinas híbridas em diferentes condições climáticas e operacionais,

podendo incluir a criação de algoritmos para otimizar a operação das usinas e maximizar a eficiência e a geração de energia ao longo do ano.

- Análise das condições geográficas e climáticas de outras regiões do Brasil para identificar locais potenciais para a implantação de usinas híbridas.

- Investigação sobre métodos avançados de armazenamento de energia e tecnologias de hidrogênio verde, para superar os desafios relacionados à intermitência das fontes renováveis e garantir um suprimento de energia mais estável e confiável.

- Estudo de viabilidade da implantação de usina híbrida na tríplice fronteira entre Espírito Santo, Minas Gerais e Bahia, considerando os aspectos solarimétricos e logísticos positivos.

REFERÊNCIAS

- [1] C.-Q. das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, 2023.
- [2] O. das Nações Unidas, “Report of the conference of the parties serving as the meeting of the parties to the paris agreement on its third session, held in glasgow from 31 october to 13 november 2021,” 2021, p. Seção 3/CMA.3.
- [3] I. E. Agency, *Electricity Market Report 2023*, 2023.
- [4] A. N. de Energia Elétrica, “Superintendência de concessões e autorizações de geração,” 2023.
- [5] M. Aria and C. Cuccurullo, “bibliometrix: An r-tool for comprehensive science mapping analysis,” *Journal of Informetrics*, vol. 11, no. 4, pp. 959–975, 2017.
- [6] U. S. E. I. Administration, *Energy explained: renewable and non-renewable energy sources*, 2022.
- [7] I. E. T. Energética, *Manual de Termos e Conceitos: Transição Energética*, 2020, vol. 1.
- [8] O. das Nações Unidas, “The global goals,” 2015, acesso em Fevereiro/2024. [Online]. Available: <https://www.globalgoals.org/goals/>
- [9] I. E. Agency, *Energy Statistics Data Browser*, 2023.
- [10] I. E. Agency, I. R. E. Agency, U. Nations, T. W. Bank, and W. H. Organization, *Trackin SDG07 - The Energy Progress Report 2022*. International Renewable Energy Agency, 2023, vol. 1.
- [11] E. . Y. G. Limited, *Renewable Energy Country Attractiveness Index: RECAI*, 2023, vol. 62.
- [12] I. B. de Geografia e Estatística, *Pesquisa Nacional Por Amostagem Domiciliar Continuada*. Diretoria de Pesquisas, 2023, vol. 1.
- [13] —, “Panorama geral - brasil - espírito santo,” 2023.
- [14] A. D. R. D. S. P. D. E. D. E. SANTO, *Balanco Energético do Estado do Espírito Santo 2022*. Governo Federal do Estado do Espírito Santo, 2023, vol. 1.
- [15] “Global solar atlas,” acesso em Janeiro/2024. [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map>

- [16] F. das Indústrias do Espírito Santo FINDES, *Rotas estratégicas para o futuro da indústria do Espírito Santo*. Federação das Indústrias do Espírito Santo - FINDES, 2022, vol. 1.
- [17] B. Zohuri, “Hybrid energy systems: Driving reliable renewable sources of energy storage.” Springer, 2017.
- [18] D. Ribeiro, “Carvão,” vol. 2, no. 1. Casa das Ciências, 2014.
- [19] A. A. Gorji and I. Martek, “Renewable energy policy and deployment of renewable energy technologies: The role of resource curse,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 30, no. 39, pp. 91 377–91 395, 2023.
- [20] I. E. Agency, *Renewables 2023 - Analysis and Forecast to 2028*, 2024.
- [21] M. Massoud, G. Vega, A. Subburaj, and J. Partheepan, “Review on recycling energy resources and sustainability,” *Heliyon*, 2023.
- [22] T. de Contas da União (TCU), *Relatório de Políticas e Programas de Governo: Políticas públicas de inserção de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira*. Tribunal de Contas da União - TCU, 2019, vol. 1.
- [23] T. Barral, *Transição energética e perspectivas para investimentos no Brasil*. Ministério de Minas e Energia do Brasil, 2023, vol. 1.
- [24] G. do Estado do Espírito Santo, *Plano de Descarbonização e Neutralização das Emissões de GEE do Espírito Santo – Caderno de Planejamento Estratégico: Estratégias, Ações e Políticas Públicas necessárias para a neutralização das emissões de GEE do ES até 2050*, 2023, vol. 1.
- [25] J. Santos, J. C. Palacio, A. M. Reyes, M. Carvalho, A. J. Freire, M. A. Barone, and I. Yahyaoui, *Concentrating Solar Power*, in: *Advances in renewable energies and power technologies: Solar and Wind Energies*. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2018, vol. 1, ch. 12 - Concentrating Solar Power, pp. 373–402.
- [26] J. Pipe, *Energia solar*. São Paulo: Callis, 2016, vol. 1.
- [27] R. Sturdivant and E. K. Chong, “Systems engineering of hybrid renewable electric power,” in *2016 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*. IEEE, 2016, pp. 90–94.
- [28] P. H. Wagner, “Thermodynamic simulation of solar thermal power stations with liquid salt as heat transfer fluid,” Ph.D. dissertation, Technische Universität München, 2012.
- [29] R. P. M. Corral, “Thermodynamic optimisation of thermosolar hybrid brayton cycle plants,” Ph.D. dissertation, Universidad de Salamanca, 2020.

- [30] M. T. Tolmasquim, *Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear*. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016, vol. 1.
- [31] J. L. Soares, “Entenda os diferentes ciclos termodinâmicos em termelétricas,” 2023, acesso em Março/2024. [Online]. Available: <https://mercuriopartners.com.br/ciclos-termodinamicos-termeletricas/>
- [32] E. E. S. Lora, M. d. Nascimento *et al.*, “Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação,” *Rio de Janeiro: Interciência*, vol. 2, p. 2, 2004.
- [33] C. Y. Wereko-Brobby and E. B. Hagan, “Biomass conversion and technology,” 1996.
- [34] C. SILVA, J. RABELO, and H. BOLLMANN, “Energia no lixo: uma avaliação da viabilidade do uso do biogás a partir de resíduos sólidos urbanos,” *IV Encontro Nacional de Anppas*, pp. 1–20, 2008.
- [35] L. A. Okamura, “Avaliação e melhoria do poder calorífico de biogás proveniente de resíduos sólidos urbanos,” Master’s thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.
- [36] F. B. Dovichi Filho, E. E. S. Lora, J. C. E. Palacio, O. J. Venturini, and R. L. Jaén, “An approach to technology selection in bioelectricity technical potential assessment: A brazilian case study,” *Energy*, vol. 272, p. 126995, 2023.
- [37] D. Panepinto, V. Tedesco, E. Brizio, and G. Genon, “Environmental performances and energy efficiency for msw gasification treatment,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 6, pp. 123–135, 2015.
- [38] S. Ahammad, A. H. Khan, T. E. Nur, and S. Ghose, “A hybrid of 30 kw solar pv and 30 kw biomass system for rural electrification in bangladesh,” in *2015 3rd International Conference on Green Energy and Technology (ICGET)*. IEEE, 2015, pp. 1–5.
- [39] B. B. P. Sant’Ana, J. F. Fardin, and J. J. C. S. Santos, “Rsu para eletricidade em microrredes: Análise de duas rotas tecnológicas em ciclo brayton,” in *8º Congresso Brasileiro de Geração Distribuída (CBGD 2023)*. Brasil, 2023.
- [40] R. Saidur, E. Abdelaziz, A. Demirbas, M. Hossain, and S. Mekhilef, “A review on biomass as a fuel for boilers,” vol. 15, no. 5. Elsevier, 2011, pp. 2262–2289.
- [41] V. D. Lazarov, G. Notton, Z. Zarkov, and I. Bochev, “Hybrid power systems with renewable energy sources types, structures, trends for research and development,” in *Proceedings of international conference ELMA2005, Sofia, Bulgaria*, 2005, pp. 515–520.

- [42] E. de Pesquisa Energética (EPE), *ESTUDOS DE PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO USINAS HÍBRIDAS: Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento*. Empresa de Pesquisa Energética-EPE, 2018, vol. 1.
- [43] O. N. do Sistema Elétrico (ONS), “A contratação associada ao sistema de transmissão,” 2024, acesso em Março/2024. [Online]. Available: <https://www.ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/transmissao/contratacoes>
- [44] H. H. Chen, H.-Y. Kang, and A. H. Lee, “Strategic selection of suitable projects for hybrid solar-wind power generation systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 413–421, 2010.
- [45] R. G. Robles Velotti, “Análisis económico de hibridación de planta solar fotovoltaica y eólica,” 2023.
- [46] E. Solomin, E. Sirotkin, E. Cuce, S. P. Selvanathan, and S. Kumarasamy, “Hybrid floating solar plant designs: a review,” *Energies*, vol. 14, no. 10, p. 2751, 2021.
- [47] A. Walter, M. R. Souza, and A. Faaij, “Cofiring biomass and natural gas-boosting power production from sugarcane residues,” in *Bioenergy-Realizing the Potential*. Elsevier, 2005, pp. 125–140.
- [48] M. R. Mohaghegh, M. Heidari, S. Tasnim, A. Dutta, and S. Mahmud, “Latest advances on hybrid solar–biomass power plants,” *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, pp. 1–24, 2021.
- [49] R. Soria, J. Portugal-Pereira, A. Szklo, R. Milani, and R. Schaeffer, “Hybrid concentrated solar power (csp)–biomass plants in a semiarid region: A strategy for csp deployment in brazil,” *Energy Policy*, vol. 86, pp. 57–72, 2015.
- [50] E. E. Renovável, “Sobre nós - geração,” 2023.
- [51] J. A. F. d. A. Santos and E. A. Torres, *Panorama das usinas híbridas eólico-solares no Brasil*, 2021, vol. 1.
- [52] A. M. Pantaleo, S. M. Camporeale, A. Sorrentino, A. Miliozzi, N. Shah, and C. N. Markides, “Hybrid solar-biomass combined brayton/organic rankine-cycle plants integrated with thermal storage: Techno-economic feasibility in selected mediterranean areas,” vol. 147. Elsevier, 2020, pp. 2913–2931.
- [53] F. Trieb and H. Elnokraschy, “Concentrating solar power for seawater desalination,” vol. 12, 2007, pp. 2–13.
- [54] C. de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas, “Plataforma solar de almería - información general,” 2023.

- [55] C. I. Hussain, B. Norton, and A. Duffy, “Technological assessment of different solar-biomass systems for hybrid power generation in europe,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 1115–1129, 2017.
- [56] S. Takeda, H. Nam, and A. Chapman, “Low-carbon energy transition with the sun and forest: Solar-driven hydrogen production from biomass,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 58, pp. 24 651–24 668, 2022.
- [57] A. Damodaran, *Applied corporate finance*. John Wiley & Sons, 2014.
- [58] P. Vernimmen, P. Quiry, and Y. Le Fur, *Corporate finance: theory and practice*. John Wiley & Sons, 2022.
- [59] “Ipsepro software simulator,” acesso em Janeiro/2024. [Online]. Available: <https://www.simtechnology.com/cms/ipsepro>
- [60] A. B. das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*, 2022, vol. 1.
- [61] E. Shagdar, B. G. Lougou, B. Sereeter, Y. Shuai, A. Mustafa, E. Ganbold, and D. Han, “Performance analysis of the 50 mw concentrating solar power plant under various operation conditions,” *Energies*, vol. 15, no. 4, p. 1367, 2022.
- [62] R. Sterrer, S. Schidler, O. Schwandt, P. Franz, and A. Hammerschmid, “Theoretical analysis of the combination of csp with a biomass chp-plant using orc-technology in central europe,” *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 1218–1227, 2014.
- [63] J. Eakburanawat, J. Khedari, J. Hirunlabh, S. Maneewan, M. Daguene, and S. Teekasap, “Solar-biomass thermoelectric power generation simulation,” in *Proceedings ICT’03. 22nd International Conference on Thermoelectrics (IEEE Cat. No. 03TH8726)*. IEEE, 2003, pp. 582–584.
- [64] A. M. Pantaleo, S. M. Camporeale, A. Miliozzi, V. Russo, N. Shah, and C. N. Markides, “Novel hybrid csp-biomass chp for flexible generation: Thermo-economic analysis and profitability assessment,” *Applied energy*, vol. 204, pp. 994–1006, 2017.
- [65] “National solar radiation database,” acesso em Janeiro/2024. [Online]. Available: <https://nsrdb.nrel.gov/data-viewer>
- [66] J. R. Gazoli, N. P. Junior, S. P. Souza, L. A. C. Paschoalotto, and O. J. Souza, “Dimensionamento básico do campo solar de concentradores cilindro-parabólico da usina termosolar porto primavera,” in *Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*, 2018.

- [67] C. S. Turchi, M. Boyd, D. Kesseli, P. Kurup, M. S. Mehos, T. W. Neises, P. Sharan, M. J. Wagner, and T. Wendelin, “Csp systems analysis-final project report,” National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), Tech. Rep., 2019.
- [68] S. Yu and H. Dong, “Uncover cost-benefit disparity of municipal solid waste incineration in chinese provinces,” *Sustainability*, vol. 12, no. 2, p. 697, 2020.
- [69] A. N. de Energia Elétrica ANEEL, “Edital do leilão nº 4/2022-aneel - leilão a-5 de 2022,” Setor Elétrico Brasileiro - SEB, Tech. Rep., 2022.
- [70] F. Pretorius, D. Arner, B.-F. Chung-Hsu, P. Lejot, and A. McInnes, *Project finance for construction and infrastructure: principles and case studies*. John Wiley & Sons, 2008.
- [71] A. Damodaran, *Investment valuation: Tools and techniques for determining the value of any asset*. John Wiley & Sons, 2012, vol. 666.

APÊNDICE I

Tabela com os dados de cálculo por hora do dia e por fonte de geração considerando cada caso de geração de potência, calculada conforme descrito na metodologia.

Tabela 18 – Detalhamento da receita

GERAÇÃO (kW)	HORA DO DIA (h)	FONTE SOLAR (%)	FONTE RSU (%)	RECEITA SOLAR (R\$)	RECEITA RSU (R\$)	RECEITA TOTAL (R\$)
28.789,55	07:00 - 07:59	75,67%	24,33%	6.099,55	4.301,35	10.400,90
	08:00 - 08:59	85,90%	14,10%	6.924,26	2.492,88	9.417,13
	09:00 - 09:59	91,28%	8,72%	7.358,31	1.541,05	8.899,37
	10:00 - 10:59	95,72%	4,28%	7.715,89	756,93	8.472,82
	11:00 - 11:59	98,64%	1,36%	7.951,53	240,22	8.191,75
	12:00 - 12:59	99,85%	0,15%	8.048,67	27,20	8.075,87
	13:00 - 13:59	98,64%	1,36%	7.951,53	240,22	8.191,75
	14:00 - 14:59	95,72%	4,28%	7.715,89	756,93	8.472,82
	15:00 - 15:59	91,28%	8,72%	7.358,31	1.541,05	8.899,37
	16:00 - 16:59	85,90%	14,10%	6.924,26	2.492,88	9.417,13
	17:00 - 17:59	75,49%	24,51%	6.085,08	4.333,08	10.418,15
	18:00 - 06:59	0,00%	100,00%	0,00	229.798,17	229.798,17
					RECEITA DIÁRIA	R\$ 328.655,23
					RECEITA ANUAL	R\$ 119.959.160,72
35.683,09	07:00 - 07:59	75,67%	24,33%	7.560,06	5.331,29	12.891,35
	08:00 - 08:59	85,90%	14,10%	8.582,24	3.089,79	11.672,03

Continua na próxima página

Tabela 18 – *Continuação da tabela*

GERAÇÃO (kW)	HORA DO DIA (h)	FONTE SOLAR (%)	FONTE RSU (%)	RECEITA SOLAR (R\$)	RECEITA RSU (R\$)	RECEITA TOTAL (R\$)
35.683,09	09:00 - 09:59	91,28%	8,72%	9.120,23	1.910,05	11.030,28
	10:00 - 10:59	95,72%	4,28%	9.563,44	938,17	10.501,61
	11:00 - 11:59	98,64%	1,36%	9.855,49	297,74	10.153,23
	12:00 - 12:59	99,85%	0,15%	9.975,90	33,71	10.009,60
	13:00 - 13:59	98,64%	1,36%	9.855,49	297,74	10.153,23
	14:00 - 14:59	95,72%	4,28%	9.563,44	938,17	10.501,61
	15:00 - 15:59	91,28%	8,72%	9.120,23	1.910,05	11.030,28
	16:00 - 16:59	85,90%	14,10%	8.582,24	3.089,79	11.672,03
	17:00 - 17:59	75,49%	24,51%	7.542,13	5.370,62	12.912,74
	18:00 - 06:59	0,00%	100,00%	0,00	284.822,46	284.822,46
					RECEITA DIÁRIA	R\$ 407.350,46
					RECEITA ANUAL	R\$ 148.682.917,71
42.647,70	07:00 - 07:59	75,67%	24,33%	9.035,63	6.371,85	15.407,48
	08:00 - 08:59	85,90%	14,10%	10.257,32	3.692,85	13.950,17
	09:00 - 09:59	91,28%	8,72%	10.900,31	2.282,85	13.183,17
	10:00 - 10:59	95,72%	4,28%	11.430,02	1.121,28	12.551,31
	11:00 - 11:59	98,64%	1,36%	11.779,08	355,86	12.134,93
	12:00 - 12:59	99,85%	0,15%	11.922,98	40,29	11.963,27
	13:00 - 13:59	98,64%	1,36%	11.779,08	355,86	12.134,93
	14:00 - 14:59	95,72%	4,28%	11.430,02	1.121,28	12.551,31
	15:00 - 15:59	91,28%	8,72%	10.900,31	2.282,85	13.183,17

Continua na próxima página

Tabela 18 – Continuação da tabela

GERAÇÃO (kW)	HORA DO DIA (h)	FONTE SOLAR (%)	FONTE RSU (%)	RECEITA SOLAR (R\$)	RECEITA RSU (R\$)	RECEITA TOTAL (R\$)
42.647,70	16:00 - 16:59	85,90%	14,10%	10.257,32	3.692,85	13.950,17
	17:00 - 17:59	75,49%	24,51%	9.014,19	6.418,85	15.433,04
	18:00 - 06:59	0,00%	100,00%	0,00	340.413,94	340.413,94
					RECEITA DIÁRIA	R\$ 486.856,89
					RECEITA ANUAL	R\$ 177.702.766,39
49.625,75	07:00 - 07:59	75,67%	24,33%	10.514,04	7.414,42	17.928,46
	08:00 - 08:59	85,90%	14,10%	11.935,63	4.297,08	16.232,71
	09:00 - 09:59	91,28%	8,72%	12.683,83	2.656,38	15.340,21
	10:00 - 10:59	95,72%	4,28%	13.300,21	1.304,75	14.604,96
	11:00 - 11:59	98,64%	1,36%	13.706,38	414,08	14.120,46
	12:00 - 12:59	99,85%	0,15%	13.873,83	46,88	13.920,71
	13:00 - 13:59	98,64%	1,36%	13.706,38	414,08	14.120,46
	14:00 - 14:59	95,72%	4,28%	13.300,21	1.304,75	14.604,96
	15:00 - 15:59	91,28%	8,72%	12.683,83	2.656,38	15.340,21
	16:00 - 16:59	85,90%	14,10%	11.935,63	4.297,08	16.232,71
	17:00 - 17:59	75,49%	24,51%	10.489,10	7.469,11	17.958,21
	18:00 - 06:59	0,00%	100,00%	0,00	396.112,76	396.112,76
					RECEITA DIÁRIA	R\$ 566.516,83
					RECEITA ANUAL	R\$ 206.778.641,33
56.626,25	07:00 - 07:59	75,67%	24,33%	11.997,21	8.460,34	20.457,55
	08:00 - 08:59	85,90%	14,10%	13.619,34	4.903,25	18.522,59

Continua na próxima página

Tabela 18 – Continuação da tabela

GERAÇÃO (kW)	HORA DO DIA (h)	FONTE SOLAR (%)	FONTE RSU (%)	RECEITA SOLAR (R\$)	RECEITA RSU (R\$)	RECEITA TOTAL (R\$)
56.626,25	09:00 - 09:59	91,28%	8,72%	14.473,09	3.031,10	17.504,19
	10:00 - 10:59	95,72%	4,28%	15.176,42	1.488,81	16.665,22
	11:00 - 11:59	98,64%	1,36%	15.639,88	472,50	16.112,38
	12:00 - 12:59	99,85%	0,15%	15.830,96	53,49	15.884,45
	13:00 - 13:59	98,64%	1,36%	15.639,88	472,50	16.112,38
	14:00 - 14:59	95,72%	4,28%	15.176,42	1.488,81	16.665,22
	15:00 - 15:59	91,28%	8,72%	14.473,09	3.031,10	17.504,19
	16:00 - 16:59	85,90%	14,10%	13.619,34	4.903,25	18.522,59
	17:00 - 17:59	75,49%	24,51%	11.968,76	8.522,74	20.491,50
	18:00 - 06:59	0,00%	100,00%	0,00	451.990,73	451.990,73
					RECEITA DIÁRIA	R\$ 646.432,99
					RECEITA ANUAL	R\$ 235.948.042,14
63.626,75	07:00 - 07:59	75,67%	24,33%	13.480,39	9.506,26	22.986,65
	08:00 - 08:59	85,90%	14,10%	15.303,05	5.509,42	20.812,47
	09:00 - 09:59	91,28%	8,72%	16.262,34	3.405,83	19.668,17
	10:00 - 10:59	95,72%	4,28%	17.052,62	1.672,86	18.725,48
	11:00 - 11:59	98,64%	1,36%	17.573,38	530,91	18.104,29
	12:00 - 12:59	99,85%	0,15%	17.788,08	60,10	17.848,18
	13:00 - 13:59	98,64%	1,36%	17.573,38	530,91	18.104,29
	14:00 - 14:59	95,72%	4,28%	17.052,62	1.672,86	18.725,48
	15:00 - 15:59	91,28%	8,72%	16.262,34	3.405,83	19.668,17

Continua na próxima página

Tabela 18 – Continuação da tabela

GERAÇÃO (kW)	HORA DO DIA (h)	FONTE SOLAR (%)	FONTE RSU (%)	RECEITA SOLAR (R\$)	RECEITA RSU (R\$)	RECEITA TOTAL (R\$)
63.626,75	16:00 - 16:59	85,90%	14,10%	15.303,05	5.509,42	20.812,47
	17:00 - 17:59	75,49%	24,51%	13.448,41	9.576,38	23.024,79
	18:00 - 06:59	0,00%	100,00%	0,00	507.868,71	507.868,71
					RECEITA DIÁRIA	R\$726.349,16
					RECEITA ANUAL	R\$ 265.117.442,53
70.636,97	07:00 - 07:59	75,67%	24,33%	14.965,62	10.553,63	25.519,25
	08:00 - 08:59	85,90%	14,10%	16.989,10	6.116,44	23.105,53
	09:00 - 09:59	91,28%	8,72%	18.054,08	3.781,07	21.835,16
	10:00 - 10:59	95,72%	4,28%	18.931,43	1.857,17	20.788,60
	11:00 - 11:59	98,64%	1,36%	19.509,57	589,40	20.098,97
	12:00 - 12:59	99,85%	0,15%	19.747,92	66,72	19.814,65
	13:00 - 13:59	98,64%	1,36%	19.509,57	589,40	20.098,97
	14:00 - 14:59	95,72%	4,28%	18.931,43	1.857,17	20.788,60
	15:00 - 15:59	91,28%	8,72%	18.054,08	3.781,07	21.835,16
	16:00 - 16:59	85,90%	14,10%	16.989,10	6.116,44	23.105,53
	17:00 - 17:59	75,49%	24,51%	14.930,12	10.631,48	25.561,60
	18:00 - 06:59	0,00%	100,00%	0,00	563.824,29	563.824,29
					RECEITA DIÁRIA	R\$ 806.376,32
					RECEITA ANUAL	R\$ 294.327.356,76
77.647,19	07:00 - 07:59	75,67%	24,33%	16.450,85	11.601,01	28.051,86
	08:00 - 08:59	85,90%	14,10%	18.675,14	6.723,45	25.398,60

Continua na próxima página

Tabela 18 – *Continuação da tabela*

GERAÇÃO (kW)	HORA DO DIA (h)	FONTE SOLAR (%)	FONTE RSU (%)	RECEITA SOLAR (R\$)	RECEITA RSU (R\$)	RECEITA TOTAL (R\$)
77.647,19	09:00 - 09:59	91,28%	8,72%	19.845,83	4.156,31	24.002,14
	10:00 - 10:59	95,72%	4,28%	20.810,24	2.041,48	22.851,73
	11:00 - 11:59	98,64%	1,36%	21.445,76	647,90	22.093,65
	12:00 - 12:59	99,85%	0,15%	21.707,77	73,35	21.781,11
	13:00 - 13:59	98,64%	1,36%	21.445,76	647,90	22.093,65
	14:00 - 14:59	95,72%	4,28%	20.810,24	2.041,48	22.851,73
	15:00 - 15:59	91,28%	8,72%	19.845,83	4.156,31	24.002,14
	16:00 - 16:59	85,90%	14,10%	18.675,14	6.723,45	25.398,60
	17:00 - 17:59	75,49%	24,51%	16.411,83	11.686,58	28.098,41
	18:00 - 06:59	0,00%	100,00%	0,00	619.779,87	619.779,87
					RECEITA DIÁRIA	R\$ 886.403,48
					RECEITA ANUAL	R\$ 323.537.270,56

Fim da tabela