CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

VIABILIDADE TECNO-ECONÔMICA E ECOLÓGICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO RENOVÁVEL SYNGAS-SOLAR NO MUNICÍPIO DE JOÃO PINHEIRO

Camila Fonseca Chaves Campos

Prof. Orientador: Ronney Arismel Mancebo Boloy

Rio de Janeiro

Julho 2024

CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

VIABILIDADE TECNO-ECONÔMICA E ECOLÓGICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO RENOVÁVEL SYNGAS-SOLAR NO MUNICÍPIO DE JOÃO PINHEIRO

Camila Fonseca Chaves Campos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos à obtenção do título de Mestrado.

Orientador: Ronney Arismel Mancebo Boloy

Rio de Janeiro

Julho 2024

VIABILIDADE TECNO-ECONÔMICA E ECOLÓGICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO RENOVÁVEL SYNGAS-SOLAR NO MUNICÍPIO DE JOÃO PINHEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos à obtenção do título de Mestrado.

Camila Fonseca Chaves Campos

Banca Examinadora:

_____

Presidente, Professor Dr. Ronney Arismel Mancebo Boloy (CEFET/RJ) (orientador)

_____

Professora Dra. Vanessa de Almeida Guimarães (COPPEAD/UFRJ)

_____

Professora Dra. Lúcia Bollini Braga Maciel (UFABC)

Rio de Janeiro

Julho 2024

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

C198 Campos, Camila Fonseca Chaves
Viabilidade tecno-econômica e ecológica de um sistema híbrido renovável Syngas-Solar no município de João Pinheiro / Camila Fonseca Chaves Campos – 2024.
87f. : il. (algumas color.) + anexos , enc.

Dissertação (Mestrado). Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2024.
Bibliografia : f. 80-87.
Orientador: Ronney Arismel Mancebo Boloy.

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Recursos naturais renováveis. 3. Biomassa vegetal. 4. Bioeletricidade. 5. Estudos de viabilidade.I. Boloy, Ronney Arismel Mancebo (Orient.). II. Título.

CDD 333.794

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes – CRB/7 nº 5281

DEDICATÓRIA

“Dedico esse trabalho a Deus, esposo, familiares e amigos que me ajudaram e apoiaram para que este objetivo fosse alcançado.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, o autor da minha vida e que sem Ele nada seria possível, muito menos a minha existência.

Ao meu esposo, William Campos, que me deu todo o apoio, suporte e consolo nas horas difíceis, e me fez acreditar que sou capaz de alcançar grandes sonhos e objetivos.

Aos meus pais, Wilma Leila e Fernando Afonso, que por toda a minha vida sempre proveram o melhor que puderam para o meu sucesso, sem medir esforços.

Aos meus queridos irmãos, Caroline Fonseca e Fernando Fonseca e demais familiares que sempre acreditaram nos meus sonhos e me incentivaram a conquistá-los.

Aos meus amigos Julliana, Wislley, Larissa, Bárbara, Blenda, Thaynara que foram sustento em oração nos momentos difíceis e companheiros fiéis nas conquistas.

As minhas parceiras de formação e profissão, Yasmim, Vanessa, Laene e Raissa, que sempre foram solícitas em todas as dúvidas que obtive no percurso, me apoiando e acreditando no resultado desta pesquisa.

Ao meu orientador Prof. Ronney Boloy pela orientação e ensinamentos concedidos ao longo deste projeto, com apoio e incentivo a pesquisa.

Ao Centro Federal de Educação Tencológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ) pela oportunidade de participar do PPPRO.

A todos estes que de alguma forma contribuíram para a realização deste sonho, sempre muito compreensivos em todas as vezes que renunciai a tempo de qualidade com eles para me dedicar a todo estudo necessário para a concretização deste trabalho.

EPÍGRAFE

“E estou plenamente convicto de que aquele que iniciou a boa obra em vós, há de concluí-la até o Dia de Cristo Jesus.”

Filipenses 1:6 – Bíblia Sagrada

RESUMO

Viabilidade Tecno-Econômica e Ecológica de um Sistema Híbrido Renovável Syngas-Solar no Município de João Pinheiro

O estudo visa analisar a viabilidade técnica e ecológica da geração de bioenergia através do Sistema Híbrido de Energia Renovável (HRES) syngas-solar com potencial de aplicação em comunidades rurais, com estudo de caso na cidade de João Pinheiro em Minas Gerais, identificando, apresentando indicadores energéticos, econômicos e ecológicos, aproveitando a produção local de eucalipto para reduzir custos associados ao transporte de resíduos de biomassa. Os resíduos de eucalipto foram escolhidos como fonte de biomassa, o gaseificador Downdraft com ar como agente de gaseificação e a tecnologia de silício monocristalino foi selecionada para módulos fotovoltaicos. Uma revisão bibliométrica juntamente com uma revisão sistemática da literatura utilizando o método PRISMA foram aplicadas para identificar possíveis aplicações oportunidades tecnológicas na implementação de HRES syngas-solar. Estas mostraram que ainda não existem aplicações de análise techno-econômica combinada a indicadores de ecoeficiência para HRES, e que o Brasil tem um potencial de crescimento nas pesquisas em análises tecno-econômica e indicadores de ecoeficiência por obter uma matriz energética predominantemente renovável. Dois cenários do estudo de caso foram propostos com base em cálculos de eficiência global. A análise técnico-econômica foi aplicada com base na Primeira Lei da Termodinâmica e no método do Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE). O caso 2 mostrou maior indicador de eficiência energética global de 17,43% e menor LCOE 0,045 US$/kWh. Adicionalmente, o indicador de ecoeficiência baseado na eficiência ecológica e no Valor Presente Líquido calculado, permitiu avaliar a relação entre os impactos ambientais e valor agregado associados às configurações estudadas, com o caso 2 apresentando $10,78e^{03}$ US$/kg$CO_2$eq como melhor resultado. As conclusões mostram que a análise técnico-económica aplicada ao HRES syngas-solar, juntamente com o indicador de ecoeficiência, apresenta um meio viável e eficaz para fornecer abastecimento descentralizado de bioenergia, particularmente em comunidades rurais isoladas. Esta abordagem incentiva medidas sustentáveis para satisfazer as necessidades energéticas em regiões isoladas com condições climáticas, ambientais e de abastecimento de biomassa como as de João Pinheiro.

Palavras-chave: HRES, syngas, solar, tecno-econômico, ecológica.

.

ABSTRACT

Techno-Economic and Ecological Feasibility of a Syngas-Solar Renewable Hybrid System in the Municipality of João Pinheiro

The study aims to analyze the technical and ecological strategy of bioenergy generation through the syngas-solar Hybrid Renewable Energy System (HRES) with potential for application in rural communities, with a case study in the city of João Pinheiro in Minas Gerais, identifying, presenting energy, economic and ecological indicators, taking advantage of local eucalyptus production to reduce costs associated with the transport of biomass waste. Eucalyptus waste was chosen as the biomass source, the Downdraft gasifier with air as the gasification agent and monocrystalline silicon technology was selected for photovoltaic modules. A bibliometric review together with a systematic literature review using the PRISMA method were applied to identify possible technological applications in the implementation of syngas-solar HRES. This showed that there are still no applications of techno-economic analysis combined with eco-efficiency indicators for HRES, and that Brazil has potential for growth in research into techno-economic analysis and eco-efficiency indicators to obtain a predominantly renewable energy matrix. Two case study scenarios were proposed based on global efficiency calculations. The technical-economic analysis was applied based on the First Law of Thermodynamics and the Levelized Cost of Electricity (LCOE) method. Case 2 showed the highest global energy efficiency indicator of 17.43% and the lowest LCOE of 0.045 US$/kWh. Furthermore, the eco-efficiency indicator based on ecological efficiency and Net Present Value Calculation, we evaluate the relationship between environmental impacts and the added value associated with climate settings, with case 2 presenting $10{,}78e^{03}$ US$/kg$CO_2$eq as the best result. The instructions show that the techno-economic analysis applied to HRES syngas-solar, together with the eco-efficiency indicator, presents a viable and effective means of providing decentralized bioenergy supply, particularly in isolated rural communities. This approach encourages sustainable measures to meet energy needs in isolated regions with climatic, environmental and biomass supply conditions like those of João Pinheiro.

Keywords: HRES, syngas, solar, techno-economic, ecological.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de conversão energética da biomassa.....29

Figura 2 - Tipos de gaseificadores (a) Contracorrente, (b) Concorrente, (c) Leito fluidizado e (d) Leito arrastado.....32
Figura 3 - Diagrama físico do gaseificador downdraft.....33

Figura 4 – Diagrama físico do filtro de ciclone.....35

Figura 5 – Diagrama subsistema solar fotovoltaico.....36

Figura 6 – Diagrama do painel solar.....37

Figura 7 – Fluxograma HRES syngas-solar.....38

Figura 8 – Volume de controle do gaseificador downdraft.....39

Figura 9 – Volume de controle do trocador de calor.....39

Figura 10 – Volume de controle do filtro de ciclone.....40

Figura 11 - Volume de controle do motor de combustão interna e gerador.....41

Figura 12 - Volume de controle do painel solar fotovoltaico.....41

Figura 13 – Fluxograma do cálculo da demanda e oferta.....43

Figura 14 – Fluxograma do método prisma aplicado.....45

Figura 15 - Áreas de pesquisa.....58

Figura 16 - Publicações por país.....59

Figura 17 - Publicações por ano.....61

Figura 18 – Diagrama de Sankey do subsistema syngas.....71

Figura 19 - Diagrama de Sankey do subsistema solar PV.....71

Figura 20 - Eficiência global para os dois casos considerados.....73

Figura 21 - Variação da eficiência ecológica em função do gás de síntese, diesel, gás natural, gasolina com 20% de álcool anidro, biodiesel B20 e biodiesel B100.....77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características técnicas de diferentes tipos de biomassa em base seca....28
Tabela 2 - Comparação entre tecnologias de módulo PV.....37
Tabela 3 - Principais parâmetros técnicos do grupo gerador.....40
Tabela 4 - Vida útil e taxa de depreciação dos equipamentos.....51
Tabela 5 - Principais premissas econômicas para o sistema proposto.....53
Tabela 6 - Reagentes no processo de combustão num ICEG em PTP.....54
Tabela 7 – Indicadores geralmente aplicáveis.....57
Tabela 8 - Principais resultados e características dos artigos selecionados.....64
Tabela 9 - Principais resultados da análise energética.....70
Tabela 10 - Custo de produção de eletricidade para cada subsistema e para o HRES syngas-solar.....74
Tabela 11 - Principais resultados da análise económica.....75
Tabela 12 - Reagentes e produtos, e fatores de emissão de espécies da combustão do gás de síntese.....76
Tabela 13 - Eficiência ecológica, fatores de emissão e indicadores de poluição.....76
Tabela 14 - A ecoeficiência dos casos 1 e 2 para o HRES syngas-solar.....78

NOMECLATURAS

Símbolos Latinos	Descrição	Unidades
A	Cinzas da composição elementar e imediata da biomassa	[-]
A	Área de um modulo fotovoltaico	[m^2]
C	Carbono	[-]
CH_4	Metano	[-]
CO	Molécula de Monóxido de Carbono	[-]
CO_2	Molécula de Dióxido de Carbono	[-]
CI	Custos Total de Investimento	[US$]
$CO\&M$	Custos de Operação e Manutenção	[US$]
Cp	Calor Específico	[J/(kg.K)]
c	Constante adimensional para eficiência ecológica	[-]
D	Depreciação	[US$]
E	Energia Produzida	[kW]
EE	Indicador de Ecoeficiência	[%]
FC	Fluxo de caixa	[US$]
FRC	Fator de Recuperação de Capital	[-]
f	Fator de emissão de cada espécie resultante da combustão da mistura ar-combustível.	[kgespécie/ kgcombustível]
G	Ganho no período analisado	[US$]
H	Hidrogênio	[-]
H_2O	Molécula da Água	[-]
H	Horas totais de operação	[h]
h	Entalpia Específica	[kJ/kg]
I	Irradiação global em um plano inclinado	[Wh/m²]
i	Taxa de Juros	[%]
k	Constante adimensional para eficiência ecológica	[-]
$LCOE$	Custo Nivelado de Eletricidade	[US$/kWh]
Mono C-Si	Silício Monocristalino	[-]
$Máx\ (x)$	Valor Máximo de x	[-]
$Min\ (x)$	Valor Mínimo de x	[-]
MW	Peso molecular	[u]
$\dot{m}$	Fluxo de massa	[kg/s]

N	Nitrogênio	[-]
N_2	Molécula de Nitrogênio	[-]
N_2O	Molécula de Óxido Nitroso	[-]
N	Número de módulos fotovoltaicos	[unidade]
NO_x	Óxidos de Nitrogênio	[-]
n	Constante adimensional para eficiência ecológica	[-]
n_mols	Número de mols da espécie ou combustível	[-]
O	Oxigênio	[-]
O_2	Molécula de Oxigênio	[-]
P	Pressão	[kPa]
PB	Payback	[anos]
PCI	Poder Calorífico Inferior	[kJ/kg]
$\dot{Q}$	Potência Térmica	[kW]
R	Receita Anual	[US$]
S	Enxofre	[-]
SO_2	Molécula de Dióxido de Enxofre	[-]
T	Temperatura	[ºC]
TD	Taxa de Depreciação	[%]
TIR	Taxa Interna de Retorno	[%]
TMA	Taxa Mínima de Atratividade	[%]
VPL	Valor Presente Líquido	[US$]
VU	Vida Útil	[anos]
W	Energia Elétrica	[kJ]
$\dot{W}$	Potência Elétrica	[kW]
w	Fração de massa de um componente	[%]
y	Parcela de Título	[%]
x	Valor do Indicador de Ecoeficiência	[-]

Símbolos Gregos	**Descrição**	**Unidade**
$\mathcal{E}$	Eficiência Ecológica	[%]
η	Eficiência Energética	[%]
Π	Indicador de Poluição	[kgpoluente/ MJcombustível]

Subscrito	Descrição
0	Inicial
$1{,}4DCB_eq$	1.4 Dicolobenzeno equivalente
ar	Ar
bio	Biomassa (Eucalipto)
$caso\ 1$	Referente ao Caso 1
$caso\ 2$	Referente ao Caso 2
$cinzas$	Cinzas
$comb$	Combustível
CO_2_eq	CO_2 equivalente
el_S	Eletricidade referente a Gaseificação
el_PV	Eletricidade referente a Placa Fotovoltaica
$espécie$	Espécie resultante da combustão da mistura ar-combustível
f	Frio
G	Gaseificador/Gaseificação
GW	Aquecimento Global
gex	Gases de Exaustão
$HRES$	Sistema Híbrido de Energias Renováveis
HT	Toxidade Humana
$ICEG$	Motor de Combustão Interna e Gerador
i	Enésimo valor da análise de ecoeficiência
j	Enésimo componente
liq_anual	Líquido Anual
N	Normalizado
PV	Subsistema solar fotovoltaico
p	Poluição/Poluente
$perdas$	Perdas no processo
rad	Radiação
rec	Recuperação
S	Subsistemas syngas
syn	Syngas
T	Total
t	Tempo/ano/período
H_2O	Água

ABREVIAÇÕES

AD	Digestão Anaeróbia
BC	Células de Biorretenção
BEV	Veículos Elétricos a Bateria
CF	Carbono Fixo
CGS	Esgotos Convencionais por Gravidade
CI	Custo Total de Investimento
COFINS	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
CSLL	Contribuição Social sobre o Lucro Líquido
ETAR	Estações de Tratamento de Águas Residuais
FDP	Potencial de Depleção Fóssil
FERs	Fontes de Energias Renováveis
FLP	Fosfato de Ferro de Lítio
GEE	Gases do Efeito Estufa
HESS	Sistema Híbrido de Armazenamento de Energia
HRES	Sistema Híbrido de Energia Renovável
ICEG	Motor de Combustão Interna e Gerador
ICMS	Imposto Relativo a Circulação de Mercadorias
ID	Irrigação de Estação Seca
IR	Imposto de Renda
IRENA	Agência Internacional de Energias Renováveis
ISWM	Estratégias Integradas de Gerencimento de Resíduos Sólidos Urbanos
IT	Trincheiras de Infiltração
IW	Irrigação de Estação Chuvosa
LCA	Avaliação do Ciclo de Vida
LCC	Custo do Ciclo de Vida
LCOE	Custo Nivelado de Eletricidade
LID	Desenvolvimento de Baixo Impacto
LTO	Tinatato de Lítio
MA	Metil Acrilato
MBT	Tratamento Biológico Mecânico
MC	Metil Crotonato
MG	Minas Gerais
MP	Material Particulado

MV	Material Volátil
N.D.	Não Definido
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PHB	Polihidroxibutirato
PICP	Pavimento de Concreto Intertravado Permeável
PIS	Programa de Integração Social
PRISMA	Relato para Revisões Sistemáticas e Meta Análise
PTP	Pressão de Temperatura Padrão
PV	Fotovoltaico
RAPTOR	Reactor with Polyvalent Rectilinear Stirred Reactor with Optimized Transfer
RW	Estação Chuvosa de Sequeiro
SBS	Esgotos de Pequeno Porte
STT	Tanque Séptico e Cisterna
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
U	Umidade
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1. Introdução 19
1.1 Limitações da Literatura 21
1.2 Estado da Arte 21
1.3 Objetivo 24
1.3.1 Objetivos Específicos 24
1.4 Relevância do Estudo 25
1.5 Estrutura do Trabalho 25
2. Fundamentação Teórica 26
2.1 Biomassa 26
2.1.1 Caracterização dos Recursos de Biomassa de Madeira 26
2.1.2 Processos Básicos de Conversão da Biomassa de Madeira 28
2.2 Gaseificação de Biomassa 30
2.2.1 Etapas da Gaseificação 30
2.2.2 Classificação dos Gaseificadores 31
2.2.3 Gaseificador Concorrente ou Downdraft 33
2.3 Trocador de Calor 34
2.4 Filtro de Ciclone 34
2.5 Motor de Combustão Interna acoplado ao Gerador 35
2.6 Painel Solar Fotovoltaico 35
2.6.1 Células Fotovoltaicas 36
3. Metodologia 38
3.2 Estudo de Caso e Determinação da Demanda 42
3.3 Metodologia da Revisão Bibliométrica 43
3.4 Metodologia da Revisão Sistemática 44
3.5 Metodologia da Análise Técnica 46
3.5.1 Balanço Energético – Gaseificação da Biomassa 46
3.5.2 Balanço Energético – Painéis Solares Fotovoltaicos 48
3.5.3 Eficiência Energética Global do HRES 48
3.6 Metodologia da Análise Econômica 49
3.7 Metodologia da Análise Ecológica 54
3.7.1 Simulação da combustão usando GASEQ 54
3.7.2 Eficiência Ecológica 55
3.8 Metodologia da Análise de Indicador de Ecoeficiência 56

4. Resultados e Discussões 58
4.1 Resultados e Discussão da Revisão Bibliométrica 58
4.1.1 Áreas de pesquisa 58
4.1.2 Publicações por país 59
4.1.3 Publicações por ano 60
4.2 Resultados e Discussão da Revisão Sistemática 62
4.3 Resultados e Discussão da Análise Técnica 69
4.4 Resultados e Discussão da Análise Econômica 73
4.5 Resultados e Discussão da Análise Ecológica e Indicador de Ecoeficiência 75
Considerações Finais 79
Referências 80
Anexo I – Memória de Cálculo do Balanço de Energia 88
Anexo II – Memória de Cálculo da Rendimento Global 89
Anexo III – Memória de Cálculo do Custo de Investimento 90
Anexo IV – Memória de Cálculo do LCOE – Caso 1 91
Anexo V – Memória de Cálculo do LCOE – Caso 2 92
Anexo VI – Memória de Cálculo da Depreciação dos Equipamentos 93
Anexo VII – Memória de Cálculo do Fluxo de Caixa, VPL, TIR e Payback – Caso 1 94
Anexo VIII – Memória de Cálculo do Fluxo de Caixa, VPL, TIR e Payback – Caso 2 95
Anexo IX – Memória de Cálculo da Eficiência Ecológica e Indicador de Ecoeficiência 96

1. Introdução

Atualmente, o mundo sofre com dois principais problemas relacionados ao consumo de energia. Um deles está relacionado ao rápido crescimento populacional que tem levado a um maior consumo de energia, principalmente dos combustíveis fósseis (HOSSEINI *et al*., 2024; TAMOOR *et al*., 2020). Os combustíveis fósseis provêm de fontes não renováveis, aumentando o risco de esgotamento dos suprimentos de energia (SAIDI *et al*., 2020), além disso, o uso global de energia não renovável resulta em efeitos negativos ao meio ambiente, como chuva ácida, desastres ecológicos e poluição ambiental (TAMOOR *et al*., 2020; SAIDI *et al*., 2020; COME ZEBRA *et al*., 2021).

O outro problema está relacionado ao acesso e consumo desigual à energia, que é especialmente prevalente em áreas remotas com alta concentração de pessoas sem acesso à energia (ADEDOJA *et al*., 2024; BHATTACHARYYA, 2006), uma vez que a transmissão de eletricidade por métodos tradicionais para comunidades rurais em áreas remotas é insustentável para concessionárias de energia (LIAN *et al*, 2019). Recentemente, o Banco Mundial informou que cerca de 789 milhões de pessoas vivem sem eletricidade e outras centenas de milhões têm acesso a um abastecimento insuficiente ou pouco fiável, sendo que 84,2% destas pessoas vivem em zonas rurais isoladas da rede elétrica e os 15,8% restantes residentes em áreas urbanas (BANCO MUNDIAL, 2022). A falta da eletrificação rural tem prejudicado o desenvolvimento social e econômico, pois não só dificulta a qualidade de vida ao atender às necessidades de saúde e educação das pessoas, como também impossibilita a melhoria de atividades básicas em pequenas indústrias rurais, como o aumento da jornada de trabalho por meio de iluminação e irrigação, que aumentam a produtividade, o que proporcionaria o estímulo econômico à região (NOUNI *et al*., 2008).

Em contrapartida, têm-se os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável reconhecidos internacionalmente em políticas e recomendações, em que alguns deles vão diretamente ao encontro aos desafios citados, a fim de resolver esses problemas de consumo de energia, como por exemplo 7º que propondo que "o acesso à energia acessível, confiável, sustentável e moderna deve ser garantido para todos", e também 11º que propõe “cidades e comunidades sustentáveis”, o 12º propondo “consumo e produção responsáveis” e o 13º incentivando o “combate as alterações climáticas” (NAÇÕES UNIDAS, 2015; LASSALLE *et al*., 2021). Dessa forma, cada vez mais medidas para promover Fontes de Energia Renováveis (FERs) têm sido propostas como

solução a fim de fornecer energia para atividades econômicas e industriais sem prejudicar o meio ambiente (BOULAKHBAR *et al*., 2020).

As tecnologias de energia renovável são sistemas maduros que permitem a substituição progressiva das tecnologias fósseis convencionais (GBADAMOSI *et al*., 2020). No entanto, a empregabilidade das energias renováveis não tem sido alcançada devido ao alto custo de implementação em comparação com as alternativas convencionais (COME ZEBRA *et al*., 2021). Além disso, as FERs são intermitentes, variáveis e não conseguem responder ao aumento da demanda, dificultando a garantia da confiabilidade do sistema (MEMON *et al*., 2021).

Os sistemas híbridos de energia renovável (HRES) são sistemas que combinam duas ou mais tecnologias de FERs que, permitem a implementação mais adequada para cada caso de aplicação (ISMAIL *et al*., 2015; WILLIAMS *et al*., 2015). Desta forma os HRES estão crescendo em ritmo acelerado, mostrando ser uma alternativa vantajosa para reduzir as emissões de CO_2, permitindo maior flexibilidade, confiabilidade e eficiência, e menores custos de energia em comparação com a geração tradicional de diesel puro, além de reduzir riscos e instabilidades no transporte do sistema, incentivando a sustentabilidade do sistema energético de áreas remotas e superando assim as limitações econômicas decorrentes de uma única fonte de energia (LASSALLE *et al*., 2021).

O Brasil é um país com um grande potencial de expansão na aplicação dos HRES, uma vez que o setor energético brasileiro apresenta uma diversidade na oferta de FERs, principalmente devido à presença de uma extensa bacia hidrográfica brasileira (EPE, 2024). O cenário brasileiro apresenta uma distribuição de 89,2% em FERs (58,9% hidrelétrica, 13,2% eólica, 8,0% biomassa, 7,0% solar e 2,1% outras) e apenas 10,8% de sua matriz energética de fontes não renováveis (5,3% gás natural, 2,1% nuclear, 1,9% carvão e derivados e 1,5% derivados do petróleo), (EPE, 2024). Além disso, a matriz energética brasileira é mais renovável que a mundial, uma vez que na matriz energética mundial, apenas 28,7% são renováveis (EPE, 2024).

Os recursos provenientes da biomassa e da fonte solar, embora apresentados com os menores percentuais em relação as demais FERs, estão sendo cada vez mais enfatizadas, estudadas e promovidas devido a abundância encontrada na natureza e baixo impacto ambiental (PANTALEO *et al*, 2020). No entanto, ambas as fontes têm suas limitações e desafios. A energia solar é caracterizada por ser intermitente e por depender da integração para armazenamento de energia com geração programada a fim de atender a demanda. Por outro lado, a biomassa enfrenta o desafio da obtenção de recursos disponíveis constantes em qualidade e valores acessíveis (FACCIO *et al*, 2018). No entanto, a combinação destas duas FERs é considerada como uma solução

onde uma complementa a outra nas suas deficiências de eficiência, que se complementam tanto sazonalmente como diurnamente, uma vez que são fontes naturais (SARKIS *et al*, 2018). Outra vantagem da hibridização biomassa-solar para aplicações reais são menores requisitos de espaço para coletores solares e redução das restrições de suprimento de biomassa devido a menores requisitos de entrada de combustível para um tamanho fixo de planta (PANTALEO *et al*., 2017).

1.1 Limitações da Literatura

Por meio da revisão sistemática, encontrada no capítulo 3, foi possível identificar que até o presente momento os estudos de viabilidade científica de HRES syngas-solar incluem apenas análises de eficiência tecnoeconômica e ecológica, de modo que apenas a relação técnica com o indicador econômico é apresentada. Não foram encontrados estudos que forneçam conjuntamente a análise tecnoeconômica, ecológica e o indicador de ecoeficiência, de forma que além da relação técnica e econômica, haja também uma relação econômica e ecológica.

1.2 Estado da Arte

Recentemente, uma modelagem com o software Ebsilon Proffesional foi aplicada por Roman J., (2022), com o propósito de analisar um sistema de geração híbrida com instalação de gaseificação de resíduos municipais, sistema fotovoltaico e parque eólico a fim de atender uma demanda máxima de potência igual a 10MW. O fator de hibridização para a tecnologia de biomassa foi de 55,41%, 35,05% para eólica e 9,54% para solar. A eficiência energética líquida encontrada com base na Primeira Lei da Termodinâmica foi de 16,70%. Como resultado de análise econômica, os resultados mostraram o custo da eletricidade variou de 0,115 a 0,240 $/kWh, mostrando assim que a gaseificação de resíduos municipais pode ser utilizada para ajustar a geração com a demanda, além de ser economicamente vantajoso.

Xue e Li (2022) propuseram em seus estudos o desenvolvimento de um novo sistema de geração de energia baseado na co-combustão de biomassa agrícola e lodo secagem por energia solar. Essa integração é conseguida injetando o calor coletado da luz solar por coletores de calha parabólica no secador de lodo através da água de alimentação. A eficiência energética total de toda a planta é de 30,47%. A avaliação econômica mostrou o custo nivelado de eletricidade de 0,0834 $/kWh, o payback é de 3,73 anos e o valor presente líquido de 34806,00 kUS$ alcançável devido à incorporação.

A fim de determinar a configuração ideal, foi apresentado uma modelagem ótima do Modelo Híbrido de Otimização para Energia Renovável (HOMER) para encontrar as configurações mais econômicas e eficientes energeticamente para um sistema híbrido composto de energia fotovoltaica, baterias e gaseificadores de biomassa de casca de palmiste, localizado na aldeia remota de Long Pahangai, na Indonésia. O fator de hibridização para o sistema de energia solar foi de 50,40%, e 49,60% para a tecnologia de biomassa, com uma eficiência energética de 16,70% e LCOE de 0,163 $/kWh, sugerindo que um sistema PV-Diesel-Gasificador-Bateria é o melhor projeto ideal para Long Pahangai em termos de custo de energia (ADITYA, 2022).

O estudo realizado por Mouaky (2020) mostrou o desempenho termodinâmico de uma usina híbrida biomassa-solar produzindo eletricidade, água doce e água quente sanitária (DHW) para uma comunidade de 40 residências situada na região semiárida de Benguerir, no Marrocos. Diferentemente dos demais casos, coletores parabólicos compostos e caldeiras de combustão que usam resíduos de azeitona como biomassa são combinados sequencialmente para acionar um Ciclo Rankine Orgânico de 46 kW e uma unidade de osmose reversa, com um fator de hibridização da energia solar em 11,42% e biomassa de 88,58%. A eficiência energética geral da planta foi encontrada numa faixa entre 11,35 e 16,32%, e o custos específico de eletricidade encontrado foi de 0,231 $/kWh, sendo considerado competitivo no contexto *off-gride*.

Recentemente, uma avaliação técno-econômica foi proposta para uma nova configuração de sistema híbrido de geração de energia solar-biomassa composto por uma turbina a gás externamente acionada alimentada em 70% por biomassa (lascas de madeira) e um ciclo de Rankine orgânico de fundo, obtendo a recuperação de calor dos gases de exaustão da turbina via armazenamento de energia térmica e integração do calor de um campo de coletores parabólicos com sais fundidos como um fluido de transferência de calor. Os resultados mostraram uma eficiência energética de 29% e o LCOE do sistema proposto é de cerca de 0,140 $/kWh, com TIR é cerca de 15%, com base nas tarifas de subsídio de eletricidade italianas (PANTALEO, 2020).

Um estudo conduzido por Anvari (2019) avalia um ciclo combinado baseado em nova configuração de energia híbrida biomassa-solar para produção de 13,4 MW de potência em três seções (seção de biomassa, seção solar e seção turbina a vapor), com respectivo fator de hibridização: 8%, 49% e 43%. A fim de estimar a economia do ciclo proposto, os custos calculados de LCOE foram de 0,049 $/kWh. Os resultados mostraram que a adição da seção solar ao sistema baseado em biomassa traz um aumento de cerca de 25% na produção de energia, com eficiência energética de 29%.

Zhang (2019) propôs, em seus estudos, um sistema híbrido de fornecimento de energia biomassa-solar, contando que para a tecnologia de biomassa, foi utilizada a

combustão de resíduos agrícolas, com fator de hibridização 73,31%. Para a tecnologia de energia solar, foram utilizados os coletores parabólicos, com de hibridização de 23,69%. Para avaliar o desempenho termodinâmico, aplicou-se a Primeira Lei da Termodinâmica, obtendo resultados de eficiência energética média anual de 25,18%. O sistema apresentou uma boa rentabilidade com um período de payback de 5,15 anos.

Uma análise abrangente de energia em um sistema híbrido solar-biomassa e turbina a vapor foi estudado por Anvari (2018). Com a avaliação paramétrica foi verificado o efeito de parâmetros termodinâmicos no desempenho geral do sistema pela Primeira Lei da Termodinâmica. A biomassa escolhida é foi a de madeira, sofrendo o processo de transformação termoquímica de gaseificação, responsável por 9% da produção, já a tecnologia de turbina a vapor, ficou responsável por 38% da produção. A tecnologia de energia solar, utilizou-se de torres solares com o fator de hibridização de 53%. Os resultados indicaram que ao adicionar a unidade solar à seção de biomassa, a potência aumenta em 30%, obtendo uma eficiência energética de 22,30% e um LCOE de 0,042 $/kWh.

Dois novos sistemas híbridos de geração de energia solar-biomassa são propostos, modelados e comparados entre si por Sarkis (2018). A biomassa de madeira é primeiro gaseificada em um gaseificador e, em seguida, o gás de síntese é usado em uma usina de turbina a gás combinada com um ciclo de Rankine. A energia solar é utilizada no ciclo bottoming Rankine, onde o primeiro sistema a emprega de forma indireta para aquecer a água de alimentação antes do desaerador, enquanto o segundo sistema adota a energia solar no modo de geração direta de vapor para gerar vapor adicional para baixas temperaturas. turbina a vapor de pressão. O fator de hibridização do primeiro sistema é de 91,48% e 8,52% para biomassa e energia solar, respectivamente, enquanto para o segundo sistema é de 64,44% e 35,56% para biomassa e energia solar, respectivamente. Os resultados da avaliação econômica, através do custo nivelado da energia elétrica e resultados da avnálise energética para a primeira e segunda configurações propostas foram 0,0749 e 0,0799 $/kWh e 45,06% e 40,12%, respectivamente.

Um sistema híbrido solar-biomassa combinado de calor e energia de 2,1 MW e 960 kW composto por uma turbina a gás de 1,4 MW acionada externamente e uma usina de energia de Ciclo Rankine Orgânico com capacidade de 0,7 MW foi avaliado tecno-economicamente por Pantaleo (2017). Os resultados relataram uma eficiência energética de 25% e custos nivelados de energia de cerca de 0,100 $/kWh para acima de 0,220 $/kWh, juntamente com valores atuais líquidos (VPLs) de cerca de 13, 000 a −3000 kUS$ e taxas internas de retorno (TIRs) de 30% para quase zero ao priorizar a geração de energia elétrica.

Pelos estudos anteriores, percebe-se uma ampla variação para os valores encontrados em estudos de análise de eficiência energética de HRES syngas-solar, variando de 11,35% a 45,06%, como também para os valores encontrados nas análises de LCOE, estando entre 0,042 US$/kWh a 0,247 US$/kWh. Também houve variação no valor do VPL de 3000 kUS$ a 34806 kUS$, TIR de 15 a 30% e Payback de 3,73 a 5,15 anos. Essas variações estão relacionadas à variação do fator de hibridização em cada caso, variação do tipo de biomassa e tecnologia solar aplicada, bem como ao fato de que em alguns estudos eles são otimizados com a recuperação do calor residual do processo, aumentando o valor de eficiência encontrado em comparação com os valores mais baixos de outros estudos.

1.3 Objetivo

Tem-se como objetivo geral um estudo da viabilidade tecno-econômica, ecológica e análise do índice de ecoeficiência no processo de produção de um HRES syngas-solar de 100 kWe em na comunidade remota de João Pinheiro (MG) sem acesso à eletricidade da rede convencional.

1.3.1 Objetivos Específicos

Tem-se objetivo em analisar através de uma revisão bibliométrica da literatura juntamente com a revisão sistemática utilizando o método Itens Preferenciais de Relato para Revisões Sistemáticas e Meta Análise (PRISMA, na sigla em inglês - *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta Analysis*) a fim de verificar e descrever o modo de aplicação das análises tecno-econômicas e de ecoeficiência em diferentes HRES ao longo dos últimos anos.

Em seguida, deseja-se aplicar a análise técnica, econômica, ecológica e realizar o cálculo do indicador de ecoeficiência no estudo de caso de um HRES syngas-solar em João Pinheiro – MG, que dispõe de um motor gerador alimentado com syngas proveniente do aproveitamento local dos resíduos de eucalipto como biomassa para a transformação termoquímica no gaseificador downdraft, e painéis solares fotovoltaicos com a tecnologia silício monocristalino. Para a análise técnica, será aplicada a análise de eficiência energética com base na Primeira Lei da Termodinâmica. Para a análise da eficiência econômica, será aplicado o método do custo nivelado de eletricidade (LCOE, na sigla em inglês - Livelized Cost Of Eletricity), a fim de se obter os indicadores de Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Payback. A eficiência ecológica

será calculada e dessa forma, sendo possível realizar o cálculo do índice de ecoeficiência para os dois diferentes casos propostos.

1.4 Relevância do Estudo

Este estudo traz uma com a análise de ecoeficiência juntamente com uma análise techno-econômica na região isolada e sem energia elétrica da rede convencional no município João Pinheiro (MG) com um HRES syngas-solar de 100kWe, trazendo uma relevância científica em que, por meio da revisão sistemática encontrada no capítulo 3, foi possível identificar que até o presente momento não foram encontradas aplicações de análise de ecoeficiência em HRES.

Também é possível identificar uma relevância tecnológica pela combinação de duas tecnologias de geração de energia renovável: a energia gerada a partir do uso de syngas no motor gerador e painéis solares fotovoltaicos, e relevância ambiental, uma vez que se utilizam fontes renováveis com baixo impacto ambiental, e se faz o aproveitamento dos resíduos de eucalipto localmente dispostos como fonte de biomassa.

Além da relevância científica, tecnológica e ambiental, este estudo também traz uma relevância social, pois a sua aplicação carrega a possibilidade de aumento de emprego, renda e valor agregado a sociedade local com o fornecimento de energia elétrica.

1.5 Estrutura do Trabalho

Os capítulos do trabalho estão estruturados da seguinte forma: Seção 2 fornece uma breve descrição dos componentes do sistema, como biomassa, gaseificação de biomassa, trocador de calor, filtro de ciclone, motor de combustão interna e gerador (ICEG, na sigla em inglês – *Internal Combustion Engine Generator*) e painel solar fotovoltaico (PV, na sigla em inglês - *Photovoltaic*). Na Seção 3 são apresentadas a descrição do sistema, demanda e estudo de caso, metodologia adotada para a revisão bibliométrica e para a revisão sistemática, como também apresenta uma estrutura de avaliação tecno-econômica, ecológica e indicador de ecoeficiência de dois casos examinados. Os resultados e discussões das análises tecno-econômicas, ambiental e ecoeficiência são fornecidos na Seção 4. Finalmente, a Seção 5 destaca as conclusões extraídas do estudo.

2. Fundamentação Teórica

2.1 Biomassa

Biomassa pode ser definida como a matéria vegetal gerada através da fotossíntese que contém a energia química proveniente da transformação energética da radiação solar. Essa energia química pode ser utilizada diretamente por combustão ou transformada por diferentes processos em outros combustíveis para atender o fim desejado (NOGUEIRA *et al*., 2003). Os biocombustíveis que provém da transformação da biomassa podem ser classificadas em três principais grupos que estão relacionados com a origem de sua matéria como: biocombustíveis da madeira (dendrocombustíveis), biocombustíveis de plantação não florestal (agrocombustíveis) e biocombustíveis de resíduos urbanos.

Os biocombustíveis de madeira possuem um conteúdo energético que estão associados ao conteúdo de celulose e lignina presentes na biomassa utilizada, apresentando geralmente uma baixa humidade. Utiliza-se com mais frequência a transformação termoquímica como a combustão ou a gaseificação para o objetivo final (NOGUEIRA *et al*., 2003).

Tal biomassa pode ser produzida de maneira sustentável quando se respeita o tempo de regeneração da floresta utilizada ou quando se utiliza resíduos de indústrias madeireiras com uma finalidade não energética, como por exemplo, os resíduos de uma serração. Ou ainda no caso de aproveitamento da madeira quando se necessita de um desmatamento de uma área para fins agropecuários, entre outras formas (NOGUEIRA *et al*., 2003).

2.1.1 Caracterização dos Recursos de Biomassa de Madeira

As características técnicas que devem ser estudadas de uma biomassa quando utilizadas para produzir combustíveis são: composição química elementar e composição química imediata, a humidade e o poder calorífico (NOGUEIRA *et al*., 2003; CHAVES *et al*., 2016).

- Composição química elementar: relaciona-se a percentagem em massa dos principais elementos que constituem a biomassa onde geralmente se referindo a base seca. Geralmente apresentam-se os valores para o carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), enxofre (S) e cinzas (A) (NOGUEIRA

et al., 2003). Essa informação é importante pois serve de base para os cálculos da combustão, dos volumes de ar/gás e de entalpia e para a determinação do PCI (CHAVES *et al*., 2016).

- Composição química imediata: relaciona-se com a percentagem do Carbono Fixo (CF), Materiais Voláteis (MV), Cinzas (A) e Umidade (U) em relação a massa de combustível (NOGUEIRA *et al*., 2003; ZHANG *et al*., 2019).
- Humidade: é a massa de água livre presente na biomassa, sendo possível apresentar valores de humidade em base seca ou húmida, dependendo da referência utilizada (CHAVES *et al*., 2016). Quando a biomassa apresenta um teor de humidade superior a 30%, há uma redução do poder calorífico do gás devido ao gasto de energia na queima para evaporar a água presente (NOGUEIRA *et al*., 2003). Diante disso, a humidade é considerada um fator muito importante nas transformações de biomassa em combustíveis.

Poder Calorífico: é a quantidade de energia térmica que se libera durante a queima de um combustível por unidade de massa ou volume (kJ/kg ou kJ/m3). O Poder Calorífico Superior (PCS) é quando se considera que a água presente no combustível condensa e permanece em estado líquido. O Poder Calorífico Inferior (PCI) é calculado quando se considera que a água presente na biomassa fique na forma de vapor. Deve-se sempre evidenciar qual tipo de poder calorífico será utilizado, uma vez que, nos cálculos de eficiência dos sistemas, a eficiência referente ao PCI é superior ao valor determinado segundo o PCS (NOGUEIRA *et al*., 2003; CHAVES *et al*., 2016).

A Tabela 1 apresentam valores de PCI e de composição elementar imediata para algumas biomassas de interesse energético, considerando também a influência da humidade.

Na Tabela 1 fica evidente que as biomassas provenientes da madeira são as que possuem um maior PCI, tendo completa influência da humidade. É possível analisar que a biomassa é composta na sua maior parte por carbono, entre 37,49% e 49,29%, tendo uma variação de no máximo 11,8% (entre o Pinheiro com um maior valor do teor de carbono e a Cama de frango com o menor valor). Além disso, pode-se analisar um baixo conteúdo de cinzas relacionado às biomassas provenientes da madeira, inferior a 0,79%.

Tabela 1: Características técnicas de diferentes tipos de biomassa em base seca

Tipos de biomassa	Composição elementar (%)						Composição imediata (%)			PCI (MJ/kg)
	C	H	O	N	S	A	MV	A	CF	
Pinheiro	49,29	5,99	44,36	0,06	0,03	0,30	82,54	0,29	17,70	20,00
Eucalipto	49,00	5,87	43,97	0,30	0,01	0,72	81,42	0,79	17,82	19,40
Casca de arroz	49,96	4,30	35,86	0,40	0,02	18,34	65,47	17,89	16,67	16,10
Bagaço de cana	44,80	5,35	39,55	0,38	0,01	9,79	73,78	11,27	14,95	17,30
Casca de coco	48,23	5,23	33,19	2,98	0,12	10,25	67,95	8,25	23,80	19,00
Sabugos de milho	46,58	5,87	45,46	0,47	0,01	1,40	80,10	1,36	18,54	18,80
Ramas de algodão	47,05	5,35	40,97	0,65	0,21	5,89	73,29	5,51	21,20	18,30
Cama de frango	37,49	5,12	31,82	3,70	0,45	21,62	62,73	23,40	13,87	14,86
Capim-elefante	41,16	5,55	45,91	1,78	-	5,60	76,69	5,60	17,70	15,12

Fonte: Adaptado de Nogueira *et al*., 2003.

2.1.2 Processos Básicos de Conversão da Biomassa de Madeira

A utilização da energia da biomassa é a fotossíntese inversa, isso é, buscando-se resgatar a energia solar armazenada pelo vegetal, consumindo oxigênio atmosférico e restituindo ao ar o dióxido de carbono sequestrado pela planta. Sobre a conversão de biomassa em formas úteis de energia, é possível citar como métodos a conversão termoquímica, biológica e física (NOGUEIRA *et al*., 2003). A Figura 1 mostra um esquema dos principais processos de conversão de biomassa e as principais tecnologias relacionadas.

Nos processos físicos pode citar-se as tecnologias de densificação, redução granulométrica, e a obtenção de óleo vegetal por prensagem mecânica, tendo como característica o fato de não afetar a composição química original da matéria prima. Nos processos de conversão biológica, destacam-se as tecnologias de fermentação alcoólica e digestão anaeróbia, utilizados em biomassas com elevado teor de humidade e as temperaturas de operação são próximas a temperatura ambiente, não sendo interessante para a dendroenergia. Os processos termoquímicos são caracterizados por terem altas temperaturas de trabalho e considerados os principais métodos de conversão de biomassa sólida, principalmente dendroenergia devido ao baixo teor de humidade da madeira (NOGUEIRA *et al*., 2003).

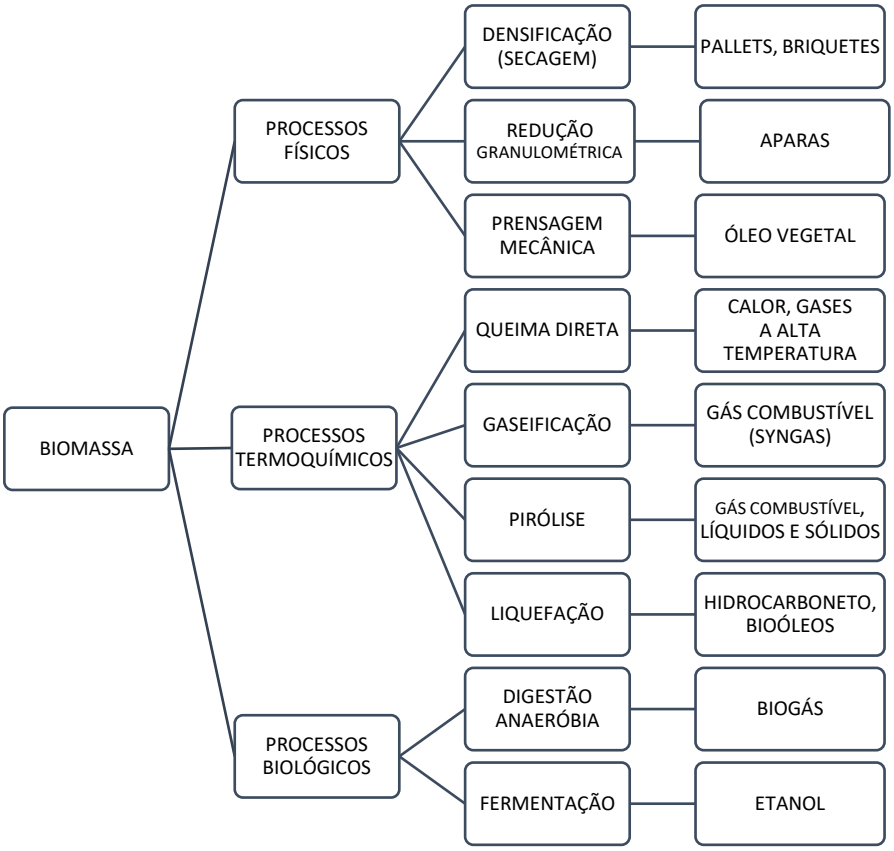


Fig. 1 Processos de conversão energética da biomassa
Fonte: Adaptado de Nogueira *et al*., 2003.

A combustão direta é uma tecnologia de conversão termoquímica em que a biomassa sólida é queimada na presença de ar e como consequência, libera calor. A gaseificação utiliza calor, pressão e a combustão parcial para produzir um gás pobre chamado de syngas. Existe uma certa semelhança entre a gaseificação e a combustão direta, porém elas diferente no tratamento do produto gasoso e da disponibilidade de energia nas ligações químicas do produto gasoso. A combustão libera energia pela quebra das ligações químicas, e a gaseificação tem a função de produzir gases com uma alta proporção de hidrogênio para carbono, retirando o carbono da matéria-prima de hidrocarbonetos e adicionando hidrogênio (MAZAHERI *et al*., 2019).

A pirólise também é uma das tecnologias de conversão termoquímica de biomassa sólida, em que a biomassa é aquecida a altas temperaturas na ausência de oxigênio e com isso não ocorre a queima do material orgânico. O que ocorre é uma decomposição dos compostos químicos em três modos: um líquido chamado bio-óleo, sólido chamado bio-carvão e um gás chamado também de syngas (MAZAHERI *et al*., 2019). Além disso, a pirólise também pode ser encontrada como uma reação em uma das fases no processo de gaseificação (NOGUEIRA *et al*., 2003).

2.2 Gaseificação de Biomassa

O processo de conversão de biomassa por gaseificação é uma tecnologia termoquímica que produz um gás combustível de baixo PCI – gás de síntese na presença de um agente oxidante (NOGUEIRA *et al*., 2003; CHAVES *et al*., 2016). Desta forma, calor ou energia mecânica podem ser gerados a partir do gás de síntese, que pode acionar sistemas como motores de combustão interna e turbinas a gás (MAZAHERI *et al*., 2019).

2.2.1 Etapas da Gaseificação

Em termos teóricos, o processo de gaseificação pode ser dividido em várias etapas. Dependendo da organização do processo de gaseificação (movimento relativo da biomassa e do gás de gaseificação), essas etapas transcorrem em diferentes regiões do gaseificador ou em todo o seu volume de maneira simultânea. Porém, tem-se a divisão básica que pode ser expressa como (NOGUEIRA *et al*., 2003):

I. Pirólise: decomposição térmica ou volatilização, normalmente a 600 ºC.

$$Biomassa + calor \rightarrow coque + gases + alcatrão + condensáveis \quad (1)$$

II. Oxidação do Carbono: oxidação de parte do carbono fixo do combustível. Esta etapa é responsável pela energia térmica para a volatilização e gaseificação.

$$C + \frac{1}{2}O_2 \leftrightarrow CO \quad (2)$$

$$C + O_2 \leftrightarrow CO_2 \quad (3)$$

III. Redução: inclui as reações heterogêneas entre os gases e o coque residual e reações homogêneas entre os produtos já formados.

- Reações heterogêneas:

Reação Bouduard $C + CO_2 \leftrightarrow 2CO$ (4)

Reação de gás de água ou reação carbono-vapor $C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2$ (5)

Reação de formação de metano $C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$ (6)

- Reações homogêneas

Reação de “deslocamento” da água $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ (7)

$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2$ (8)

IV. Craqueamento do Alcatrão: reação que ocorre a destruição térmica das moléculas dos compostos que formam o alcatrão com a obtenção de CO, CO_2, CH_4 e outros gases como produtos.

$$Alcatrão + vapor + calor \leftrightarrow CO + CO_2 + CH_4 \quad (9)$$

V. Oxidação Parcial dos Produtos da Pirólise

$$(CO + H_2 + CH_4) + O_2 \leftrightarrow CO_2 + H_2 \quad (10)$$

2.2.2 Classificação dos Gaseificadores

Pode encontrar-se diferentes classificações de gaseificadores devido à variação dos parâmetros de operação e do produto fornecido. Com isso existem as classificações quanto ao (NOGUEIRA *et al*., 2003):

I. PCI do gás produzido

- Gás de baixo PCI – até 5 MJ/Nm^3;
- Gás de médio PCI – de 5 a 10 MJ/Nm^3;
- Gás de alto PCI – de 10 a 40 MJ/Nm^3.

II. Agente de gaseificação

- Ar;
- Vapor de água;
- Oxigênio.

III. Pressão de Trabalho

- Baixa pressão (atmosférica);
- Pressurizado (até 3Mpa).

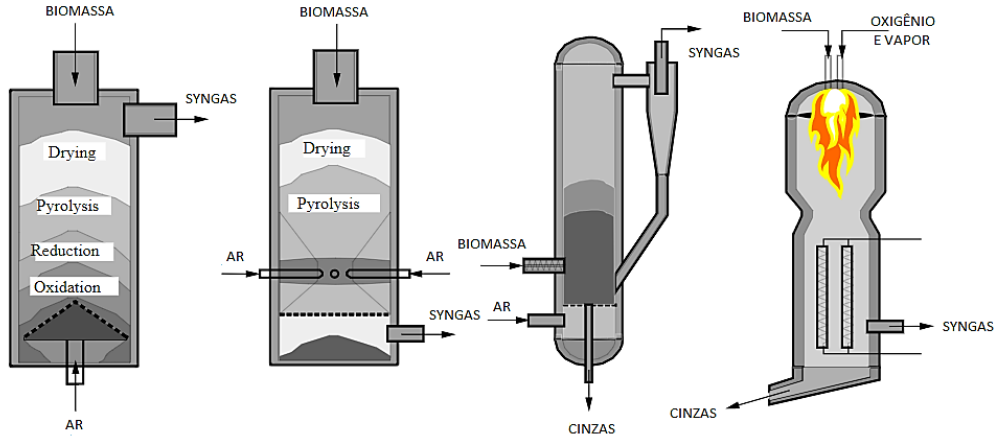
IV. Direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação

- Leito em movimento a contrafluxo com o gás ou Contracorrente (*Updraft*);

- Leito em movimento a fluxo direto com o gás ou Concorrente (*Downdraft*);
- Leito fluidizado (*Fluidized Bed*);
- Leito em movimento perpendicular ao fluxo de gás ou Leito Arrastado (*Entrained Bed*).

Entre as classificações mostradas, a que mais se aplica é a classificação de "direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação". A partir disso, na Figura 4 é demonstrado um esquema dos diferentes tipos dos gaseificadores citados (NOGUEIRA *et al*., 2003; FAO *et al*., 1968).

Os gaseificadores contracorrente e concorrente, como na Figura 2a e 2b, são os mais simples e consequentemente mais baratos do que os de leito fluidizado e fluxo cruzado, mostrado na Figura 2c e 2d. O gaseificador do tipo contracorrente possui uma alta eficiência da conversão da biomassa em gás combustível, porém o teor de alcatrão presente no gás é elevado e isso compromete a qualidade do gás.



(a) (b) (c) (d)

Fig. 2 Tipos de gaseificadores (a) Contracorrente, (b) Concorrente, (c) Leito fluidizado e (d) Leito arrastado
Fonte: Adaptado de (ANUKAM *et al*., 2016)

Contudo, o gaseificador concorrente oferece um gás com um baixo teor de alcatrão e isso se deve em consequência do craqueamento do alcatrão na zona de oxidação. Logo, os gaseificadores concorrentes ou *Downdrafts* são os mais indicados para biomassa florestal (NOGUEIRA *et al*., 2003; FAO *et al*., 1968).

2.2.3 Gaseificador Concorrente ou Downdraft

O funcionamento do gaseificador concorrente ou downdraft segue com a biomassa sendo alimentada pelo topo e o ar alimentado pela lateral do reator na parte superior da grelha e o syngas é removido abaixo da grelha, ou seja, na ou acima da zona de oxidação.

Como se pode observar pela Figura 3, o material desce através do gaseificador na zona da secagem enquanto a humidade é removida por evaporação do calor que ascende da zona de oxidação que se encontram na faixa de 70-200ºC. Na zona de pirólise a temperatura encontra-se na faixa de 350-600ºC, ocorrendo a decomposição térmica dos blocos de madeira em atmosfera inerte para causar a rutura dos hidrocarbonetos de madeira em cadeias menores (geralmente gasosas), obtendo como produtos um resíduo carbonoso, chamado de alcatrão, gases condensáveis e não condensáveis.

Posteriormente, passa-se para a zona de oxidação, onde os produtos voláteis produzidos sofrem uma reação de combustão, obtendo um aumento instantâneo da temperatura, apresentando aproximadamente 1100ºC, onde esse calor é utilizado nas zonas de secagem e pirólise.

A seguir, na zona de redução, onde ocorre a gaseificação e o alcatrão é convertido em produto gasoso por reação com os gases encontrados a alta temperatura provenientes da zona de oxidação. Como resultado disto, a necessidade de limpeza de gás reduz e, portanto, deixa o gás adequado para uma ampla variedade de aplicações (ANUKAM *et al*., 2016).

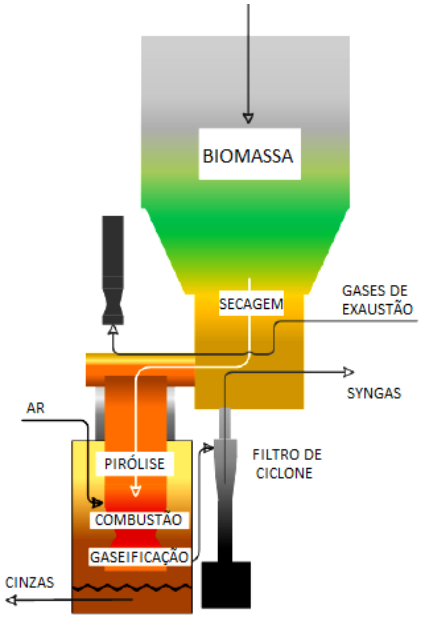


Fig. 3 Diagrama físico do gaseificador downdraft
Fonte: Adaptado de Copa *et al*., 2020.

As principais vantagens do gaseificador descendente se dão devido à baixa taxa de produção do alcatrão e baixo material particulado presente, como também o seu baixo custo e simplicidade operacional, uma vez que a taxa de desgaste do gaseificador de fluxo descendente é mínima e proporciona um menor custo de manutenção (ANUKAM *et al*., 2016).

Sua principal desvantagem está na dificuldade em operar com altos teores de umidade e cinzas e sua incapacidade de operação com os conteúdos de biomassa que não foram adaptadas em tamanhos menores. Uma outra desvantagem está relacionada com a sua dificuldade de ser desenvolvido em grande escala. Normalmente, os gaseificadores de fluxo descendente possuem uma capacidade de 10 kW – 1 MW. Isso se obtém devido a não uniformidade do calor distribuído dentro da zona de oxidação (ANUKAM *et al*., 2016; SUSASTRIAWAN *et al*., 2017).

2.3 Trocador de Calor

O Trocador de Calor Gás-Água utiliza convecção forçada para resfriar o gás através de uma grande área em contato com a água. Ele utiliza um trocador de calor do tipo “Cooler”, com um fluxo como fluido de processo e outro como utilidade mais fria, como água de resfriamento (EDREIS *et al.*, 2020).

Este tipo de trocador de calor é simples, com bom coeficiente de transferência de calor, adequado para altas pressões e de fácil manutenção (EDREIS *et al.*, 2020). A Figura 6 mostra o volume de controle do trocador de calor:

2.4 Filtro de Ciclone

O gás de gaseificação contém diversas impurezas como carvão, cinzas, álcalis, minerais diversos, alcatrão etc. Essas impurezas podem ser classificadas como material particulado sólido, alcatrão e contaminantes gasosos (MONTEIRO *et al*.; 2010).

O filtro de ciclone é um equipamento clássico na coleta de material particulado sólido em que possui forma cilíndrica com uma entrada tangencial, onde o gás de gaseificação atravessa uma via em espiral dando origem a forças centrífugas que atuam sobre as partículas. Esse corpo cilíndrico se encontra soldado a uma base cônica no qual as partículas, através da força centrífuga, são atiradas para a parede e pela gravidade, descem e são descarregadas por uma válvula rotativa a uma abertura inferior

dessa base. No seu topo há uma abertura por onde sai o gás limpo, o conhecido syngas (MONTEIRO *et al*.; 2010), como mostra a Figura 4.

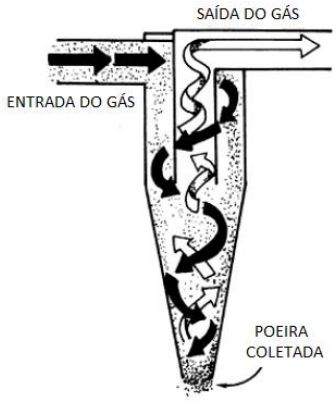


Fig. 4 Diagrama físico do filtro de ciclone
Fonte: Adaptado de (HERRERO *et al*., 2017)

Sua manutenção é fácil, pois geralmente não apresentam muitos problemas. As causas deles são decorrentes do desgaste encontrado nas paredes devido a altas velocidades e corrosões devido à condensação de gases ácidos (SAHU *et al*., 2015).

2.5 Motor de Combustão Interna acoplado ao Gerador

Considerando as aplicações modernas e eficientes da gaseificação de biomassa, a geração de eletricidade é uma das mais importantes, pois a eletricidade é uma forma energética nobre que permite atender com eficiência a uma ampla gama de usos finais, desde iluminação até a produção de potência mecânica (MONTEIRO *et al*.; 2010). O motor de combustão interna e gerador é um meio de que a gaseificação de biomassa possa ser transformada em eletricidade.

O motor de combustão interna e gerador, por possuir a maior taxa interna de retorno, menor custo de geração de energia e menor custo de investimento, analisa-se uma vantagem econômica na tecnologia de motor alternativo de combustão interna quando comparado com os demais acionadores primários (HASLER *et al*., 1999)

2.6 Painel Solar Fotovoltaico

A energia solar é uma das FERs mais abundantes e limpas, sendo considerada uma alternativa muito promissora para suprir a demanda energética existente (SAHU *et al*., 2015). Portanto, essa tecnologia tem alcançado um crescimento, resultando em uma

melhoria substancial em sua viabilidade (URBAN *et al*., 2016) e uma redução nos preços desses sistemas, o que proporciona maior competitividade (COMELLO *et al*., 2018).

Uma planta solar PV típica consiste em quatro elementos básicos: módulo fotovoltaico, controlador de carga, inversor e bateria (quando necessário) (CHAVES, 2020). Veja a Figura 5:

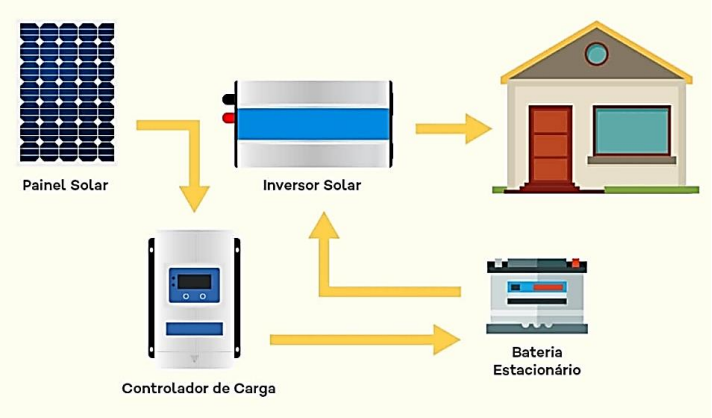


Fig. 5 Sistema típico de uma planta solar fotovoltaica
Fonte: Adaptada de Neo Solar, 2023.

O módulo fotovoltaico é constituído por células fotovoltaicas que converte diretamente a energia dos fótons em eletricidade de corrente contínua através do efeito fotovoltaico produzido por um fenômeno químico/físico (SAMPAIO *et al*., 2017). O inversor é o agente responsável por otimizar a energia gerada pelos painéis solares, transformando de forma eficiente em energia elétrica em um modo que é possível se injetar na rede (OBEIDAT *et al*., 2018). As baterias, por sua vez, são utilizadas como formas de armazenamento do excedente de energia gerada. Por fim, os controladores de carga são aqueles que evitam uma sobrecarga ou descarregamento total das baterias, o que aumenta a sua vida útil (SAMPAIO *et al*., 2017).

2.6.1 Células Fotovoltaicas

As células PV representam o principal componente dos sistemas fotovoltaicos e são responsáveis por gerar eletricidade quando a luz solar é incidida. O seu potencial de geração é dependente de diversos fatores, como a intensidade da luz solar, as condições climáticas locais e o tipo de material fotovoltaico implementado (CHAVES, 2020). Para se atingir altos níveis de potência, as células são conectadas em combinações em série/paralelo para que os módulos PV sejam formados, atingindo uma faixa de potência de até 200 W. Para aumentar a tensão de saída, as células solares são conectadas em série, e para aumentar a corrente de saída, elas são conectadas em paralelo. Para executar as conexões em série e paralelo, assume-se que todos os

parâmetros das células solares são idênticos (CANDELISE *et al*., 2013). A Figura 6 mostra a integração das células fotovoltaicas (a) como também o volume de controle (b).

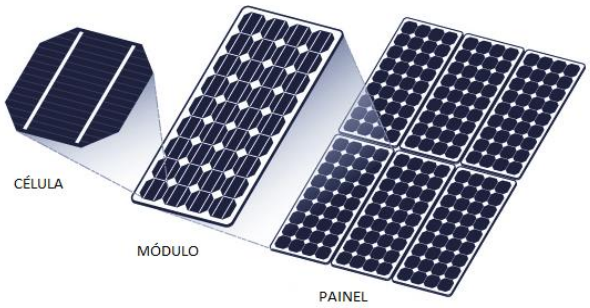


Fig. 6 Diagrama do painel solar fotovoltaico
Fonte: Adaptado de Chaves, 2020.

Os painéis PV podem ser classificados em duas tecnologias: a primeira são as tecnologias cristalinas, incluindo a tecnologia monocristalino (Mono C-Si) e a tecnologia policristalino (Poli C-Si), a segunda são as tecnologias de filme fino, que inclui a tecnologia de telureto de cádimio (CdTe) e a tecnologia de silício de filme fino amorfo (SANSANIWAL *et al*., 2018). Dentre estas tecnologias citadas, a tecnologia cristalina é a que tem tido um maior destaque nos últimos anos. Por mais que a tecnologia Poli C-Si possua baixos custos de fabricação, a tecnologia Mono C-Si apresenta maior eficiência quando comparadas a Poli C-Si e a de filme fino, e por isso, de acordo com Thopil *et al*. (2020), estes painéis constituíam cerca de 33% da produção mundial.

Um dos fatores importantes a ser analisado é a eficiência das células PV, uma vez que elas são determinantes para a estabilização da tecnologia é a eficiência das células PV (CHAVES, 2020). Para isso, a Tabela 2 apresenta dados da literatura com as eficiências e principais características de cada tipo de tecnologia de módulos PV mencionados anteriormente:

Tabela 2: Comparação entre tecnologias de módulo PV

Tecnologia	Características	Eficiência	Vida Útil
Mono C-Si	Excelente eficiência de conversão; Alto custo de fabricação.	20-26,7%	25-30 anos
Poli C-Si	Baixo custo de fabricação; Requer menos energia durante o processo de fabricação.	17-20,3%	20-25 anos
Filmes finos	Flexibilidade e fácil instalação; Baixa eficiência.	10-19,2%	N.D.

Fonte: Adaptado de Chaves, 2020.

3. Metodologia

3.1 Descrição do Sistema

Em geral, o sistema proposto é um HRES syngas-solar, composto por dois subsistemas: o subsistema syngas e o subsistema solar PV. O subsistema syngas é composto pela tecnologia de gaseificação de biomassa, trocador de calor, filtro um motor de combustão interna e gerador (ICEG). O subsistema solar é composto por painéis solares fotovoltaicos (PV), controlador de carga, bateria e inversos. Ambos os subsistemas para atender o consumidor final.

A Figura 7 mostra um fluxograma do HRES syngas-solar.

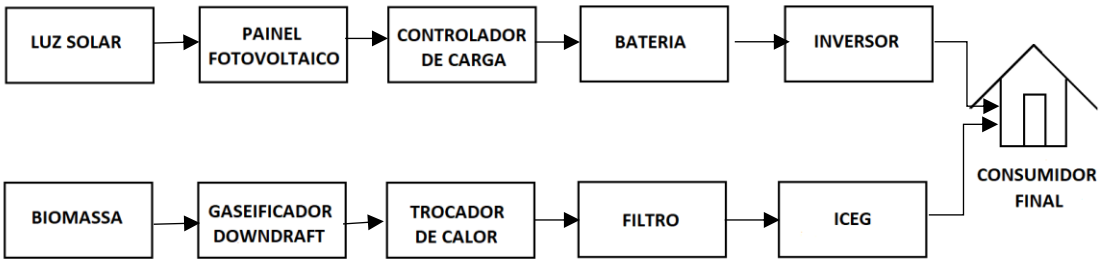


Fig. 7 Fluxograma HRES de syngas-solar
Fonte: Elaborado pelo autor

O subsistema syngas utiliza a biomassa de madeira eucalipto para a produção do gás de síntese, mais comumente chamado syngas (NOGUEIRA *et al*., 2003). Essa biomassa é inserida no gaseificador *downdraft*, modelo HBF-300W fornecido pela Pulita New Energy Technology Co., Ltd., com uma capacidade de produção de até 100 kW, com consumo médio de 120-150 kg/h de biomassa, oferece vantagens como baixa produção de alcatrão e mínimo de material particulado, além de baixo custo e simplicidade operacional (PULITA ENERGY, 2022). O gaseificador recebe a biomassa de eucalipto, que sofre uma transformação termoquímica em altas temperaturas, gerando o gás de gaseificação.

A Figura 8 a seguir mostra o volume de controle do gaseificador downdraft aplicado ao subsistema syngas, em que há entrada de ar e biomassa e saída de cinzas, perdas de calor nas paredes do gaseificador e saída de gás de gaseificação.

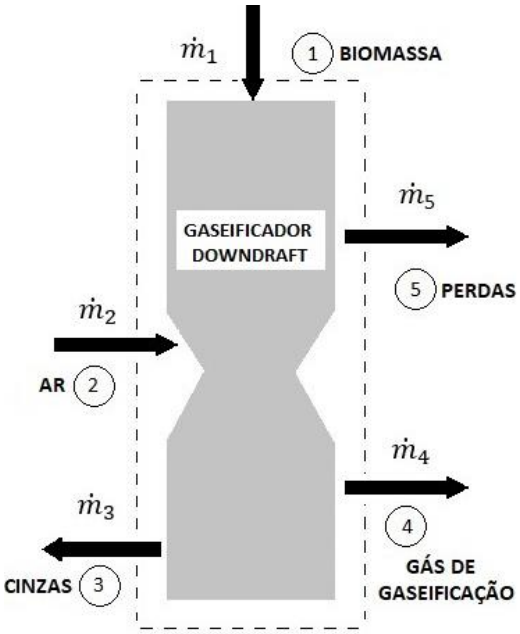


Fig .8 Volume de controle do gaseificador downdraft
Fonte: Elaborado pelo autor

O gás de gaseificação será inserido no trocador de calor de tubo duplo, que consiste em dois tubos concêntricos, feitos de material de aço inoxidável, com o tubo interno medindo 0,012m de diâmetro e o tubo externo medindo 0,088m de diâmetro. O gás de síntese flui pelo tubo interno, com temperatura de entrada de 600ºC e temperatura de saída de 40ºC. A água flui entre os tubos em contracorrente a uma vazão de 0,002 m^3/s, a uma temperatura de 25ºC (temperatura ambiente) (EDREIS *et al.*, 2020). O líquido de resfriamento (água) absorve calor ao encontrar o tubo de líquido aquecido (gás de gaseificação) e depois escoa para um reservatório, podendo ser aproveitada em torneiras e cozimento de alimentos nas residências.

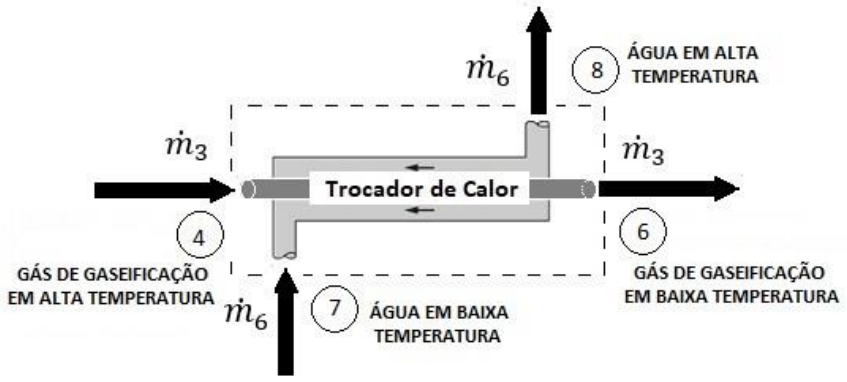


Fig. 9 Volume de controle do trocador de calor
Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 9 mostra o volume de controle do trocador de calor ar-gás utilizado no subsistema syngas, em que há a entrada de água em baixa temperatura baixa, gás de

gaseificação em alta temperatura, e saída de água a uma temperatura mais alta e gás de gaseificação em uma temperatura mais baixa.

Os principais contaminantes que devem ser controlados em aplicações de pequena escala e para geração de energia são os particulados sólidos e o alcatrão. Dessa forma, pode-se observar na Figura 10 o volume de controle do filtro de ciclone utilizado para a limpeza do gás de gaseificação, obtendo como produto o syngas:

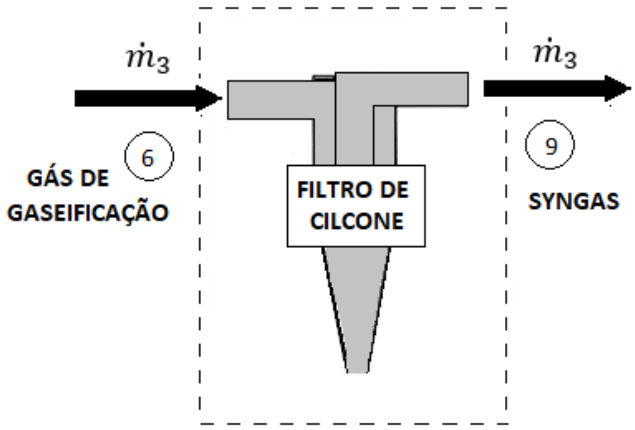


Fig. 10 Volume de controle do filtro de ciclone
Fonte: Elaborado pelo autor

A geração de energia no subsistema syngas é composto por um motor de combustão interna e gerador – modelo ICEG HTG-100GF capaz de produzir 100 kW de energia elétrica. As principais características do sistema de geração são apresentadas na Tabela 3 e o volume de controle ICEG é representado na Figura 11 (URBAN *et al.*, 2016):

Tabela 3: Principais parâmetros técnicos do grupo gerador

Modelo do Gerador	HTG –100 GF
Potência Nominal	100kW/125kva
Energia Standy	110kW/137,5kva
Tensão Nominal	110/220V
Frequência Nominal	60Hz
Corrente Nominal	328A
Velocidade Nominal	1800 rpm

Fonte: Adaptado de Pulita Energy, 2022.

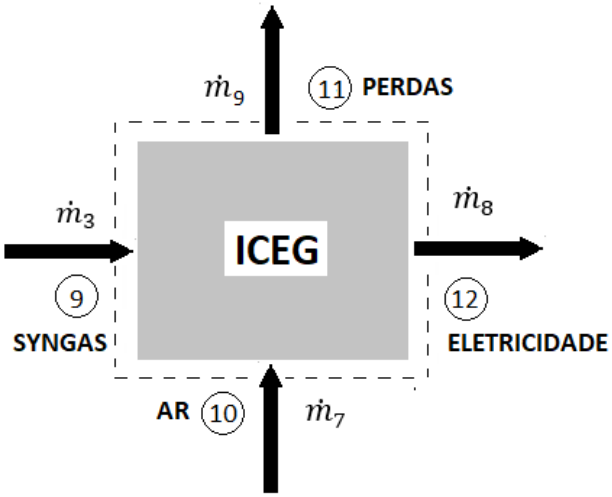


Fig. 11 Volume de controle do motor de combustão interna e gerador
Fonte: Elaborada pelo Autor

Na Figura 11 demonstra o volume de controle do motor de combustão interna e gerador com entrada de syngas e ar para combustão, saída de eletricidade como produto e perdas de calor pelos gases de exaustão.

O subsistema solar PV é acrescentado ao sistema de forma híbrida, configurado por painéis fotovoltaicos com a tecnologia de tecnologia Mono C-Si de 2,21m^2 que, ao receberem o calor por meio da radiação solar, o convertem em energia elétrica, que posteriormente é enviada ao controlador de carga, em seguida para a bateria, e finalmente para o inversor para que a carga armazenada na bateria enviada de forma adequada ao consumidor final.

A Figura 12 mostra o volume de controle do painel solar fotovoltaico, com a entrada a irradiação solar, e saída de eletricidade como produto.

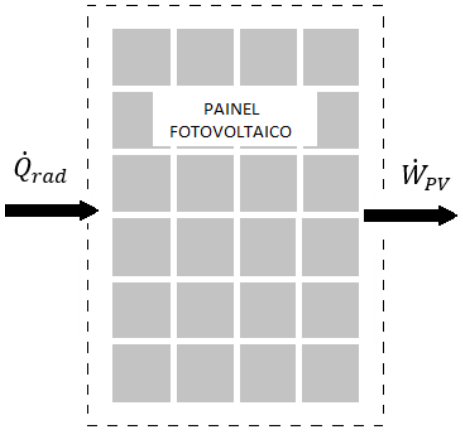


Fig. 12 Volume de controle do painel solar fotovoltaico
Fonte: Elaborada pelo Autor

Dois casos foram considerados para análise:

• Caso 1- HRES sem considerar a energia térmica recuperada.

• Caso 2- HRES considerando a energia térmica recuperada dos gases de exaustão e da água em alta temperatura no trocador de calor.

3.2 Estudo de Caso e Determinação da Demanda

A região escolhida para a aplicação deste estudo foi o município de João Pinheiro, localizada na região noroeste do estado de Minas Gerais, com uma população de 46.801 habitantes (IBGE, 2022). Segundo as *Características da População e Domicílios* do IBGE dos últimos 12 anos, essa comunidade ainda possui 331 domicílios sem acesso à energia elétrica da rede elétrica, estando entre as cidades com maior número de domicílios com essa condição no estado de Minas Gerais (MG) (IBGE, 2022). Além disso, o município de João Pinheiro (MG) é considerado o maior produtor de eucalipto do Brasil, obtendo fácil acesso aos resíduos da biomassa de eucalipto e menor custo de aquisição devido à proximidade da produção (LANDAU *et al*., 2020).

Considerando o CENSO do IBGE, que informa que uma família brasileira tem em média 2,79 pessoas (consideradas 3 pessoas para efeito de cálculo), a demanda foi calculada para atender 1/3 do número de domicílios sem acesso à energia elétrica, com um total de 330 habitantes (110 domicílios). Com um consumo per capita para o ano de 2021 para o estado de Minas Gerais sendo de 2612 kWh/habitante.ano (EPE, 2024), com um total de horas por ano de 8760h/ano e considerando um total de habitantes, então a demanda calculada pela Eq. (11) é de 98,39 kWe.

$$Demanda = \frac{Consumo\ per\ capta\ x\ Total\ de\ habitantes}{Total\ de\ horas\ no\ ano} \tag{11}$$

Diante disso, determinou-se que oferta de 100 kWe proveniente do HRES syngas-solar, com 80% fornecido pelo subsistema syngas e 20% fornecido pelo subsistema solar PV.

As horas de funcionamento do subsistema syngas (H_S) são definidas por Chaves (2020), como sendo 7608 horas por ano, considerando que a central funciona em 3 turnos, 24 horas por dia, de segunda a sábado, excluindo domingos para manutenção dos equipamentos e descanso dos funcionários. Já as horas de operação do subsistema com energia solar fotovoltaica (H_{PV}), definidas por Mahapatra *et al*. (2012), são de 1902 horas por ano, considerando que o sistema terá uma produção de eletricidade durante uma média de 6 horas por dia e com uma média anual de irradiação solar do plano

inclinado para o estado de Minas Gerais igual a 4800 Wh/m^2 (INPE, 2023). Vale ressaltar que este é um valor médio já que a energia solar tem característica intermitente e terá maior ou menor produção de acordo com a época do ano.

A Figura 13 mostra o fluxograma criado para identificar as etapas de construção e determinação da oferta a fim de atender a demanda:

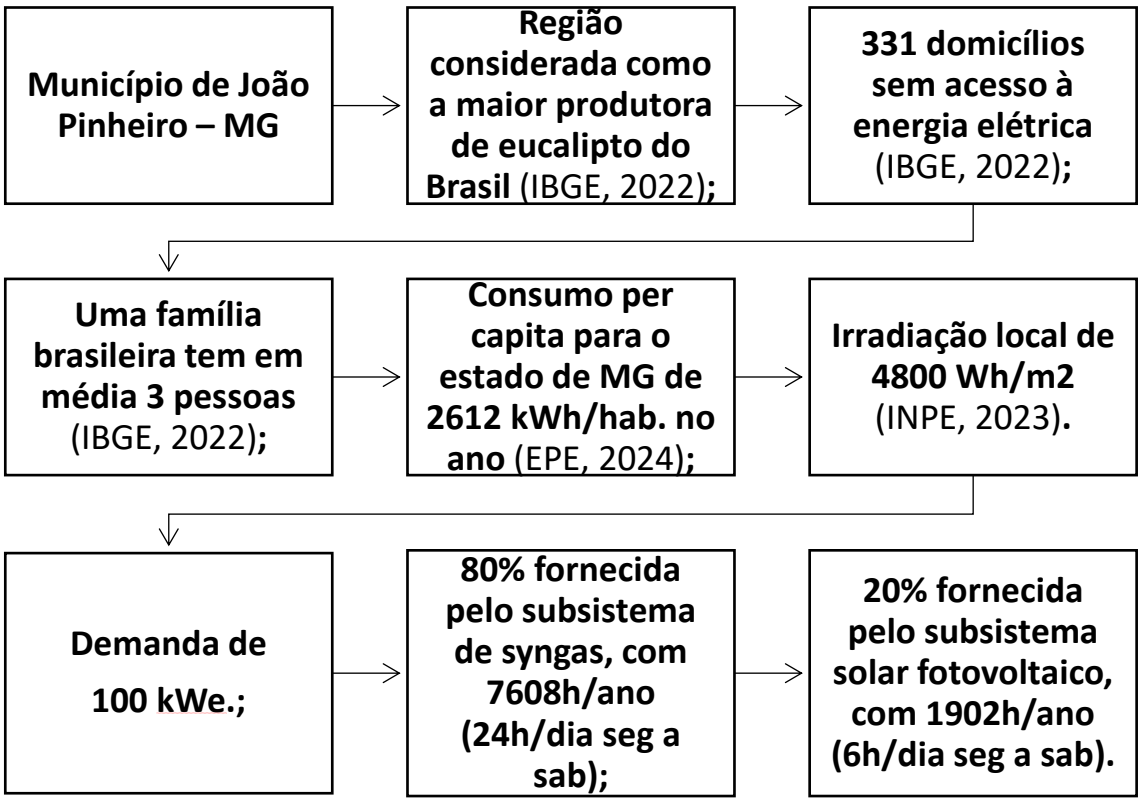


Fig. 13 Fluxograma do cálculo da demanda e oferta
Fonte: Elaborada pelo Autor

3.3 Metodologia da Revisão Bibliométrica

A revisão bibliométrica é um método quantitativo de análise que mede a contribuição científica com base em publicações em uma área de pesquisa específica (SOARES *et al*., 2016). Por meio de procedimentos de análise bibliométrica, é possível quantificar e analisar a produção científica de cada área, podendo: identificar tendências de pesquisa, lacunas em determinadas áreas, quantificar a produtividade de autores e

países, principais artigos, co-parceiros na pesquisa de autores e países, conhecer o passado, presente e futuro da pesquisa em uma área específica (CORDEIRO *et al*., 2000).

Para realizar a análise bibliométrica, foram realizadas três etapas: extração dos relatórios de citações na SCOPUS, tratamento dos dados no software RStudio e geração de mapas de visualização com indicadores bibliométricos disponibilizados pela ferramenta chamada Bibliometrix.

Na primeira etapa, os relatórios de citações da SCOPUS foram exportados como um registro completo e referências citadas, sendo salvos em formato de arquivo BibTex para processamento no software RStudio. Na segunda etapa, os dados foram processados no software RStudio, realizando limpezas e combinações repetidas de palavras-chave, tornando a amostra mais refinada. Após o tratamento, o arquivo foi salvo no formato “bib”. Por fim, na terceira etapa, o documento foi tratado no Bibliometrix, o que possibilitou a realização de uma análise bibliométrica dos dados coletados por meio dos mapas de visualização gerados (CODATO *et al*., 2018).

3.4 Metodologia da Revisão Sistemática

A revisão sistemática é uma revisão qualitativa que segue os estudos específicos reunindo vários assuntos relevantes sobre um tema e pesquisa os objetivos do protocolo desenvolvido, sendo de extrema importância para a tomada de decisão na área de pesquisa (GALVÃO *et al*., 2019). O método PRISMA é um instrumento útil para avaliação crítica de uma revisão sistemática por meio de um checklist com 27 itens e um fluxograma composto por 4 etapas que se referem às diferentes fases da revisão sistemática para auxiliar os autores no desenvolvimento de pesquisas de revisão sistemática e metanálises (MARDANI *et al*., 2017), que são: identificação, seleção, elegibilidade e inclusão.

Um fluxograma do método PRISMA aplicado neste estudo é mostrado na Figura 14 a seguir. A primeira etapa da análise do PRISMA, a identificação, foi alcançada através da coleta de trabalhos científicos na base de dados SCOPUS, escolhida por ser a maior base de dados e documentos científicos de referência do mundo. Nesta etapa, as palavras-chaves a serem utilizadas na string de busca foram discutidas e testadas com a finalidade de se obter resultados que mostrassem a aplicação da técnica, como: TTITLE-ABS-KEY = (“eco-efficiency” OR “eco-efficient” AND “techno-economic*” AND “biomass” AND “solar” AND “hybrid”) com 0 (zero) artigos, ou TTITLE-ABS-KEY = (“eco-efficiency” OR “eco-efficient” AND “techno-economic*” AND “biomass” AND “solar”) com 0 (zero) artigos, ou TTITLE-ABS-KEY = (“eco-efficiency” OR “eco-efficient” AND “techno-

economic*" AND "hybrid") com 2 (dois) artigos. Por fim, utilizou-se a string: TTITLE-ABS-KEY = ("*eco-efficiency*" OR "*eco-efficient*" AND "*techno-economic**"), que respondeu com um total de 35 artigos. Esta última foi escolhida por apresentar um maior número de resultados em artigos, possibilitando uma maior discussão do tema. Outro ponto a ser mencionado é a não utilização de palavras-chave com termos relacionados à análise ecológica, uma vez que seu uso está implícito para a aplicação da análise de ecoeficiência.

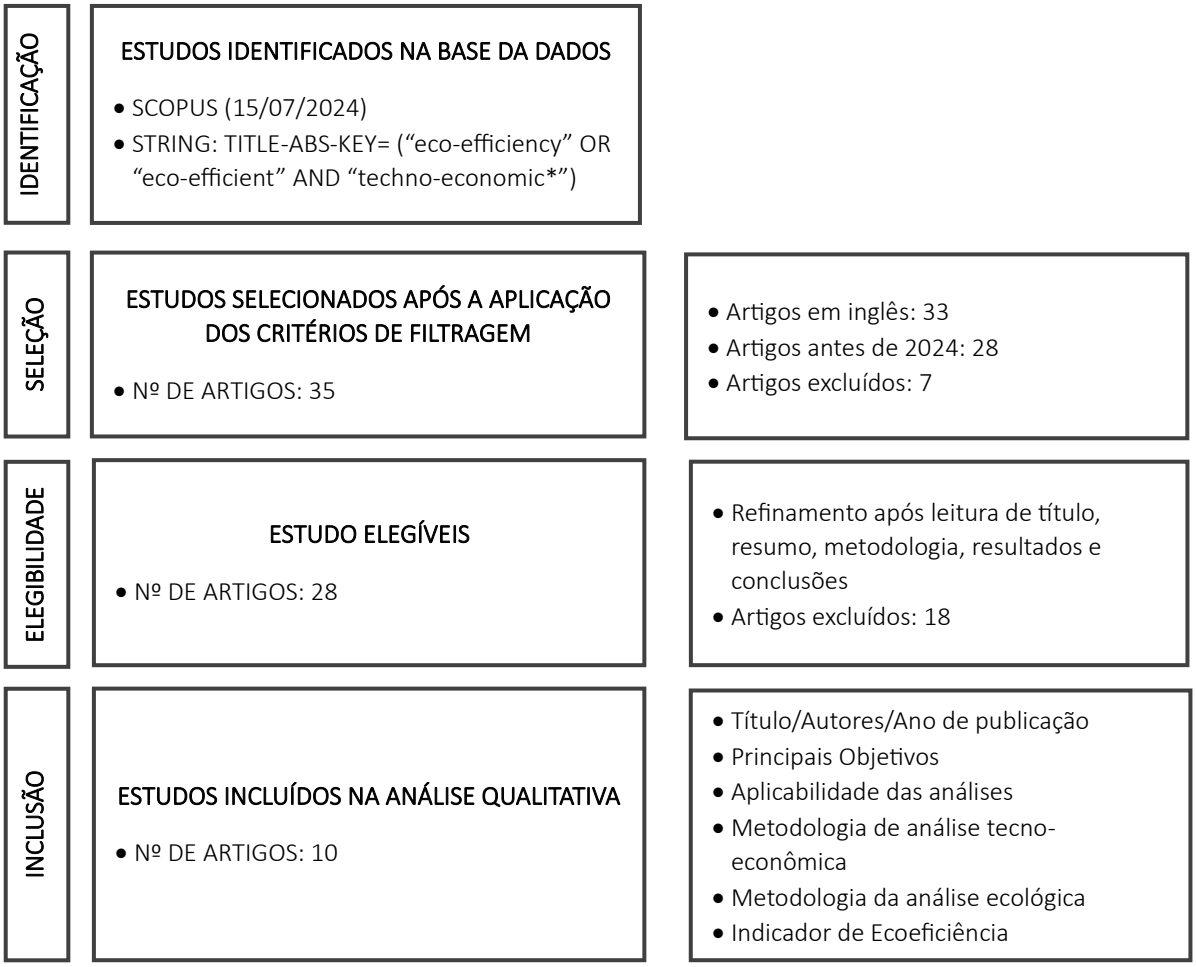


Fig. 14: Fluxograma do método Prisma aplicado
Fonte: Elaborado pelo Autor

Nos critérios de seleção, realizou-se o refinamento da busca de dados em "artigos" e "língua inglesa", com intervalo de tempo de 2007 a 2023 (excluindo o ano incompleto de 2024), com 28 artigos resultantes nesta etapa. Na elegibilidade, utilizou-se o critério do refinamento após leitura e análise do título, resumo, resultados e conclusões, em que foram selecionados para coleta de dados os 10 artigos que trouxeram resultados que condiziam com o tema em questão para a discussão no presente trabalho. Na inclusão, para estabelecer uma avaliação qualitativa, os 10 artigos

elegíveis foram analisados em seis tópicos: i) título, autores e ano de publicação; ii) objetivos; iii) aplicabilidade das análises; iv) metodologia de análise técnico-económica; v) metodologia de análise ecológica e vi) indicador de ecoeficiência.

3.5 Metodologia da Análise Técnica

Para analisar a produção de energia elétrica e avaliar a viabilidade energética do processo, foi desenvolvido um balanço energético baseado no princípio da conservação de energia pela primeira lei da termodinâmica. O balanço de energia pode ser escrito de forma simplificada, onde uma série de suposições foram seguidas. Para o sistema deste estudo, o balanço de energia pode ser escrito como (ÇENGEL *et al*., 2013):

$$\dot{Q} + \sum \dot{m}_{ent} \times h_{ent} = \dot{W} + \sum \dot{m}_{sai} \times h_{sai} \tag{12}$$

onde $\dot{Q}$ é a taxa de aquecimento, $\dot{W}$ a taxa de trabalho e h a entalpia específica, ent (entrada) e sai (saída), respectivamente. Neste ponto, os subsistemas e seus principais componentes serão avaliados separadamente.

3.5.1 Balanço Energético – Gaseificação da Biomassa

Para o subsistema syngas, o balanço de energia é descrito na Eq. (13):

$$\dot{Q}_{bio} + \dot{Q}_{ar} = \dot{Q}_{gás} + \dot{Q}_{cinzas} + \dot{Q}_{perdas} \tag{13}$$

Para calcular a vazão de ar que entra no gaseificador é necessário estimar a relação ar/biomassa equivalente no processo de gaseificação, sabe-se que esta relação está na faixa de 0,19 a 0,43, para o presente estudo foi adotado. uma proporção equivalente de 0,25, típica para um processo de gaseificação (BOLOY *et al*., 2010).

A entrada de energia do combustível pode ser calculada como a Eq. (14):

$$\dot{Q}_{bio} = \dot{m}_{bio} \times PCI_{bio} \tag{14}$$

onde PCI o valor calorífico mais baixo e $\dot{m}_{bio}$é a taxa de fluxo de massa do combustível (biomassa). Desde que não ocorra condensação, a potência do ar fornecido no gaseificador pode ser dada pela Eq. (15):

$$\dot{Q}_{ar} = \dot{m}_{ar} \sum_{1}^{j} w_j \, x \, Cp_j (T - T_0) \tag{15}$$

onde w_j é a fração de massa de um componente e Cp_j o calor específico de um componente, $(T - T_0)$ representa a temperatura do gás de pré-aquecimento e a temperatura ambiente, respectivamente. Para calcular a energia associada ao gás de síntese ($\dot{Q}_{syn}$) e cinzas ($\dot{Q}_{cinzas}$), as seguintes Eqs. (16) e (17) são usados:

$$\dot{Q}_{gás} = \dot{m}_{gás} \times PCI_{gás} \tag{16}$$

$$\dot{Q}_{cinzas} = \dot{m}_{cinzas} \times h_{cinzas} \tag{17}$$

Para calcular a eficiência energética do gás frio, a energia útil de saída é dividida pela energia de entrada do sistema, conforme segue a Eq. (18):

$$\eta_{G_f} = \frac{\dot{Q}_{gás}}{\dot{Q}_{bio}} \tag{18}$$

No trocador de calor, a potência térmica ganha pela água ($\dot{Q}_{H2O}$) é igual à potência térmica perdida pelo gás de síntese por convecção. Com isso, pode-se calcular a potência térmica perdida do gás de síntese para a água no trocador de calor pela Eq. (19), e o Cp_{syn} considerado é de 1.33 kJ/kgK de acordo com (BOLOY *et al*., 2010):

$$\dot{Q}_{H2O} = \dot{m}_{gás} \times Cp_{gás} (T - T_0) \tag{19}$$

Após o gás de gaseificação passar pelo trocador de calor, ele é injetado no filtro de ciclone, onde o gás de gaseificação é transformado em syngas devido a purificação. Contudo, as suas propriedades termodinâmicas não são alteradas, e com isso a potência térmica do gás de gaseificação ($\dot{Q}_{gás}$) é igual a potência térmica do syngas ($\dot{Q}_{syn}$). Está será injetado no motor de combustão interna e gerador somada à perda de potência do trocador de calor ($\dot{Q}_{H2O}$).

O balanço de energia também foi aplicado no motor de combustão interna e gerador, como mostra a Eq. (20):

$$\dot{Q}_{syn} + \dot{Q}_{ar} = \dot{Q}_{gex} + \dot{W}_{ICEG} \tag{20}$$

Os motores de combustão têm eficiência muito baixa. Segundo (SUSASTRIAWAN *et al*., 2017), os motores a gasolina apresentam eficiência de aproximadamente 20%. Das perdas, 10% são perdas por atrito mecânico entre os componentes do motor ($\dot{Q}_{atr}$), e 65% são perdas térmicas, das quais 30% são perdas por interação dos gases com a parede da câmara de combustão ($\dot{Q}_{par}$), 35% são perdas para o meio ambiente ($\dot{Q}_{amb}$) e aproximadamente 5% das perdas por convecção ($\dot{Q}_{conv}$), (MARTINS *et al.,* 2006). Portanto, a perda de energia. A perda total de energia térmica pelos gases de exaustão no ICEG ($\dot{Q}_{gex}$) é calculada pela Eq. (21) (MARTINS *et al.,* 2006).

$$\dot{Q}_{gex} = \dot{Q}_{atr} + \dot{Q}_{par} + \dot{Q}_{amb} + \dot{Q}_{conv} \tag{21}$$

A eficiência térmica do ICEG é geralmente determinada como a razão entre a potência de saída e a energia do combustível de entrada, conforme dado pela Eq. (22):

$$\eta_{ICEG} = \frac{\dot{W}_{ICEG}}{\dot{Q}_{syn}} \tag{22}$$

3.5.2 Balanço Energético – Painéis Solares Fotovoltaicos

No cálculo da análise de energia do subsistema solar PV não há fluxo de massa, apenas energia. Portanto, toda a energia que entra no sistema é igual à energia que sai na forma de energia elétrica. Eq. (23) expressa a potência fornecida pelo conjunto de painéis fotovoltaicos (ANGONESE *et al*., 2006):

$$W_{PV} = \eta_{PV} \times N_{PV} \times A_{PV} \times I_{PV} \tag{23}$$

onde W_{PV} representa a energia elétrica entregue pelo conjunto de painéis fotovoltaicos, η_{PV} a eficiência do conjunto fotovoltaico, N_{PV} o número de módulos fotovoltaicos (unidade), A_{PV} a área de um módulo fotovoltaico (m^2) e I_{PV} a irradiação global em um plano inclinado (Wh/m^2).

3.5.3 Eficiência Energética Global do HRES

Para calcular a eficiência energética do sistema, o conceito da Eq. (24) (ÇENGEL *et al*., 2013) é aplicado:

$$\eta_T = \frac{\sum E_{ent}}{\sum E_{sai}} \quad (24)$$

Para calcular a eficiência energética do sistema no caso 1 (HRES sem considerar energia e calor combinados - CHP), a Eq. (25) (ANGONESE *et al*., 2006) é aplicada.

$$\eta_{HRES} = \frac{\dot{W}_{ICEG} + \dot{W}_{PV}}{\dot{Q}_{bio} + \dot{Q}_{rad}} \quad (25)$$

Para o cálculo da eficiência energética do sistema no caso 2 (HRES considerando CHP e venda de energia excedente), a Eq. (26) (ANGONESE *et al*., 2006) é aplicada.

$$\eta_{HRES} = \frac{\dot{W}_{ICEG} + \dot{W}_{PV} + \dot{Q}_{rec}}{\dot{Q}_{bio} + \dot{Q}_{rad}} \quad (26)$$

Segundo Sprouse III *et al*. (2013), o sistema de recuperação de calor de um ICE é alvo do maior número de trabalhos de pesquisa. Este ciclo orgânico tem entre 7 e 10% de eficiência, o que leva a uma economia de combustível de cerca de 10% com o uso desta tecnologia. Essa redução no custo do combustível faz com que o retorno do sistema ocorra em um período de 2 a 5 anos, dependendo do tamanho da usina. Para este estudo, foi considerado o caso de menor eficiência de recuperação de calor residual, com 7%, aplicando a Eq. (27):

$$\dot{Q}_{rec} = (\dot{Q}_{gex} + \dot{Q}_{H2O}) \times 0{,}07 \quad (27)$$

3.6 Metodologia da Análise Econômica

Por meio da análise econômica é possível avaliar a viabilidade de implantação de um projeto para tomada de decisão. Vários indicadores podem ser utilizados para essa análise de viabilidade, sendo os mais comuns: Valor presente líquido, índice de lucratividade, taxa interna de retorno, custo de energia e custo de capital inicial do sistema (ROBERTS *et al*., 2016).

Para comparar economicamente o sistema proposto neste trabalho com outros da literatura, estima-se o Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE) gerado por cada sistema. Sabe-se que o LCOE é o indicador mais utilizado para avaliar a viabilidade de qualquer usina e comparar diferentes tecnologias de geração de energia. O LCOE pode ser calculado como a Eq. (28) (SARKIS *et al*., 2018):

$$LCOE = \frac{CRF.CI + CO\&M}{E_{liq_anual}} \quad (28)$$

onde CI representa o custo total de investimento do sistema (US$), $CO\&M$ representa o custo anual de manutenção e operação, E_{liq_anual} denota a geração líquida anual de energia do sistema. Além disso, CRF o fator de recuperação de capital é calculado como a Eq. (29) (SARKIS *et al*., 2018):

$$CRF = \frac{i(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} \quad (29)$$

onde i é a taxa de juros e t é o número de anos em que a planta está operando. A taxa de juros neste trabalho é atribuída como 20,5%, sendo 5% referente ao Risco do Negócio (JÚNIOR *et al.,* 2005), 5% referente à Liquidez (RANKIN *et al.,* 2021) e 10,5% referente ao custo de oportunidade Taxa SELIC (Sistema Especial de Liquidação e Custódia) (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2024). O número de anos de operação nesta obra é assumido como sendo de 10 anos, de acordo com o ciclo de vida útil dos equipamentos da planta (INSTRU, 2021).

O CI refere-se à aquisição de todos os equipamentos para o sistema de gaseificação-ICEG (gaseificador, motor/gerador, filtro e permutador de calor) e equipamentos para geração de energia elétrica a partir de energia solar (painéis solares e inversor), considerando que o terreno já existe e não terá custo de aquisição. O fator de correção de 1,23 refere-se a 23% refere-se ao custo de preparação do terreno (5%), custos de projeto e engenharia (10%), custos de contingência (5%) e permissão (3%), somando 23% em relação aos custos de aquisição, conforme a Eq. (30) (SILVEIRA *et al*., 2012):

$$CI = 1{,}23\ (CI_S + CI_{PV}) \quad (30)$$

onde CI_S se refere ao custo de investimento de capital do subsistema syngas e CI_{PV} do subsistema de painéis solares fotovoltaicos.

O $CO\&M$ (representado na Eq. (28)) inclui os gastos necessários para operar e manter a instalação, tais como: gastos com mão de obra, material, equipamento, reposição e reparo de equipamentos permanentes (CARNEIRO *et al*., 2019) sendo determinado como 4% do CI (PARKS *et al*., 2014), como a Eq. (31):

$$CO\&M = 0{,}04 \times CI \quad (31)$$

As equações de receita anual esperada para a análise de viabilidade econômica com a comercialização da bioeletricidade produzida pelo sistema são expressas nas Eqs. (32), (33) e (34) (VALE D'AVILA *et al.*, 2019):

$$R_S = E_S \times H_S(C_{el} - C_{el_S}) \tag{32}$$

$$R_{PV} = E_{PV} \times H_{PV}\left(C_{el} - C_{el_PV}\right) \tag{33}$$

$$R_T = R_S + R_{PV} \tag{34}$$

onde R_S é a receita anual do subsistema syngas (US$/ano), R_{PV} a receita anual do subsistema solar PV (US$/ano) e R_T a receita total do HRES. C_{el} a tarifa de eletricidade da concessionária (US$/kWh), C_{el_S} o custo da eletricidade produzida no subsistema syngas (US$/kWh) e C_{el_PV} o custo da energia elétrica produzida no subsistema solar PV (US$/kWh). E_S representa a energia produzida pelo subsistema syngas (kWh), E_{PV} a energia produzida pelo subsistema solar - PV (kWh), multiplicada pelas respectivas horas totais de operação H_S e H_{PV}. Considerando a amortização dos equipamentos, esta é deduzida do lucro tributável através da Eq. (35) (ASSIS *et al.*, 2021):

$$D_t = \frac{CI - TD}{VU} \tag{35}$$

onde D_t se refere à depreciação por ano, P ao custo de aquisição do sistema, TD à taxa de depreciação e VU à vida útil em anos. Na Tabela 4, os dados de vida útil e taxa de depreciação são apresentados de acordo com a Instrução Normativa da Receita Federal do Brasil nº 1700 (INSTRU *et al.*, 2021).

Tabela 4: Vida útil e taxa de depreciação dos equipamentos

Equipamento	Vida útil	Taxa de depreciação
Gaseificador	10	10%
Motor gerador	10	10%
Trocador de calor	10	10%
Equipamento Solar	12,5	8%
Bateria	10	10%

Fonte: Adaptado de (INSTRU, 2021)

O TMA (taxa mínima de atratividade) é o retorno mínimo exigido para uma empresa. Sua definição é de grande importância na tomada de decisão dos investidores

(VALE D'AVILA *et al*., 2019). Para este estudo, um TMA de 12% aa. foi adotado, obtida pela taxa do Sistema Especial de Liquidação e Custódia (SELIC), no ano de 2022 (GASPAR *et al*., 2020). O valor presente líquido (VPL) é um indicador do fluxo de caixa total do investimento trazido a valor presente (INSTRU, 2021). Para o cálculo do VPL, a Eq. (36) será usada:

$$\mathrm{VPL} = \sum_{\mathrm{t}=0}^{\mathrm{n}} \frac{\mathrm{FCt}}{(1+\mathrm{TMA})^{\mathrm{t}}} - \mathrm{FC0} \tag{36}$$

onde FC representa o fluxo de caixa no período t (US$); t o enésimo período em que o dinheiro será investido no projeto (começa a partir do período em que houver o primeiro fluxo de caixa); n representa o número de períodos e TMA a taxa mínima de atratividade.

Para que os valores de VPL indiquem a viabilidade do projeto, eles devem estar dentro dos seguintes parâmetros: VPL>0 sistema viável (rentável, cobre os custos de implantação e manutenção do sistema produtivo), VPL<0 sistema inviável (descapitalização, perda, não cobre os custos envolvidos no sistema de produção) [68].

A taxa interna de retorno (TIR) representa o retorno sobre o capital investido, uma TIR aceitável deve ser igual ou maior que a TMA (BARBIERES *et al*., 2007), podendo ser substituída pela Eq. (37):

$$0 = \sum_{t=0}^{n} \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \tag{37}$$

Payback é o tempo necessário para a recuperação de um investimento, utilizado como medida de atratividade para os investidores (YARD, 2000). Eq. (38) será usado para calcular o Payback:

$$PB = \frac{CI}{FC_{liq}} \tag{38}$$

onde PB representa o Payback e CI o custo de investimento de capital e FC_{liq} o fluzo de caixa líquido.

Os principais dados financeiros de insumos regulamentados, como insumos, capital e custos operacionais, bem como outras suposições financeiras, são fornecidos na Tabela 5 a seguir. Para uniformidade, todos os custos foram convertidos em dólares (US$).

Tabela 5: Principais premissas econômicas para o sistema proposto

Item	Valor	Observações	Ref.
CI_S (US$/kW)	1159	Custos relativos à aquisição do gaseificador de biomassa *downdraft*, limpeza de gases, sistema de acondicionamento e custos relativos à aquisição do motor de combustão interna e gerador elétrico.	(GARBA *et al*., 2015)
CI_{PV} (US$/kW)	1000	Custos relacionados à aquisição de painéis fotovoltaicos, controlador, inversor e bateria.	(CANDELISE *et al*., 2013; REICHELSTEIN *et al*., 2013)
C_{el} (US$/kWh)	0,12	Preço de venda de energia elétrica praticado no Brasil.	(EPE, 2024)
$CO\&M$ (%)	4	Os custos de operação e manutenção (O&M) correspondem a 4% do investimento total, aplicados de acordo com ambos os sistemas. Inclui salários, eletricidade, água, remoção de cinzas e custos de manutenção de equipamentos.	(FREITAS *et al*., 2006)
TMA (%)	12	Taxa média de desconto considerada por ano.	(CHAVES, *et al*., 2020)
Tributação (%)	18	Imposto de desempenho para pequenas e médias empresas no Brasil.	(ZANATTA *et al*., 2006)

Fonte: Elaborado pelo autor

Para este estudo de viabilidade econômica, considerou-se que o produto HRES será exclusivamente bioenergético, cuja bioeletricidade será vendida para a rede local; o preço de venda adotado é de 0,1014 US$/kWh de acordo com as Tarifas Médias por Classe de Consumo, avaliadas pelo Consumo Residencial do Anuário Estatístico de Energia Elétrica (EPE, 2024); a vida útil da usina foi estimada em 10 anos (IBGE, 2022); os fluxos de caixa foram projetados considerando a produção de bioenergia por hora de trabalho e preço de venda.

Além disso, foram considerados 18% dos impostos sobre a receita bruta, referentes a: Programa de Integração Social (PIS); Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (COFINS); Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL) e Imposto Relativo a Circulação de Mercadorias (ICMS) (ZANATTA *et al*., 2006) e Imposto de Renda (IR) de 34% sobre o lucro bruto. Sendo o valor máximo permitido por lei, a ser cobrado de qualquer empresa no Brasil (INSTRU, 2021).

Com o objetivo de aproximar esta análise de um cenário de aplicação real, este estudo foi construído com base em orçamentos e catálogos referentes ao custo de implantação do sistema de gaseificação e painéis solares fotovoltaicos.

3.7 Metodologia da Análise Ecológica

Arabkoohsar *et al*., (2021), destacam que, o sistema solar PV de uma planta híbrida não gera emissões de indicadores de toxidade humana e de aquecimento global durante a sua operação, considerado então, 100% eficiente deste ponto de vista ecológico, sem considerar o impacto visual e o descarte final. Rabaia *et al*., (2021) afirma ainda que os sistemas fotovoltaicos, em fase operacional, são completamente seguros para o meio ambiente, não produzem ruído, nem emitem gases tóxicos. Sendo assim, a análise ecológica será aplicada somente no subsistema syngas por ter um impacto ambiental durante a operação.

3.7.1 Simulação da combustão usando GASEQ

Um gás de síntese apresenta a seguinte composição molecular em base seca: H_2 = 0,2489, CO = 0,1967, CO_2 = 0,1014, CH_4 = 0,0094, N_2 = 0,4436. A Tabela 6 a seguir relaciona as condições iniciais dos reagentes no processo de combustão do gás de síntese em um ICEG à pressão de temperatura padrão (PTP) (BOLOY *et al*., 2011).

Tabela 6: Reagentes no processo de combustão num ICEG em PTP

Composição do gás de síntese em base seca	
H_2(mol)	0,2489
CO(mol)	0,1967
CO_2(mol)	0,1014
CH_4(mol)	0,0094
N_2(mol)	0,4436
MP (g/Nm ^{3})	10, 20, 30, 40
PCI (MJ/kg)	5,50
Ar	
O_2 (mol)	0,2416
N_2(mol)	0,9085
Temperatura de entrada do gás de síntese ICEG (K)	300
Temperatura da chama de combustão (K)	1952
ICEG Temperatura de entrada de ar (K)	298

Fonte: Elaborado pelo autor

Por meio da simulação no software GASEQ, foi possível avaliar a reação de combustão do gás de síntese (Eq. (39)), com peso molecular de 29,11 kg/kmol e densidade de 1,03 kg/Nm^3.

$$0.2482H_2 + 0.1957CO + 0.1014CO_2 + 0.0094CH_4 + 0.4436N_2 + 0.2416(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow 0.3075CO_2 + 0.2677H_2O + 0.9084N_2 \quad (39)$$

3.7.2 Eficiência Ecológica

A eficiência ecológica (ε) é o nome do método proposto por (CARDU *et al*., 1999), demonstrado pela Eq. (40) para considerar o potencial de poluição do ar e a eficácia na conversão de combustível em energia (CARDU *et al*., 1999; SOARES *et al*., 2022).

$$\mathcal{E} = \left[c \frac{\eta}{(\eta + \Pi_p)} \ln(k - \Pi_p) \right]^n \quad (40)$$

onde $\mathcal{E}$ é a eficiência ecológica do HRES syngas-solar, que varia de 0 (pior combustível) a 1 (melhor combustível); η é a eficiência de HRES syngas-solar; Π_p é o indicador de poluição, em kg CO_2eq/MJ; c, k e n são constantes adimensionais. Para produzir energia térmica, elétrica ou ambas simultaneamente (sistemas de cogeração), os valores de; c, k e n são: 0,204, 135 e 0,5, respectivamente (CARDU *et al*., 1999; SOARES *et al*., 2022). Portanto, essas constantes serão consideradas de acordo com o HRES syngas-solar para produção de eletricidade.

Por meio desse método, é possível estimar os indicadores de toxidade humana e de aquecimento global, conforme as Eqs. (41) e (42):

$$\Pi_{GW} = \frac{f_{CO_2_eq}}{PCI_{comb}} \quad (41)$$

$$\Pi_{HT} = \frac{f_{1,4DCB_eq}}{PCI_{comb}} \quad (42)$$

onde Π_{GW} representa as emissões que contribuem para o aquecimento global, expressas em $kg_{eq_poluente}/MJ_{combustível}$; e Π_{HT} representa as emissões que contribuem para a toxicidade humana, expressas em kg $1,4DCB_{eq}/MJ_{combustível}$, onde 1,4-diclorobenzeno é uma substância usada para calcular o nível de toxicidade humana (CARDU *et al*., 1999; SOARES *et al*., 2022). O fator de emissão de dióxido de carbono equivalente ($f_{CO_2_eq}$), expresso em $kg_{CO2_eq}/kg_{combustível}$, e o fator de emissão de 1,4-dicolobenzeno equivalente ($f_{1,4DCB_eq}$), expresso em $kg_{1,4DCB_eq}/kg_{combustível}$, podem ser calculados através das Eqs. (43) e (44), como segue:

$$f_{CO_{2_eq}} = f_{CO2} + 28f_{CH4} + 265f_{N2O} \quad (43)$$

$$f_{1,4DCB_eq} = 4.54f_{SO2} + 56.71f_{NOx} + 38.75f_{PM} \quad (44)$$

O fator de emissão da espécie ($f_{espécie}$) representa o fator de emissão de cada espécie decorrente da combustão da mistura ar-combustível, em $kg_{especie}/kg_{\text{combustível}}$, determinado pela Eq. (45):

$$f_{espécie} = \frac{n_mols_{espécie} \times MW_{espécie}}{n_mols_{comb} \times MW_{comb}} \quad (45)$$

onde $n_mols_{espécie}$ e n_mols_{comb} correspondem ao número de moles da espécie e do combustível, respectivamente; e $MW_{espécie}$ e MW_{comb} correspondem ao peso molecular de cada espécie e combustível, respectivamente.

O indicador de poluição, Π_p, é composto por Π_{HT} e por Π_{GW}, e é estimado através da Eq. (46), declarado em $kg_{\ eq\ poluente}/MJ_{\text{combustível}}$ para ambos os modos de operação, modo de combustível único e modo de combustível duplo:

$$\Pi_p = 0.742\ \Pi_{HT} + 0.258\ \Pi_{GW} \quad (46)$$

3.8 Metodologia da Análise de Indicador de Ecoeficiência

O indicador de ecoeficiência (EE) foi introduzido pela primeira vez pelo Conselho Empresarial Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável para promover o desenvolvimento sustentável na indústria (GHEEWALA *et al*., 2019). Agora é amplamente reconhecido e usado internacionalmente e foi incorporado como um padrão internacional (ISO14045:2012). É genericamente definido como a relação entre o valor do produto ou serviço e o impacto ambiental. Para medir o indicador de ecoeficiência, a WBCSD traz uma estrutura que apresenta um grau de flexibilidade a fim de ser aplicada e interpretada em diferentes tipos de negócios (VERFAILLIE *et al*., 2000).

Os indicadores de ecoeficiência são calculados utilizando a Eq. (47) VERFAILLIE *et al*., 2000):

$$Ecoeficiência = \frac{Indicador\ de\ produto\ ou\ serviço}{Indicador\ de\ Influência\ ambiental} \quad (47)$$

A forma como o indicador foi concebido pela WBCSD tendo a dimensão econômica como numerador permite estabelecer uma relação de proporcionalidade

direta: quanto maior for o valor do indicador, maior será o grau de ecoeficiência do objetivo da análise (VERFAILLIE *et al*., 2000).

Para os parâmetros econômicos podem ser considerados: EBIT (Lucro antes de Juros e Imposto de Renda); margem bruta; e valor agregado. Para os parâmetros de desempenho ambiental podem-se citar resíduos despejados em aterros, criação de oxidantes fotoquímicos, entre outros (VERFAILLIE *et al*., 2000). Estes indicadores devem ser escolhidos de acordo com as necessidades e particularidades de cada aplicação, como alguns exemplos da Tabela 7:

Tabela 7: Indicadores Geralmente Aplicáveis

Indicador Geralmente Aplicável	**Indicador**
Valor de produtos ou serviços	- Quantidade de bens ou serviços - Vendas Líquidas
Influência ambiental de produtos ou serviços	- Consumo de Energia - Consumo de materiais - Consumo de água - Emissão de gases do efeito estufa - Emissão de substâncias destruidoras do Ozônio

Fonte: VERFAILLIE *et al*., 2000.

O VPL do LCOE apresenta o valor total dos casos investigados, enquanto o Fator de Emissão de Dióxido de Carbono representa a emissão dos gases do efeito estufa como indicador do desempenho ambiental das estratégias propostas. Neste estudo, a ecoeficiência é definida conforme mostrado na Eq. (48) (SAUVE et al., 2023):

$$EE = \frac{VPL}{f_{CO_{2}_eq}} \tag{48}$$

onde EE indica o índice de ecoeficiência, $f_{CO_{2}_eq}$ indica o fator de emissão de dióxido de carbono (kg_{CO2_eq}) e valor presente líquido VPL da estratégia examinada (US$).

O indicador de ecoeficiência revela-se uma importante ferramenta que ajuda a revelar e analisar os trade-offs entre o valor agregado e os impactos ambientais das configurações do HRES syngas-solar. Deseja-se para o caso ideal seja aumentar o valor econômico e reduzir os impactos ambientais (completa dissociação entre meio ambiente e economia), ou seja, quanto maior o resultado, melhor é a ecoeficiência (GHEEWALA *et al*., 2019).

4. Resultados e Discussões

Nesta seção, serão apresentados e discutidos resultados da revisão bibliométrica com a utilização do software RStudio e resultados obtidos pela revisão sistemática utilizando o método PRISMA, sobre artigos e revisões realizadas no âmbito das análises techno-econômicas e ecoeficiência, considerando publicações de 2007 a 2023. Também será apresentado e discutido os resultados determinados de taxa de fluxo de massa de gás de síntese calculada, bem como a eficiência energética do sistema e os custos do ciclo de vida da energia dos modos de operação do HRES syngas-solar. Os fatores de emissão foram determinados para calcular a eficiência ecológica e a análise de indicador de ecoeficiência.

4.1 Resultados e Discussão da Revisão Bibliométrica

Nesta subseção, são apresentados os resultados da análise bibliométrica, com uma amostra de 35 artigos filtrados e tratados nos softwares RStudio e Bibliometrix, analisando os resultados de: áreas de pesquisa, publicações por país, publicações por ano e rede de concorrência das palavras-chave dos autores.

4.1.1 Áreas de pesquisa

Confirmado pela Figura 15, fica comprovado que o foco das pesquisas de 2007 a 2023 são publicações com os temas em energia, ciência ambiental e engenharia.

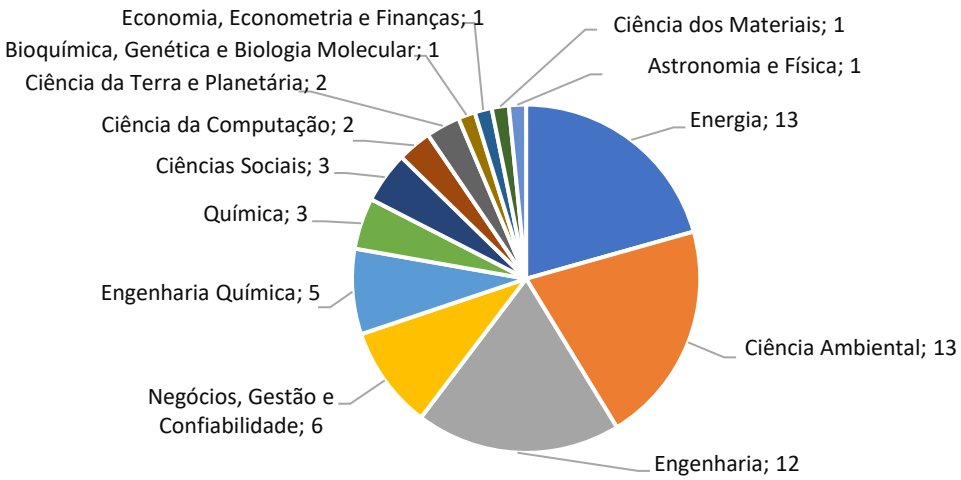


Fig. 15: Áreas de pesquisa
Fonte: Disponível no banco de dados SCOPUS

Segundo a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA – do inglês International Renewable Energy Agency) (IRENA, 2023), a fim de alcançar os meios de subsistência e bem-estar exigidos na Agenda de 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, nos últimos anos vem se implantando investimento global em tecnologias relacionadas a transição energética, que atingiu o seu novo recorde em 2022 com US$ 1,3 trilhões.

Esse investimento em tecnologias relacionadas a transição energética pode servir de base de influência nos resultados obtidos na área de pesquisa dos últimos anos. A Figura 15 revela que dos 35 artigos, 13 incluíram pesquisas sobre energia, 13 estavam relacionados a ciência ambiental e 12 incluíram assuntos sobre Engenharia.

4.1.2 Publicações por país

Nesta subseção foi feita uma análise do número de publicações por país. A Figura 16 revela o número de publicações por país.

A França e o Reino Unido apresentaram cerca de 5 artigos publicados por cada nos últimos anos. Em seguida, Brasil, Holanda, Espanha e Emirados Árabes Unidos com 3 artigos cada, e então Canadá, China, Polônia e Alemanha com 2 artigos cada. Vale a pena ressaltar que os artigos publicados pelos respectivos países observados nesse trabalho trazem uma análise da aplicação das técnicas de ecoeficiência e análise tecno-econômica, abrindo campo para as perspectivas em buscas de indicadores de viabilidade e aplicabilidade de tecnologias de energias renováveis.

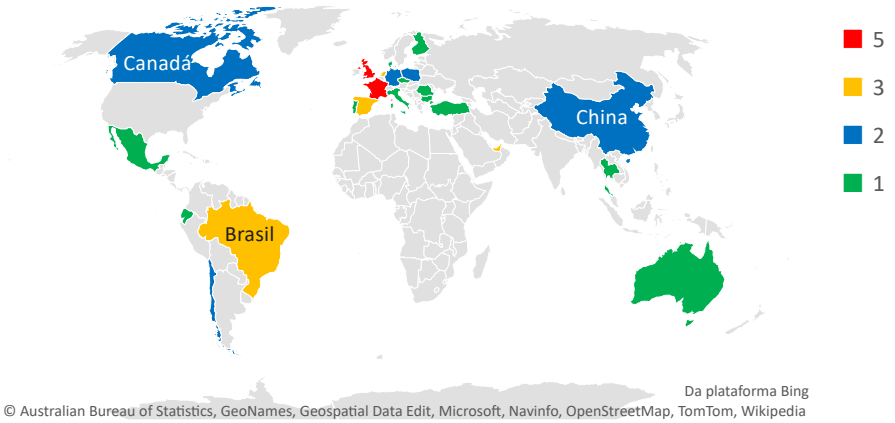


Fig. 16: Publicações por país
Fonte: Disponível no banco de dados SCOPUS

A Europa, por sua vez, é o terceiro continente com maior valor de emissão de CO_2 (1,78 bilhão de toneladas), devido à forte dependência que o setor energético

obtém do gás natural para geração de calor e energia elétrica. Devido a esta carga ambiental, a União Europeia tem o objetivo da descarbonização para até 2050, tomando iniciativas junto a Comissão Europeia com diferentes estratégias nos últimos anos, o que pode supor o interesse da França, Reino Unido e outros países europeus em publicações relacionados ao tema em questão (BERTASINI, 2023). Além disso, o Irena, (2023) também constatou que mais de 50% da população mundial que reside em países em desenvolvimento e emergentes, recebeu apenas 15% dos investimentos em tecnologias relacionados a transição energética no ano de 2022. Um exemplo é a África Subsaariana que recebeu menos de 1,5% do valor distribuído globalmente entre os anos 2000 e 2020, e que o investimento per capita em energia renovável na Europa e na América do Norte (com exceção do México) foi quase 23 vezes maior que na África Subsaariana em 2015 e 57 vezes maior em 2021 (IRENA, 2023), destacando assim a grande necessidade de um redirecionamento mais equitativo, que atenda a países que tenham um potencial considerável porém inexplorado devido a dificuldade de atrair investimentos.

Outro fato é que em 2017, a China lançou uma campanha para eliminar gradualmente o carvão e o gás em suas províncias predominantemente rurais do norte. A meta era usar “fontes limpas” para suprir 70% das necessidades de aquecimento da região até 2021 (uma participação de 65% foi alcançada até 2020, com base nos últimos dados disponíveis) e instalar bombas de calor para cobrir 500 milhões de metros quadrados (REN 21, 2023). De acordo com dados do Global Status Report (REN 21, 2021), no início de 2020, a energia solar fotovoltaica na China representava 70% da oferta global. A parcela da oferta atendida por energia renovável atingiu recordes históricos na China, Europa e Estados Unidos. Na China, a geração solar aumentou 12%, respectivamente em relação a 2019.

O Brasil, diferentemente dos demais países, se destaca por possuir uma matriz elétrica predominantemente renovável (EPE, 2024) e com enorme potencial para implantação de energias renováveis, e principalmente de forma híbrida como proposto neste trabalho. Este fato pode supor a influência nos resultados obtidos pelo banco de dados que mostraram oportunidades relevantes no Brasil para as pesquisas de viabilidade com análise tecno-econômica e ecoeficiência para as áreas destacadas em energia, ciência ambiental e engenharia.

4.1.3 Publicações por ano

Nesta subseção, foi identificado o número de publicações por ano. A Figura 17 mostra a distribuição temporal dos 35 artigos sobre o tema que relaciona análises de

ecoeficiência e análise tecno-econômica publicados de janeiro de 2007 a dezembro de 2023.

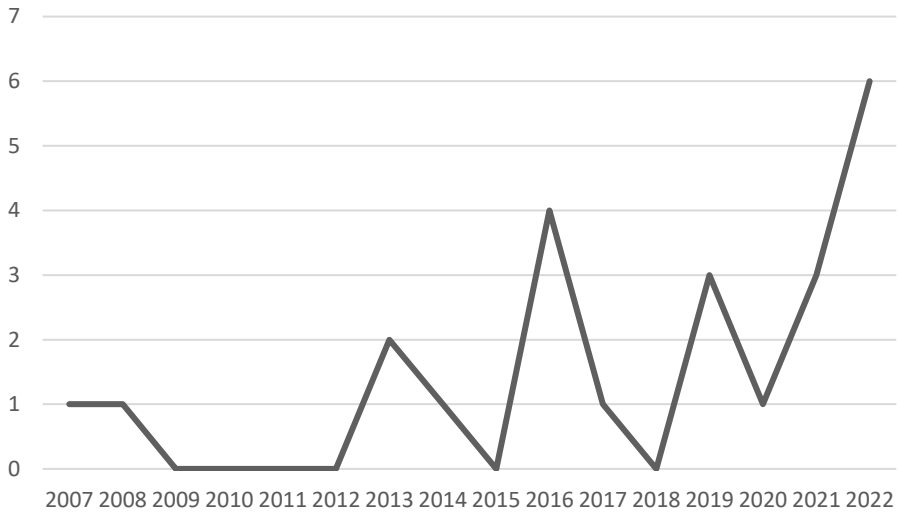


Fig. 17: Publicações por ano
Fonte: Disponível no banco de dados SCOPUS

As preocupações com as mudanças climáticas decorrentes do aumento dos gases do efeito estufa tem sido objeto de debates e discussões em todo o mundo, remontam do século XIX (OLIVEIRA *et al*., 2019). No ano de 1972 em Estocolmo, a Primeira Conferência Mundial sobre o Homem e o Meio Ambiente marca o início das discussões em nível internacional sobre as necessidades de um pacto global. Logo depois, no ano de 1992 com Eco-92 realizada no Brasil, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento reforçou a necessidade de atuações políticas que possam reverter os as ameaças e impactos causados ao planeta, o que consequentemente afeta não só as gerações atuais, mais principalmente as futuras (EULER *et al*., 2021).

Com a Eco-92, os avanços nos debates ganharam força o que resultou na Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática (UNFCCC – do inglês United Nations Framework Convention on Climate Change), um acordo de 192 países que estabeleceu objetivos de redução de emissões e algumas regras, e serviu de base para o Protocolo de Quioto em 1997 (EULER *et al*., 2021; TONETO *et al*., 2015; SOUZA *et al*., 2017), que entrou em vigor somente após 2005, onde os países-membros assumiram o compromisso de reduzir a emissão de GEE em, pelo menos, 5% em relação aos níveis de 1990 no período entre 2008 e 2012 (EULER *et al*., 2021), o que pode influenciar o crescimento nas pesquisas a partir do ano 2007 e 2012 mostrado na Figura 17.

Em 2016, a Figura 17 mostra um novo pico, podendo também ser influenciado pelo Acordo de Paris, que reafirmou o compromisso mundial para a adoção de políticas climáticas para a redução de emissão de gases de efeito estufa a partir de 2020 (SOUZA *et al*., 2017). Após isso, se observa um novo pico em 2019, supondo ser resultado da produção considerável de biocombustíveis, embora abaixo do período anterior devido à queda de preços dos biocombustíveis (OECD-FAO, 2020).

Uma queda esmagadora, visto na Figura 17, foi marcada em 2020, podendo ser influenciada pela pandemia COVID-19, em que com ela, a partir de outubro de 2021 o mundo experimentou impactos de uma grave crise global de energia (REN 21, 2023). Após a desaceleração da pandemia COVID-19, a crise energética foi ainda mais exacerbada em fevereiro de 2022 após a invasão da Ucrânia pela Federação Russa, onde os preços de energia na Europa e em outros lugares dispararam seus níveis mais altos desde 2008, e que os preços dos combustíveis fósseis foram responsáveis por 90% do aumento dos preços de eletricidade visto em 2022 (REN 21, 2023). Isso supõe o disparo nas oportunidades em pesquisas de indicadores de viabilidade com análises tecno-econômicas e ecoeficiência para energias renováveis a partir de 2021.

4.2 Resultados e Discussão da Revisão Sistemática

Os dados extraídos dos 10 artigos e revisões elegíveis para a revisão sistemática deste estudo são apresentados na Tabela 8. Para estabelecer uma avaliação qualitativa, os artigos foram analisados em seis tópicos: i) título, autores e ano de publicação; ii) objetivos; iii) aplicabilidade das análises; iv) metodologia de análise técnico-económica; v) metodologia de análise ecológica e vi) indicador de ecoeficiência.

Com a Tabela 8 foi possível observar que as análises de avaliação de tecno-econômicas, avaliação ambiental e de indicador de ecoeficiência podem ser exploradas para diversos assuntos e ramos da engenharia, com a finalidade de obter estudos comparativos e indicadores para a tomada de decisão em suas aplicações.

Abdeljaber, A., Adghim, M. *et al*. (2022), com o objetivo de realizar uma comparação com um sistema convencional de drenagem de tubos de águas pluviais, trouxeram em seu estudo uma interessante investigação do desempenho tecno-econômico e ambiental dos controles de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) aplicado às Células de Biorretenção (BC), como também em Trincheiras de Infiltração (IT) e por fim em Pavimento de Concentro Intertravado Permeável (PICP). Os resultados da análise do custo do ciclo de vida (LCA) indicaram que os controles de TI e BC tiveram os custos líquidos atuais mais baixos, com melhor eficiência ecológica e sendo as áreas com indicadores de ecoeficiência superiores, enquanto o PICP foi o menos ecoeficiente.

Abdeljaber, A., Zannerni, R. *et al*. (2022) trouxe mais uma pesquisa com a aplicação das técnicas de avaliação tecno-econômica, avaliação ambiental e por fim, a avalição de ecoeficiência para quantificar os custos ambientais incorporando a pegada de carbono e os resultados da análise do Custo do Ciclo de Vida (LCC). Neste estudo, Abdeljaber, A. (2022) enfatizou os potenciais benefícios ambientais e financeiros da incorporação de Tratamento Biológico Mecânico (MBT) e tecnologias de gaseificação em Estratégias Integradas de Gerencimento de Resíduos Sólidos Urbanos (ISWM), investigando sua viabilidade e realizando comparações com estratégias baseadas em incineração e Digestão Anaeróbia (AD). A análise técnica pôde revelar que a tecnologia de gaseificação teve a maior produção em energia, e que junto a MBT encontraram valores viáveis financeiramente e com maior indicador de ecoeficiência. Contudo, as técnicas MBT e AD se destacaram na avaliação ambiental de forma mais bem comparadas as técnicas de gaseificação e base de incineração.

Koh *et al*. (2021), a fim de determinar os impactos ambientais e econômicos de sistema híbrido de armazenamento de energia (HESS) combinando baterias de 1ª e 2ª vida e veículos elétricos a bateria, propôs a avaliação de circularidade de três níveis que incorpora a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA), Análise Tecno-Econômica e um Índice de Ecoeficiência, de toda a vida útil, de 43 tecno-hibridizações de quatro tecnologias de baterias de 1ª e 2ª vida; Titanato de Lítio (LTO), Ácido de Chumbo, Fosfato de Ferro de Lítio (FLP) e Íon de Sódio, com Veículos Elétricos a Bateria (BEV). Os resultados da avaliação do ciclo de vida e análise tecno-econômica mostra que uma configuração de sistema de armazenamento de energia híbrida contendo uma baixa proporção de Titânato de Lítio de 1ª vida e tecnologias de baterias de veículos elétricos com uma alta proporção de Titânato de Lítio de 2ª vida minimiza os impactos ambientais e econômicos, e dessa maneira obteve-se um alto indicador de ecoeficiência.

Mais uma vez a análise de indicador de ecoeficiência foi aplicada a fim de obter comparações viabilizar a tomada de decisão. Com isso, Zhang *et al*. (2021) aplicou a análise de ecoeficiência e a análise do Custo do Ciclo de Vida a fim de determinar o custo competitivo e os tijolos ecologicamente corretos, conhecidos como “tijolos ecoeficientes”. Este artigo explora que a substituição de tijolos convencionais por tijolos intertravados não apenas aumenta a eficiência da construção, mas também melhora o desempenho de ecoeficiência sem comprometer a integridade estrutural.

Tabela 8: Principais resultados e características dos artigos selecionados

Título (Autor, Ano)	Objetivo	Aplicabilidade das Análises	Metodologia da Análise Tecno-econômica	Metodologia da Análise Ecológica	Indicadores de Ecoeficiência
Desempenho comparativo e avaliação de ciclo de vida integrada de custos de controles de desenvolvimento de baixo impacto para o gerenciamento sustentável de águas pluviais (Abdeljaber, A., Adghim, M., Abdallah, M., 2022)	Investigar o desempenho techno-econômico e ambiental de vários controles de desenvolvimento de baixo impacto (LID): células de biorretenção (BC), trincheiras de infiltração (IT) e pavimento de concreto intertravado permeável (PICP) em comparação com um sistema convencional de drenagem de tubos de águas pluviais.	Gerenciamento de águas pluviais.	Technical Performance (Burnoff Reduction) / Análise do Custo do Ciclo de Vida (LCCA).	Análise do Ciclo de Vida (LCA).	A análise de ecoeficiência revelou que TI era a área mais eco-eficiente entre os sistemas LID, enquanto o PICP foi o menos ecoeficiente.
Análise de Ecoeficiência de Estratégias Integradas de Gestão de Resíduos Baseadas em Gaseificação e Tratamento Biológico Mecânico (Abdeljaber, A., Zannerni, R., Masoud, W., 2022)	Investigar a viabilidade de integrar tecnologias de gaseificação e tratamento biológico mecânico (MBT) em várias estratégias de gerenciamento de resíduos sólidos urbados (ISWM), em comparação com estratégias baseadas em incineração e digestão anaeróbica (AD).	Gerenciamento de resíduos sólidos urbados (ISWM)	Potencial de geração de energia (1ª Lei da Termodinâmica) / Análise do Custo do Ciclo de Vida (LCCA).	Análise do Ciclo de Vida (LCA).	A análise de ecoeficiência indicou que as estratégias MBT e gaseificação são as mais sustentáveis entre as estratégias examinadas.
Maior conteúdo de bateria de titanato de lítio de 2ª vida em sistemas híbridos de armazenamento de energia reduz o impacto econômico-ambiental e equilibra a ecoeficiência (Koh, S.C.L., Smith, L., Miah, J., 2021)	Avaliação de circularidade de três níveis que incorpora a Avaliação do Ciclo de Vida (LCA), Análise Techno Econômico e um Índice de Eco-Eficiência, do berço ao túmulo, de 43 tecno-hibridizações de quatro tecnologias de baterias de 1ª e 2ª vida; Titanato de Lítio (LTO), Ácido de Chumbo, Fosfato de Ferro de Lítio (FLP) e Íon de Sódio, com veículos elétricos a bateria (BEV).	Sistemas híbridos de armazenamento de energia combinando baterias de 1ª e 2ª vida e veículos elétricos a bateria.	Análise do Custo do Ciclo de Vida (LCCA).	Análise do Ciclo de Vida (LCA).	Os resultados mostram que uma configuração de sistema de armazenamento de energia híbrida contendo proporções iguais de tecnologias de bateria de titanato de lítio de 1ª e 2ª vida e BEV é a mais ecoeficiente.

Fonte: Elaborada pelos autores

Tabela 8: Principais resultados e características dos artigos selecionados (continuação)

Título (Autor, Ano)	Objetivo	Aplicabilidade das Análises	Metodologia da Análise Tecno-econômica	Metodologia da Análise Ecológica	Indicadores de Ecoeficiência
Desenvolvimento de tijolos ecoeficientes – Uma abordagem de avaliação do ciclo de vida (Zhang, X., Biswas, WK, 2021)	Este estudo tem como objetivo realizar uma análise de ecoeficiência para determinar o custo competitivo e os tijolos ecologicamente corretos, conhecidos como tijolos ecoeficientes.	Tijolos intertravados.	Teste de resistência à compressão e derivação de resistência à tração / Life Cycle Impact Assessment (LCIA).	Análise do Ciclo de Vida (LCA).	Os sistemas de energia híbrida contendo proporções iguais de tecnologias de bateria de titanato de lítio de 1ª e 2ª vida e BEV é a mais ecoeficiente.
Avaliação tecnoeconômica e ambiental de sistemas de gestão de águas residuais: Abordagem do ciclo de vida (Abdallah, M., Shanableh, A., Elshazly, D., 2020)	Realização uma avaliação comparativa dos três sistemas (sistema de tanque séptico e cisterna-STT, esgotos convencionais por gravidade-CGS, e sistema de esgotos de pequeno porte-SBS) junto com suas instalações de tratamento.	Gerenciamento de águas residuais.	Análise do Custo do Ciclo de Vida (LCCA).	Análise do Ciclo de Vida (LCA).	A avaliação de ecoeficiência revelou que a estratégia SBS foi a mais favorecida entre as estratégias examinadas.
Análise de ecoeficiência e tecnoeconômica para processos de fabricação de anidrido maleico (Mangili, P.V., Junqueira, P.G., Santos, L.S., 2019)	Comparação de dois processos de produção de anidrido maleico.A análise ambiental foi realizada por meio do método do Índice de Comparação de Ecoeficiência, e a economia dos processos, por sua vez, foi avaliada com base nas especificações dos equipamentos fornecidas.	Fabricação de Anidrido Maleico.	Estimatia do investimento de capital fixo (FCI) e despesas de produção e, posteriormente, realizada uma análise de fluxo de caixa.	Análise do Ciclo de Vida (LCA).	A rota do butano seria aproximadamente 35% mais ecoeficiente que a tecnologia do benzeno.
Avaliação tecnoeconômica e da pegada de carbono da produção de crotonato de metila e acrilato de metila a partir de polihidroxibutirato (PHB) à base de águas residuais (Fernández-Dacosta, C., Posada, J.A., Ramirez, A., 2016)	Este artigo avalia se uma produção mais limpa e sustentável dos componentes químicos metil crotonato (MC) e metil acrilato (MA) pode ser obtida em um processo inovador em que o consumo de recursos, a geração de resíduos e os impactos ambientais são minimizados pelo uso de polihidroxibutirato (PHB) produzidos a partir de águas residuais como matéria-prima.	Metil crotonato (MC) e metil acrilato (MA).	Análise sensitiva / Custos fixos (CAPEX) e Custos Variáveis (OPEX).	Avaliação de pegada de carbono.	Quando os co-produtos são vendidos, o PHB aquoso é a matéria-prima preferida para utilização na fabricação dos blocos de construção químicos MC e MA no fator de ecoeficiência.

Tabela 8: Principais resultados e características dos artigos selecionados (continuação)

Título (Autor, Ano)	Objetivo	Aplicabilidade das Análises	Metodologia da Análise Tecno-econômica	Metodologia da Análise Ecológica	Indicadores de Ecoeficiência
Avaliação de ecoeficiência de estações de tratamento de águas residuais usando um modelo de distância direcional de Russell ponderado (Molinos-Senante, M., Gémar, G., Gómez, T., 2016)	O modelo ponderado de distância direcional de Russell foi aplicado para avaliação da eco-eficiência de uma amostra de estações de tratamento de águas residuais reais (ETAR) a fim de obter um escore de ineficiência para cada variável envolvida no modelo e identificar os fatores que influenciam os escores de ineficiência previamente calculados.	Gerenciamento de águas residuais.	Estimatia do investimento de capital fixo (FCI) e despesas de produção e, posteriormente, realizada uma análise de fluxo de caixa.	Análise do Ciclo de Vida (LCA).	Os resultados mostraram que aproximadamente metade das instalações avaliadas tinham espaço significativo para melhorias em sua ecoeficiência.
Ecoeficiência da produção de arroz em casca no nordeste da Tailândia: uma comparação entre sistemas de cultivo de sequeiro e irrigação (Thanawong, K., Perret, S.R., Basset-Mens, C., 2014)	Implementação de uma abordagem conjunta de desempenhos tecno-econômicos e impactos ambientais em uma diversidade de sistemas de cultivo atuais classificados como sistemas de sequeiro de estação chuvosa (RW), irrigados de estação chuvosa (IW) e sistemas de irrigação de estação seca (ID).	Produção de arroz em casca.	Análise sensitiva / Custos fixos (CAPEX) e Custos Variáveis (OPEX).	Avaliação de pegada de carbono.	Os sistemas RW foram considerados mais ecoeficiente na maioria das categorias de impacto, incluindo o Potencial de Aquecimento Global.
Ecoeficiência da produção de arroz em casca no nordeste da Tailândia: uma comparação entre sistemas de cultivo de sequeiro e irrigação (Thanawong, K., Perret, S.R., Basset-Mens, C., 2014)	É apresentado estudo comparativo da ecoeficiência e as vantagens tecnoeconômicas de um processo contínuo envolvendo um novo reator intensificado contínuo denominado RAPTOR (Reactor with Polyvalent Rectilinear Stirred Reactor with Optimized Transfer) em comparação com um processo descontínuo clássico equipado com um reator agitado.	Novo reator intensificado contínuo denominado Raptor (Reactor with Polyvalent Rectilinear Stirred Reactor with Optimized Transfer).	Função de distância direcional combinada com uma abordagem data envelopment analysis não paramétrica / Custos fixos (CAPEX) e Custos Variáveis (OPEX).	Análise do Ciclo de Vida (LCA).	O resultado de ecoeficiência é persuasivo.

Com objetivo investigar a viabilidade econômica e a pegada ambiental de um sistema alternativo de gerenciamento de águas residuais em comparação com os sistemas de saneamento existentes, Abdallah *et al*. (2020) propôs uma avaliação comparativa dos três sistemas: sistema de tanque séptico e cisterna-STT, esgotos convencionais por gravidade-CGS, e sistema de esgotos de pequeno porte-SBS junto com suas instalações de tratamento foi conduzido em uma área residencial nos Emirados Árabes Unidos. O sistema SBS foi considerado uma melhoria prática em relação aos sistemas atuais, apresentando resultados de 45 e 36% mais econômico em comparação com os sistemas STT e CGS, respectivamente. Além disso, o sistema SBS se mostrou uma melhor alternativa com menores impactos ambientais em melhor indicador de ecoeficiência. Enquanto a estratégia STT foi a menos viável financeiramente, a CGS teve a maior pegada ambiental das estratégias examinadas.

Mangili *et al*. (2019) comparou dois processos de produção de anidrido maleico no que diz respeito à sua respectiva economia e desempenho ecológico. A análise ambiental realizada utilizou o método do Índice de Comparação de Ecoeficiência baseado em seis categorias de ecoindicadores e sete métricas de ciclo de vida. A economia dos processos, por sua vez, foi avaliada com base nas especificações dos equipamentos fornecidas pelos autores de referência e requisitos de utilidade fornecidos pela simulação. Os resultados mostraram que devido ao menor consumo de energia e custos de matéria-prima da tecnologia do butano, esta obteve um maior desempenho ambiental (aproximadamente 38% mais ecoeficiente) e rentabilidade (aproximadamente 72%) quando comparada à tecnologia do benzeno. Por fim, a rota do butano mostrou-se 35% mais ecoeficiente que a tecnologia do benzeno.

Fernández-Dacosta *et al*. (2016) avaliou a obtenção de resultados do indicador de ecoeficiência na aplicação de polihidroxibutirato (PHB), obtido das águas residuais, na produção de metil crotonato (MC) e metil acrilato (MA) com o objetivo de um menor consumo de recursos e a minimização da geração de resíduos e os impactos ambientais. Fernández-Dacosta, C. (2016) concluiu que o PHB aquoso é a matéria-prima preferida para utilização na fabricação dos blocos de construção químicos MC e MA, tanto em termos econômicos quanto de emissão de carbono.

O modelo ponderado de distância direcional de Russell foi aplicado para avaliação da ecoeficiência de uma amostra de estações de tratamento de águas residuais reais (ETAR) por Molinos-Senante *et al*. (2016). Além disso, seu estudo permitiu obter um escore de ineficiência para cada variável envolvida no modelo. Posteriormente, na segunda etapa de análise aplicada, com a finalidade de identificar os fatores que influenciam os escores de ineficiência previamente calculados, observou-se que as ETARs poderiam melhorar sua ecoeficiência reduzindo seus custos

operacionais e de manutenção e emissões de gases do efeito estufa ou aumentando sua eficiência de remoção de poluentes.

Thanawong *et al*. (2014) obteve em seus estudos uma comparação das vantagens da produção de arroz sob condições de irrigação e sequeiro. Indicadores de desempenho tecno-econômico foram combinados com indicadores de impacto ambiental baseados na avaliação do ciclo de vida, análises de uso de energia e água, de acordo com 3 sistemas de cultivo, ou seja, estação chuvosa de sequeiro (RW), estação chuvosa irrigada (IW) e seca sistemas irrigados por estação (ID). Os resultados mostraram que para atender a produção de arroz nas Filipinas na estação chuvosa e seca, os requisitos de energia devem ser de aproximadamente 12.000 MJ/ha e 15.000 MJ/há respectivamente (excluindo a força humana). Os resultados econômicos mostraram que as receitas líquidas resultantes são mais diversos (menos estáveis ao longo do tempo) nos sistemas RW e ID em comparação com os sistemas IW devido à falta de controle do abastecimento de água e à falta de água, respectivamente. Os sistemas RW presentaram os menores impactos ambientais por ha e por kg de arroz em casca produzido, sendo assim considerado o mais ecoeficiente na maioria das categorias apresentadas.

Por fim, Machefer, *et al*. (2013) apresentou um estudo comparativo num processo contínuo que envolve o RAPTOR (Reactor with Polyvalent Rectilinear Stirred Reactor with Optimized Transfer) em relação a um processo descontínuo clássico equipado com um reator agitado, em termos de indicadores de ecoeficiência e análise tecno-econômica. Em termos econômicos, apresentou custos reduzidos de 35 a 70% em comparação com o processo de lote de referência, com vantagens ambientais em comparação com microrreatores associados a uma menor necessidade de limpeza e uma maior vida útil, que de acordo com o autor, o indicador de ecoeficiência apresentado é persuasivo.

A metodologia de Análise do Custo do Ciclo de Vida (LCC) foi uma das ferramentas mais utilizadas para análise tecno-econômica nos estudos apresentados, e pode ser definida como uma ferramenta que determina a opção mais econômica de aquisição, operação, manutenção e descarte de um objeto ou um processo durante um período, auxiliando na tomada de decisões (Rebitzer G. et al., 2003). A Análise do Ciclo de Vida (LCA) também foi apresentada em vários desses estudos. Esta por sua vez é uma ferramenta que analisa de forma sistemática ao longo de todo o ciclo de vida o desempenho ambiental de produtos ou processos, e por essa razão, frequentemente é atribuída a abordagem “do berço ao túmulo” para avaliações de impactos ambientais. Esta pode incluir os processamentos na extração da matéria-prima, fabricação, utilização, descarte e reciclagem no fim da vida útil. Na avaliação do ciclo de vida, há

diferentes categorias de impactos ambientais, como mudanças climáticas, ecotoxidade, toxidade humana, formação de ozônio fotoquímico, acidificação, eutrofiração, esgotamento de recursos e uso da terra e destruição da camada de ozônio), no qual os impactos ambientais de vários fluxos de materiais e energia são atribuídos e calculados pelo fator de caracterização (Cabeza, et al, 2014).

Neste trabalho, foram utilizadas outras ferramentas que são aplicáveis nesse estudo a fim de se obter a viabilidade de operação da planta. Para a análise tecno-econômica, utilizou como metodologia dados extraídos de análise termodinâmica e a metodologia do LCOE que determina a viabilidade financeira de uma usina e compara a diferentes tecnologias de geração de energia (ROBERTS et al., 2016). Para a análise ambiental foi utilizado a Análise de Eficiência Ecológica proposto por (CARDU et al., 1999) que considera o potencial do impacto ecológico que gera a poluição do ar com relação a energia útil produzida durante a operação da planta.

4.3 Resultados e Discussão da Análise Técnica

De acordo com a potência predefinida exigida pelos painéis fotovoltaicos de 20 kW, com área de 2,21m^2, a irradiação local de 4800W/m^2, e rendimento considerado de 19,9%, o dimensionamento do sistema de painéis fotovoltaicos foi obtido com o número de módulos igual a 10, de acordo com a aplicação da Eq. (23).

A análise de energia foi realizada usando a primeira lei da termodinâmica para analisar a distribuição dos fluxos de energia no subsistema syngas. As propriedades químicas e físicas da biomassa, como alguns parâmetros do gaseificador, do trocador de calor e do motor do gerador, são cruciais para a realização da análise e permitem a análise do fluxo de ar e da massa do gás de síntese no processo de gaseificação e a combustão no motor do gerador, bem como o fluxo de massa dos gases de escape do motor do gerador. A Tabela 9 mostra o balanço de energia e massa para os casos analisados. De acordo com o catálogo da Pulita New Energy Technology Co., Ltd. (PULITA ENERGY, 2022), o gaseificador downdraft apresenta um consumo de matéria-prima constante considerando a capacidade nominal do sistema de gaseificação, em torno de 120 kg/h.

Tabela 9: Principais resultados da análise energética

Subsistema syngas				
Pontos	$\dot{m}$ (kg/h)	P (kPa)	T (ºC)	E (kW)
1	120,00	101,30	25	613,33
2	117,54	101,30	25	9,90
3	2,99	101,30	600	0,45
4	161,00	101,30	600	442,80
5	-	-	-	179,98
6	161,00	101,30	40	409,01
7	2,0	101,30	25	-
8	2,0	101,30	29	-
9	161,00	101,30	450	409,01
10	-	101,30	-	-
11	-	-	-	384,7
12	-	-	-	13,5

Fonte: Elaborada pelo autor

Os valores calculados a partir da análise de energia para o HRES syngas-solar dados pela primeira lei da termodinâmica são os seguintes: a potência fornecida pela biomassa foi calculada multiplicando sua vazão mássica pelo PCI do eucalipto com 613,33 kW de potência, obtendo 623,23 kW de energia na entrada do gaseificador, considerando a entrada de ar para a reação de combustão no gaseificador.

O potencial energético do gás de gaseificação e é igual a 442,80 kW, considerando uma produção dada pelo catálogo Pulita New Energy Technology Co.,Ltd. De 0,11069m^3/s e um gás de síntese de PCI de 4000 kJ/m^3. Como resultado do cálculo, a eficiência a frio do gaseificador é de 71%, considerando a energia gerada no gás de gaseificação e a potência fornecida pela biomassa e pelo ar na entrada do gaseificador. O valor de eficiência calculado para o gaseificador está de acordo com os valores encontrados na literatura para eficiência de 70 a 80% (ROBERTS *et al.*, 2016), mostrando que a potência fornecida pela biomassa e a energia produzida pelo gás de síntese estão em valores ótimos.

No trocador de calor há uma perda de potência térmica calculada em 33,77 kW devido a transferência de calor convectivo nos tubos concêntricos, absorvido pela água de resfriamento. Esse valor de perda é considerado necessários, pois o gás de síntese precisa perder energia térmica para estar na temperatura ideal de 40ºC na alimentação do motor de combustão interna. A água aumenta a sua temperatura para 29ºC, podendo ser utilizada nas torneiras e cozimento de alimento nas residências.

A potência fornecida pelo gás de síntese na entrada do motor gerador é igual a 409,01 kW. Finalmente, a eletricidade entregue ao ICEG é igual a 80 kW, considerando 10% de perdas devido ao atrito mecânico, 30% de perdas devido aos gases de exaustão, 35% de perdas para o ambiente e 5% de perdas por convecção. Esses cálculos foram realizados com a aplicação do balanço de energia baseado na primeira lei da termodinâmica. A Figura 18 mostra o diagrama de Sankey dos fluxos de energia para o fluxo para o subsistema syngas:

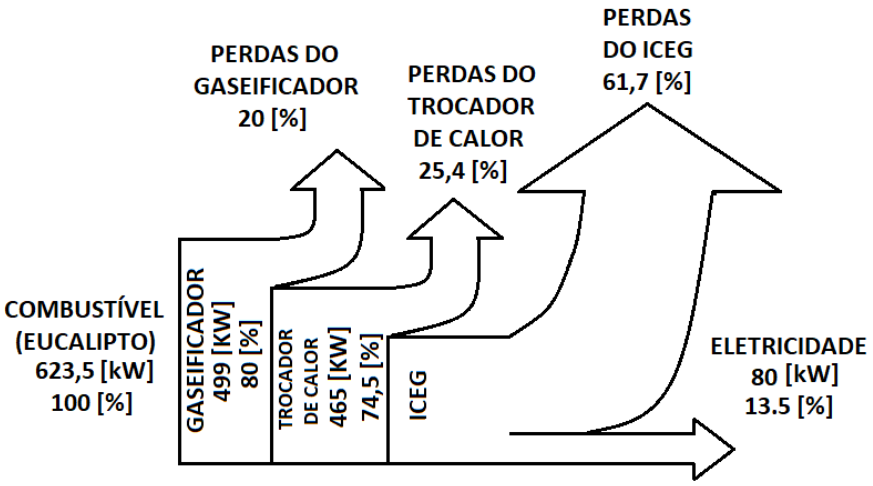


Fig.18 Diagrama de Sankey do subsistema syngas
Fonte: Elaborado pelo autor.

A potência fornecida pela radiação solar é de 1060,5 kW conforme a área de 2,21 m² e 10 de painéis fotovoltaicos e uma radiação solar local de 48000 W, com uma eficiência de 19,9%, a potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos é de 20 kW.

A Figura 19 mostra o diagrama de Sankey dos fluxos de energia para o fluxo para o subsistema solar PV.

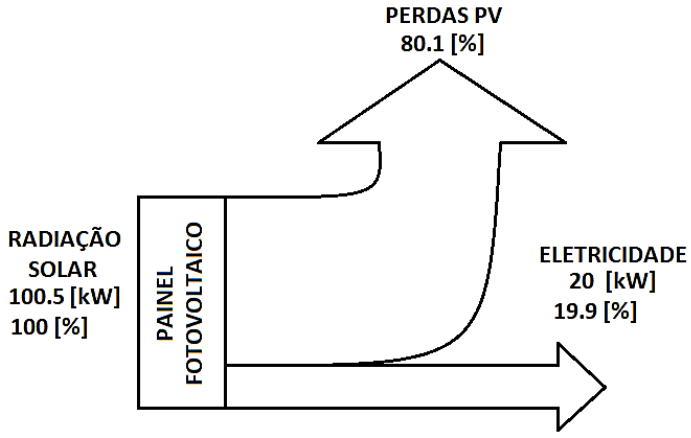


Fig.19 Diagrama de Sankey do subsistema solar PV
Fonte: Elaborado pelo autor.

As taxas de energia de cada corrente variam de acordo com a fonte de energia renovável utilizada.

O subsistema solar PV é composto por 10 módulos fotovoltaicos de Mono C-Si com capacidade instalada de 20 kW. A eficiência de conversão dos módulos fotovoltaicos depende de alguns fatores, como o tipo de material fotovoltaico e a eficiência de conversão das células (η =17-26%), que é de 19,9% no presente estudo, conforme mostrado na Figura 19. Segundo Comello *et al* (2018), as tecnologias de painéis fotovoltaicos tendem a se tornar mais atrativas no futuro devido ao desenvolvimento de novas tecnologias com melhor custo e desempenho.

O subsistema syngas tem um consumo de biomassa de 120 kg/h e produz cerca de 398 m^3/h de gás de síntese. A conversão termoquímica que ocorre no gaseificador transforma a energia contida na biomassa em energia física e química. As maiores perdas de energia nesta fase do subsistema devem-se aos resíduos sólidos (cinzas, alcatrão e outros) e às perdas de calor na parede do gaseificador, representando cerca de 20% da energia total (Figura 18). As maiores perdas deste subsistema são as perdas dos gases de escape para o gás de síntese queimado no ICEG, que representam 61,7%. No entanto, a eficiência geral do sistema é de cerca de 13,5%, que está dentro da faixa de 14% relatada na literatura (COME ZEBRA *et al*., 2021; MAZAHERI *et al*., 2019). Maiores detalhes constam na memória de cálculo no ANEXO I.

Os cálculos feitos neste estudo mostram que é técnica e energeticamente possível produzir eletricidade usando um gaseificador downdraft usando biomassa para produzir gás de síntese para alimentar um ICEG. No entanto, o uso de gás de síntese leva a perdas de potência do motor que podem variar entre 20 e 55%, principalmente em motores originalmente projetados para operar com gasolina ou gás natural (BOLOY, 2010). Essas perdas de potência do motor de saída estão relacionadas ao PCI do gás de síntese (HERRERO *et al*., 2017), que é cerca de 10 vezes menor que os combustíveis convencionais, a quantidade de mistura de combustível fornecida ao cilindro e o número de tempos de combustão em cada cilindro. tempo (número de rotações por minuto, rpm). Uma possível forma de reduzir as perdas é a implementação de um sistema de recuperação de calor residual, aumentando a eficiência total do sistema, conforme proposto no caso 2.

A Figura 20 mostra as eficiências globais para o caso 1 e o caso 2, em que para o caso 1 - HRES não considera a energia térmica recuperada, já o caso 2 - HRES considerando a energia térmica recuperada dos gases de exaustão e água em alta temperatura no trocador de calor:

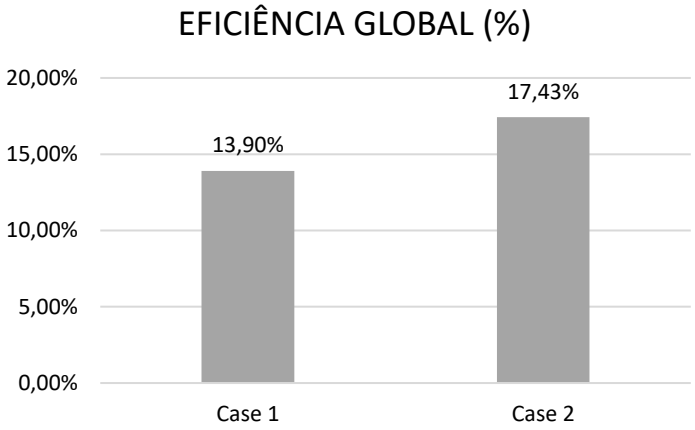


Fig. 20 Eficiência global para os dois casos considerados
Fonte: Elaborado pelo autor

A eficiência global do HRES syngas-solar no caso 1 foi de aproximadamente 13,90%, estando na faixa dos menores valores relatados na literatura e mostrados na introdução. Para o caso 2, em que há uma recuperação de 7% de a potência de exaustão e a potência térmica da água em alta temperatura no trocador de calor, obtendo um aumento de 27% em relação ao rendimento global para o caso 1, tendo um valor final de rendimento global de 17,43%, valor acima ao encontrado na literatura de 16,32% (MOUAKY *et al*., 2020). Maiores detalhes constam na memória de cálculo no ANEXO II.

4.4 Resultados e Discussão da Análise Econômica

A análise econômica neste estudo de viabilidade converte os fluxos de caixa e as receitas provenientes da produção de eletricidade a partir do HRES syngas-solar em indicadores econômicos, possibilitando visualizar a possibilidade ou não de implantação do sistema a partir dos resultados obtidos.

O custo total de investimento da usina (CI) mais 23% referente à instalação dos equipamentos é igual a US$ 138.645,60 (Maiores detalhes constam na memória de cálculo no ANEXO III). É possível identificar que a maior parte do investimento está a cargo do subsistema syngas, representando cerca de 66,88% do total. Apesar de um maior custo de investimento, o custo de produção de eletricidade para este subsistema é menor do que para a usina solar fotovoltaica (Tabela 10 a seguir).

Este fato pode ser explicado em favor do custo de produção de energia elétrica em um sistema que está relacionado às horas de funcionamento da usina. Ou seja, a intermitência característica do sistema solar fotovoltaico eleva o custo de produção de energia elétrica, enquanto o subsistema alimentado por gaseificação de biomassa opera

continuamente e pode entregar eletricidade a um custo mais acessível. No entanto, como ambas as tecnologias foram associadas em um HRES, o custo final de produção de eletricidade é compensado.

Tabela 10: Custo de produção de eletricidade para cada subsistema e para o HRES syngas-solar

Custo de produção de eletricidade	
$LCOE_g$	0,052 [US$/kWh]
$LCOE_{PV}$	0,178 [US$/kWh]
$LCOE_{HRES-caso1}$	0,059 [US$/kWh]
$LCOE_{HERS-caso2}$	0,045 [US$/kWh]

Fonte: Elaborado pelo autor

Estudos apresentados por AGYENIM *et al*. (2020) destacam que o custo de produção de eletricidade em um sistema híbrido (C_{el_HRES}) deve ser inferior a 0,16 US$/kWh para ser considerado viável. Enquanto o estado da arte mostra que um HRES syngas-solar encontra um custo de produção de eletricidade entre 0,049 e 0,799 US$/kWh. Os valores encontrados neste trabalho de 0,059 US$/kWh e 0,045 US$/kWh são relativamente inferiores aos encontrados na literatura e abaixo do informado pela IRENA 2020 (0,066 US$/kWh). Essa redução do custo nivelado de eletricidade se deve a redução de custos de produção com o aproveitamento dos resíduos do eucalipto da região como fonte de biomassa e matéria-prima para a produção de gás de síntese, já que o sistema fica em João Pinheiro, região que se destaca por ser a maior produtora de eucalipto do Brasil.

O caso 2, com geração de energia térmica e comercialização da energia excedente, apresentou valores de LCOE ainda menores. Mostrando-se como uma importante alternativa de acesso à energia limpa em comunidades rurais. Maiores detalhes constam na memória de cálculo no ANEXO IV e V.

Para estimar a viabilidade econômica considerando o VPL do HRES, que representa o lucro líquido (VPL>0) que o HRES pode atingir durante sua vida útil, o fluxo de caixa foi elaborado com base nas Eqs. (31), (32) e (33), seguindo os parâmetros mencionados na metodologia.

Portanto, a Tabela 11 mostra os resultados de VPL (Eq. (36)), TIR (Eq. (37)) e Payback (Eq. (38)) para o caso 1 e caso 2:

Tabela 11: Principais resultados da análise econômica

Indicadores de Viabilidade Econômica	
$VPL_{caso\ 1}$(10 anos)	74.578,19 [US$]
$VPL_{caso\ 2}$(10 anos)	142.478,63 [US$]
$TIR_{caso\ 1}$(10 anos)	24,07%
$TIR_{caso\ 2}$(10 anos)	33,96%
$Payback_{caso\ 1}$	5.14 [Anos]
$Payback_{caso\ 2}$	3.61 [Anos]

Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados obtidos a partir dos indicadores de viabilidade atendem aos requisitos da literatura (YARD *et al*., 2000), obtendo-se um VPL>0 e TIR>TMA (24,07%>12% e 33,96>12%).

Os resultados demonstram que o VPL ao longo da vida útil do HRES (10 anos) é estimado em US$ 74.578,19 para o caso 1 e US$ 142.478,63 para o caso 2, valores estes abaixo do encontrado na literatura e expressos no estado da arte variando de 3.000.000,00 a 34.806.000,00 US$. Além disso, o valor de TIR para o HRES proposto é de 24,07% para o caso 1 e 33,96% para o caso 2, bem próximo dos valores encontrados na liratura que variam de 15 a 30%. Os tempos de Payback para os casos 1 e 2 foram respectivamente: 5 anos e 2 meses e 3 anos e 8 meses, também próximos ou igual aos valores encontrados na literatura de 3 anos e 9 meses a 5 anos e 2 meses. Portanto, os valores obtidos de VPL, TIR e Payback mostram claramente que o investimento HRES proposto é economicamente viável e dentro do esperado para o aproveitamento energético do eucalipto e consequente geração híbrida de bioenergia, uma importante alternativa de acesso à energia limpa em comunidades remotas do Brasil. O caso 2 apresentou melhores resultados e menor retorno do investimento devido à produção de energia térmica e comercialização da energia excedente. Maiores detalhes constam na memória de cálculo no ANEXO VI, VII e VIII.

4.5 Resultados e Discussão da Análise Ecológica e Indicador de Ecoeficiência

O gás de síntese foi analisado através da simulação da instrução 30 no software GASEQ para avaliação dos indicadores de controle do gás. A Tabela 12 mostra os reagentes de simulação e as especificações do produto e os fatores de emissão do produto relacionados aos indicadores de aquecimento global e toxicidade humana que foram determinados por meio da Eq. (46). Maiores detalhes constam na memória de cálculo no ANEXO IX.

Tabela 12. Reagentes e produtos, e fatores de emissão de espécies da combustão do gás de síntese

Reagentes	N.º moles	Mol. peso	
CH_4	0,0094	16	
CO	0,1967	28	
CO_2	0,1014	44	
H_2	0,2489	2	
O_2	1.3520	32	
N_2	0,2416	28	
Produtos	N.º moles	Mol. peso	f_{specie}
CO_2	0,3004	44	1.2449
CH_4	1.193e $^{-18}$	16	1.7878e $^{-18}$
N_2O	5.861e $^{-08}$	44	2.4288e $^{-07}$
SO_2	0	64	0
NO_x	0,0012	30	0,0034
MP	-	12	-

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 13 apresenta os resultados de eficiência ecológica para cada valor de emissão de material particulado.

A partir disso, foram determinados os valores de $f_{CO2\,eq}$ e $f_{1.4DCB\,eq}$ por meio da aplicação Eqs. (42) e (43). Maiores detalhes constam na memória de cálculo no ANEXO IX.

Tabela 13: Eficiência ecológica, fatores de emissão e indicadores de poluição

	MP (kg/ kg_{syngas})			
	0,000010	0,000020	0,000030	0,000040
f_{MP} (kg/kg_{syngas})	1.1302e $^{-05}$	2.2604e $^{-05}$	3.3906e $^{-05}$	4.5208e $^{-05}$
f_{CO2_eq} ($kg_{CO2_eq}/kg_{combustível}$)	1.2449	1.2449	1.2449	1.2449
$f_{1.4\,DCB_eq}$ ($kg_{1,4DCB_eq}/kg_{combustível}$)	0,1927	0,1932	0,1936	0,1940
Π_{GW} (kg_{CO2_eq}/MJ)	0,2264	0,2264	0,2264	0,2264
Π_{HT} ($kg_{1,4DCB_eq}$/MJ)	0,0350	0,0351	0,0352	0,0353
Π_P (kg_{CO2}/MJ)	0,0844	0,0845	0,0845	0,0846
ε_{caso1} (%)	79.0782	79.0078	78.9974	78.9869
ε_{caso2} (%)	82.3953	82.3860	82.3768	82.3675

Fonte: Elaborado pelo autor

Como pode ser visto, os valores encontrados para f_{CO2_eq} são praticamente iguais ao fator f_{CO2} devido ao número de mols de CO_2 resultante de sua combustão, com valores desprezíveis de CH_4 e N_2O. Por outro lado, os valores encontrados para $f_{1.4_DCB\,eq}$ são relativamente baixos. É por causa do valor nulo do f_{S2O} produzido pela combustão do gás de síntese e do baixo valor do fator f_{N2O} produzido e baixos valores de f_{MP} considerados.

É notável que o aumento do valor do indicador de poluição corresponde a uma redução da eficiência ambiental, o que significa que para valores mais baixos de emissões de partículas no ICEG existem maiores resultados para a viabilidade ecológica do gás de síntese como tipo de combustível. Por fim, foi feita uma comparação entre a eficiência ecológica obtidas por Coronado *et al*. (2009) das eficiências ecológicas em motores de combustão interna alimentados por diferentes combustíveis (biodiesel B100, biodiesel B20, gasolina, gás natural, diesel) e os resultados obtidos por Madeira et al. (2021) para o hidrogênio e Lu et al. (2020) para o biogás e o syngas alimentado no ICEG deste trabalho, que pode ser observada na Figura 21.

Pode citar-se o estudo realizado por RONNEY et al. (2011), onde é proposto um sistema alimentado com syngas proveniente de biomassa de eucalipto, onde a eficiência ecológica (ε) de 80,70%, muito próxima da eficiência encontrada neste presente trabalho, com 0,01% de diferença.

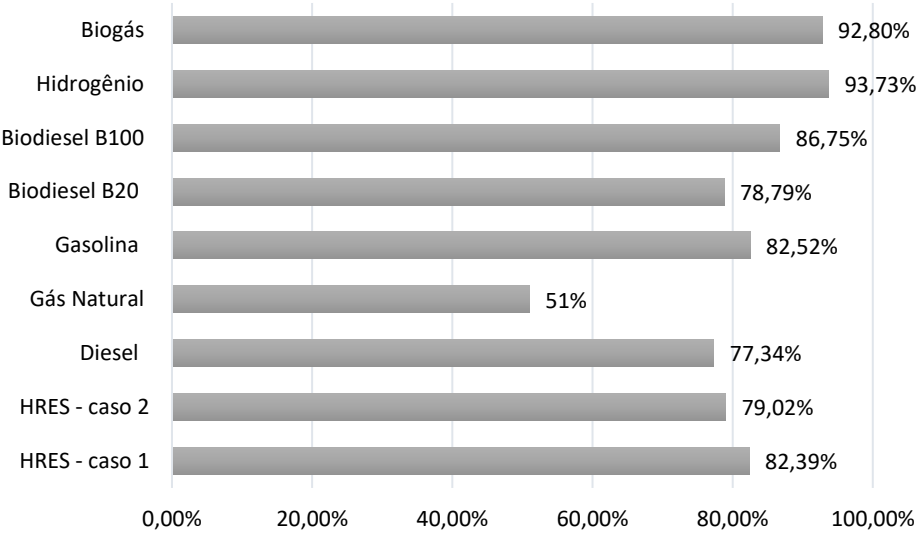


Fig. 21 Variação da eficiência ecológica em função do biogás, hidrogênio, biodiesel B100, biodiesel B20, gasolina, gás natural, diesel e syngas.
Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado mostrou que a queima do syngas tem melhor viabilidade ambiental do que a queima de combustíveis como diesel, gás natural e biodiesel B20. Esse fato se deve à queima de diesel, gás natural e biodiesel B20 no ICEG, que aumenta a emissão de gás carbônico e material particulado em relação à queima de syngas no ICEG.

Para o cálculo do indicador de ecoeficiência, considerou-se o valor de f_{CO2_eq} calculado (considerando apenas o numerador da Eq. (43) para se obter o Fator de

Emissão de Dióxido de Carbono em kg_{CO2_eq}). Também foi considerado os valores de VPL encontrado para os casos 1 e 2 mostrados na Tabela 10.

A Tabela 14 mostra a relação entre os recursos de ecoeficiência calculados que podem ser usados para identificar o melhor cenário (Maiores detalhes constam na memória de cálculo no ANEXO IX):

Tabela 14: A ecoeficiência dos casos 1 e 2 para o HRES syngas-solar

	Caso 1	Caso 2
EE (US$/$kg_{CO2_eq}$)	$5{,}64e^{03}$	$10{,}78e^{03}$

Fonte: Elaborado pelo autor

Quando aplicado, um maior valor de ecoeficiência deve ser considerado mais eficiente tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. Ou seja, quanto maior o indicador da ecoeficiência, melhor o desempenho. O caso 2 obteve melhor indicador de ecoeficiência pois tem maior valor de VPL quando comparado ao caso1.

Considerações Finais

A expansão dos Sistemas Híbridos de Energia Renovável (HRES) para atender aos ODS tornou a geração de bioenergia uma solução promissora para comunidades rurais isoladas sem acesso à energia elétrica da rede convencional. Este estudo explora oportunidades para a adoção de tecnologias de biomassa e solares de forma híbrida, considerando fatores energéticos, econômicos e ecológicos. O estudo de caso foi aplicado em João Pinheiro - Minas Gerais, Brasil, aproveitando sua produção de eucalipto para reduzir custos de processamento de resíduos de biomassa.

A análise técnico-económica determinou a eficiência energética e económica mais adequada para a tecnologia HRES syngas-solar comparando o Caso 1 (sem considerar a energia térmica) e o Caso 2 (considerando a recuperação de energia térmica). A análise econômica revelou custos competitivos e satisfatórios, especialmente pela associação da energia solar fotovoltaica à usina de biomassa, que reduziu os custos de produção de energia elétrica. O LCOE calculado apresentou valores de 0,059 US$/kWh para o caso 1 e 0,045 US$/kWh para o caso 2, ambos abaixo do valor fornecido pela IRENA e dos dados apresentados na literatura, tornando-se economicamente atrativo. A análise ecológica comparou a eficiência ecológica entre a queima de gás de síntese e a queima de combustíveis fósseis no ICEG. A combustão do Syngas apresentou melhor eficiência ecológica (79% para o caso 1 e 82% para o caso 2) do que a queima de combustíveis como diesel e biodiesel B20, minimizando os níveis de enxofre na atmosfera com sua substituição.

O indicador de ecoeficiência proporcionou uma visão abrangente do desempenho ambiental e económico, favorecendo o caso 2 com o valor maior de $10{,}78e^{03}$ US$/kg$CO_2$eq, uma vez que o indicador de ecoeficiência mais alto indica um maior retorno económico a menor impacto ambiental, e assim afirma a viabilidade e implementação da central de produção de eletricidade.

Em conclusão, a proposta HRES biomassa-solar é uma tecnologia viável e eficiente que satisfaz as necessidades energéticas da região através de recursos renováveis disponíveis localmente. Contudo, para aplicação em outras localidades, será necessário refazer os cálculos de viabilidade, considerando a disponibilidade de recursos de biomassa, custos operacionais e impactos ambientais associados, como também a demanda do novo caso.

Para futuros trabalhos, será considerado diferentes comunidades isoladas sem acesso à eletricidade como também diferentes tipos de biomassa dispostas localmente. para o estudo de caso.

Referências

ABDALLAH, M., SHANABLEH, A., ELSHAZLY, D., FEROZ, S. Techno-economic and environmental assessment of wastewater management systems: Life cycle approach. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 82, p. 106378 (2020).

ABDELJABER, A., ADGHIM, M., ABDALLAH, M., GHANIMA, R., ALJASSEM, F.: Comparative performance and cost-integrated life cycle assessment of low impact development controls for sustainable stormwater management. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 95,p. 106805 (2022).

ABDELJABER, A., ZANNERNI, R., MASOUD, W., ABDALLAH, M., ROCHA-MENESES, L.: Eco-Efficiency Analysis of Integrated Waste Management Strategies Based on Gasification and Mechanical Biological Treatment. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14 (7), p. 3899 (2022).

ADEDOJA, OS; SADIKU, ER; HAMAM, Y.: A techno-economic assessment of the viability of a photovoltaic-wind-battery storage-hydrogen energy system for electrifying primary healthcare centre in Sub-Saharan Africa. **Energy Conversion and Management: X**, v.23, p.100643 (2024).

ADITYA, I.A., SIMAREMARE, A. Techno-economic assessment of a hybrid solar PV/syngas/battery power system for off-grid application: Long Pahangai-Indonesia case study. **Journal of Physics: Conference Series**, 2193(1), 012001 (2022).

AGYENIM, F., B.: Powering communities using hybrid solar–biogas in Ghana, a feasibility study. **Environmental Technology and Innovation** 19, 100837 (2020).

ANGONESE, A., R., ET AL.: Energy efficiency of swine production system with biodigestor waste treatment. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 745–750 (2006).

ANUKAM, A., MAMPHWELI, S., P. REDDY.: Pre-Processing of Sugarcane Bagasse for Gasification in a Downdraft Biomass Gasifier System: A Comprehensive Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 66, p. 775-801 (2016).

ANVARI, S. AND KHALILARYA, S.: Exergoeconomic and environmental analysis of a novel configuration of solar-biomass hybrid power generation system. **Energy**, v. 165, p. 776-789 (2018).

ANVARI, S., KHALILARYA, S.: Power generation enhancement in a biomass-based combined cycle using solar energy: Thermodynamic and environmental analysis. **Applied Thermal Engineering**, v. 153, p. 128-141 (2019).

ARABKOOHSAR, A., SADI, M.: Thermodynamics, economic and environmental analyses of a hybrid waste–solar thermal power plant**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 144 (3), p. 917-940 (2021).

ASSIS, R.: Engenharia Econômica com o Excel: Casos de apoio à decisão. **Editora Lidel**, Lisboa, Portugal (2021).

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>. Acessp em: julho de 2024.

BANCO MUNDIAL**.** Disponível em: https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview#1. Acesso em: dezembro de 2022.

BARBIERES, JC et al.: Taxa interna de retorno: controvérsias e interpretadas. **Gepros**, v. 0 (4), p. 131 (2007).

BERTASINI, D., BATTISTA, F., RIZZIOLI, F., et al. Decarbonization of the European natural gas grid using hydrogen and methane biologically produced from organic waste: A critical overview. **Renewable Energy**, v. 206, p. 386–396 (2023).

BHATTACHARYYA SC.: Energy access problem of the poor in India: Is rural electrification a remedy? **Energy Policy**, v. 34 (18), p. 3387-3397 (2006).

BOLOY, R., A., M., SILVEIRA, J., L., TUNA, C., E.: Ecological impacts from syngas burning in internal combustion engine: Technical and economic aspects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 5194– 5201 (2011).

BOLOY, R., A., M.: Simulação Computacional de Gaseificação de Madeira de Pequeno Porte Empregando um Gaseificador Downdraft. **M.Sc. Dissertação. Universidade Estadual Paulista**, Guaratinguetá, (2010).

BOULAKHBAR, M., LEBROUHI, B., KOUSKSOU, T., (...), MAAROUFI, M., ZAZI, M.: Towards a large-scale integration of renewable energies in Morocco. **Journal of Energy Storage**, v. 32, p.101806 (2020).

CABEZA, L.F., RINCÓN, L., VILARIÑO, V., PÉREZ, G., CASTELL, A. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 29, p. 394-416, 2014.

CANDELISE, C., WINSKEL, M., GROSS, R.J.K.: The dynamics of solar PV costs and prices as a challenge for technology forecasting. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 26, p. 96–107 (2013).

CARDU, M., BAICA, M.: Regarding a new variant methodology to estimate globally the ecologic impact of thermopower plants. **Energy Conversion Management**, v. 40, p. 1569–1575 (1999).

CARNEIRO, MLNM; Gomes, MSP Energy, exergy, environmental and economic analysis of hybrid waste-to-energy plants. **Energy Conversion and Management**, v. 179, p. 397–417 (2019).

CHAVES, L.I., SILVA, M. J., et al.: Small-Cale Power Generation Analysis: Downdraft Gasifier Coupled to Engine Generator Set. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p.491- 498 (2016).

CHAVES, Y. A. DE O.: Análise de Viabilidade de um Sistema Híbrido alimentado por Biogás e Energia Solar. **Instituto Politécnico de Bragança (IPB)**, Portugal, 93 (2020).

CHAVES, Y., A., DE O., SPRINGER, M., V., BOLOY, R., A., M.: Performance Study of a Microturbine System for Cogeneration Application Using Biogas from Manipueira. **Bioenergy Research**, v. 13 (2020).

CODATO, A. Utilizando citações para além do fator de impacto: uma alternativa para determinar topografias científicas. **Conference: Reunião da Rede SciELO**, p. 1 (2018).

COME ZEBRA, E.I., VAN DER WINDT, H.J., NHUMAIO, G., FAAIJ, A.P.C.: A review of hybrid renewable energy systems in mini-grids for off-grid electrification in developing countries. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 144, p. 111036 (2021).

COMELLO, S., REICHELSTEIN, S., SAHOO, A.: The road ahead for solar PV power. **Sustainable Energy Reviews**, v. 92, p. 744–756 (2018).

COPA, J., R., TUNA, C., E., SILVEIRA, JL, BOLOY, R., A., M.: Techno-Economic Assessment of the Use of Syngas Generated from Biomass to Feed an Internal Combustion Engine. **Energies**, v. 13, p. 3097 (2020).

CORDEIRO, M. P.: Bibliometry and Social Network Analysis: **Methodological Possibilities for a Social Psychology of Science**. v. 2, n. 1, p. 23–33 (2000).

CORONADO, C. R., CARVALHO, J. A., YOSHIOKA, J. T., and SILVEIRA, J. L.: Determination of ecological efficiency in internal combustion engines: The use of biodiesel. Appl. **Therm**. Eng., v. 29, no. 10, p. 1887–1892 (2009).

ÇENGEL YA, BOLES MA: **Termodinâmica, 7a ed.** MC Graw Hill, CETESB (2013).

EDREIS, E., PETROV, A.: Types of heat exchangers in industry, their advantages and disadvantages, and the study of their parameters. IOP Conf. Series: **Materials Science and Engineering** 963, 012027 (2020).

EPE, 2023. Anuário Estatístico de Energia Elétrica (2024).

EULER, A. M. C.: O Acordo De Paris E O Futuro Do REDD+ No Brasil. Cadernos Adenauer Xvii (2016) nº2. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/149489/1/CPAF-AP-2016 Acordo-de-Paris.pdf.> Acesso em 2022.

FACCIO, M., GAMBERI, M., BORTOLINI, M., NEDAEI, M.: State-of-art review of the optimization methods to design the configuration of hybrid renewable energy systems (HRESs). **Frontiers In Energy**, v.12 (4), p. 591-622 (2018).

FAO FORESTRY PAPER 72: Wood Gas as Engine Fuel, Food and Agriculture, Organization of the United Nations. **ISBN: 92-5-102436-7**, p. 125 (1968).

FERNÁNDEZ-DACOSTA, C., POSADA, J.A., RAMIREZ, A.: Techno-economic and carbon footprint assessment of methyl crotonate and methyl acrylate production from wastewater-based polyhydroxybutyrate (PHB). **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 942-952 (2016).

FREITAS, K., T., SOUZA, R., C., R., SEYE, O.: Custo de geração de energia elétrica em comunidade básica no Amazonas: Estudo preliminar do projeto NERAM. **Revista Brasileira de Energia**, v. 12 (2006).

GALVÃO, M. C. B.: RICARTE, I. L. M. Revisão Sistemática da Literatura: Conceituação, Produção e Publicação. **Filosofia da Informação**, v. 6, n. 1, p. 57–73 (2019).

GARBA, A., KISHK, M.: Economic Assessment of Biomass Gasification Technology in Providing Sustainable Electricity in Nigerian Rural Areas. **Proceedings of the international sustainable ecological engineering design for society (SEEDS) conference**, UK, p. 17-18 (2015).

GASPAR, LMR et al.: Economic and financial feasibility of final disposal system of sewage sludge. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, v. 12 (2), p. 541–555 (2019).

GBADAMOSI, SL, NWULU, NI.: Optimal power dispatch and reliability analysis of hybrid CHP-PV-Wind systems in farming applications. **Sustainability**, v. 12, p. 8199 (2020).

GHEEWALA, SH.: Biorefineries for Sustainable Food-Fuel-Fibre Production: Towards a Circular Economy. **E3S Web of Conferences**, v. 125, p. 01002 (2019).

HASLER, P.; NUSSBAUMER,TH: Gas cleaning for IC engine application from fixed bed bimass gasification , Biomass and Bioenergy, vol 16, pp. 385-395, 1999.

HERRERO, S.J.: Projecto de generador syngas estático para la produccion de electricidad. Projeto 3º ano – **Engenharia de Energia Renováveis** (2017).

HOSSEINI DEHSHIRI, S.J.; AMIRI, M.; MOSTAFAEIPOUR, A.; LE, T.: Evaluation of renewable energy projects based on sustainability goals using a hybrid pythagorean fuzzy-based decision approach. **Energy**, v.297, p.131272 (2024).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022).

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2023).

INSTRU, O., RFB, N.; Mar, DE: Instrução Normativa RFB No 1700, 1–138 (2021).

IRENA, 2023: Global Landscape of Renewable Energy Finance (2023).

ISMAIL, MS, MOGHAVVEMI, M., MAHLIA, TMI, MUTTAQI, KM: Effective utilization of excess energy in standalone hybrid renewable energy systems for improving comfort ability and reducing cost of energy: a review and analysis. **Renew Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 726–34 (2015).

JÚNIOR, L., ANTONIO, B., RIGO, C. M., ET. AL. Financial administration: principles, fundamentals and labor practices. **Elsevier** (2005).

KOH, S.C.L., SMITH, L., MIAH, J., (...), BROWN, S., STONE, D.: Higher 2nd life Lithium Titanate battery content in hybrid energy storage systems lowers environmental-economic impact and balances eco-efficiency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 152,p. 111704 (2021).

LANDAU, E., C., SILVA, G., A., MOURA, L.: (ED.).: Dinâmica da produção agropecuária e da paisagem natural no Brasil nas últimas décadas: produtos de origem animal e da silvicultura. Brasília, **DF: Embrapa**, v. 3 (44), p. 1435-1500 (2020).

LASSALLE, JM., MARTÍNEZ, DF, FERNÁNDEZ, LV.: Optimisation of hybrid renewable energy systems on islands: A review. **Island Studies Journal**, v. 17 (1), p. 221-242 (2021).

LIAN, J., ZHANG, Y., MA, C., YANG, Y., CHAIMA, E.: A review on recent sizing methodologies of hybrid renewable energy systems. **Energy Conversion and Management**, v. 199, p. 112027 (2019).

MACHEFER, S., FALK, L., DE PANTHOU, F.: Intensification principle of a new three-phase catalytic slurry reactor. Part I: Performance characterisation. Chemical Engineering and Processing: **Process Intensification**, v. 70, p. 277-288 (2013).

MADEIRA, J.G.F., OLIVEIRA, E.M., SPRINGER, et al. Hydrogen production from swine manure biogas via steam reforming of methane (SRM) and water gas shift (WGS): A ecological, technical, and economic analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, 46(13), pp. 8961-8971 (2021).

MAHAPATRA, S., DASAPPA, S.: Rural electrification: Optimising the choice between decentralised renewable energy sources and grid extension. **Energy for Sustainable Development**, v. 16, p. 146–154 (2012).

MANGILI, P.V., JUNQUEIRA, P.G., SANTOS, L.S., PRATA, D.M. Eco-efficiency and techno-economic analysis for maleic anhydride manufacturing processes. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 21(5), p. 1073-1090 (2019).

MARDANI, A. ET AL.: A review of multi-criteria decision-making applications to solve energy management problems: Two decades from 1995 to 2015. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 216–256 (2017).

MARTINS, J. Motores De Combustão Interna, **Publindústria – Edições Técnicas**, 2a edição. Porto, 2006.

MAZAHERI, N.; AKBARZADEH, A.H.; Systematic Review of Research Guidelines for Numerical Simulation of Biomass Gasification for Bioenergy Production. **Energy Conversion and Management**, v. 183, p. 671-688 (2019).

MEMON, SA AND PATEL, RN. An overview of optimization techniques used for sizing of hybrid renewable energy systems. **Renewable Energy Focus** 39, pp.1-26 (2021).

MOLINOS-SENANTE, M., GÉMAR, G., GÓMEZ, T., CABALLERO, R., SALA-GARRIDO, R.: Eco-efficiency assessment of wastewater treatment plants using a weighted Russell directional distance model. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 1066-1075 (2016).

MONTEIRO M. P. V.: Combustão de biomassa e tratamento de efluentes gasosos, Projeto final de curso. **Instituto Politécnico da Guarda**, p. 101 (2010).

MOUAKY, A., RACHEK, A.: Thermodynamic and thermo-economic assessment of a hybrid solar/biomass polygeneration system under the semi-arid climate conditions. 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS). **Renewable Energy**, v. 156, p. 14-30 (2020).

NAÇÕES UNIDAS. (2015). Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável (A/RES/70/1). Disponível em: https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld. Acesso em: dezembro de 2022.

NEO SOLAR. Disponível em: <https://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/controlador-de-carga-solar>. Acesso em março de 2023.

NOGUEIRA, L.A. H., E.E.S. Lora; **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações**, 2ª ed. Rio de Janeiro, Interciência, 2003.

NOUNI, MR, MULLICK, SC.: Providing electricity access to remote areas in India: An approach towards identifying potential areas for decentralized electricity supply. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, p. 1187–1220 (2008).

OBEIDAT, F.: A comprehensive review of future photovoltaic systems. **Solar Energy**, v. 163, p. 545–551 (2018).

OECD-FAO; Agricultural Outlook 2020-2029. **Biofuels FAO, Rome/OECD Publishing**, Paris, p. 196-207 (2020).

OLIVEIRA, A. S. A.: Liderança Dos Países Desenvolvidos No Acordo De Paris: Reflexões Sobre A Estratégia Do Naming And Shaming Dentro Do Balanço-Global. **Sequência (Florianópolis)**, p.155-180 (2019).

PARKS, SA et al.: Energy, exergy, environmental and economic analysis of hybrid waste-to-energy plants. **Energy Conversion and Management**, v. 179, p. 397–417 (2019).

PANTALEO, AM, CAMPOREALE, SM, MILIOZZI, A.: Novel hybrid CSP-biomass CHP for flexible generation: Thermo-economic analysis and profitability assessment. **Applied Energy**, v. 204, p. 994–1006 (2017).

PANTALEO, AM, CAMPOREALE, SM, SORRENTINO, A.: Hybrid solar-biomass combined Brayton/organic Rankine-cycle plants integrated with thermal storage: Techno-economic feasibility in selected Mediterranean areas. **Renewable Energy**, v. 147, p. 2913-2931 (2020).

RABAIA, M.K.H., ABDELKAREEM, M.A., SAYED, E.T.: Environmental impacts of solar energy systems: **A review. Science of the Total Environment**, v. 754, p. 141989 (2021).

RANKIN OF TARIFFS. ANEEL, 2021. Available at: <https://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>. Accessed on March 2, 2021.

REBITZER, G., EKVALL, T., FRISCHKNECHT, R., WEIDEMA, B.P., PENNINGTON, D.W. Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. **Environment International**, 30(5), p. 701–720, 2004.

REICHELSTEIN, S., YORSTON, M.: The prospects for cost competitive solar PV power. **Energy Policy**, v. 55, p. 117–127 (2013).

REN 21: Renewables Global Status Report (2021).

REN 21: Renewables Global Status Report (2023).

ROBERTS, J., J.: Performance Analysis of a Solar-Wind-Diesel Hybrid Power Generation System Considering Probabilistic Variations of the Load and the Renewable Resources. São Paulo, (2016).

ROMAN, J. A preliminary techno-economic analysis of the potential of using municipal waste gasification installations in a hybrid electricity generation system. **Polityka Energetyczna**, 25(4), pp. 55–72 (2022).

SAHU, B., K.: A study on global solar PV energy developments and policies with special focus on the top ten solar PV power producing countries. **Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 621–634 (2015).

SAIDI, K., OMRI, A.: The impact of renewable energy on carbon emissions and economic growth in 15 major renewable energy-consuming countries. **Environmental Research**, v. 186, p. 109567 (2020).

SAMPAIO, P., G., V., GONZÁLEZ, M., O., A.: Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. **Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 590–601 (2017).

SANSANIWAL, S.K., SHARMA, V., MATHUR, J.: Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1576-1601 (2018).

SARKIS, RB., ZARE, V.: Proposal and analysis of two novel integrated configurations for hybrid solar-biomass power generation systems: Thermodynamic and economic evaluation. **Energy Conversion and Management**, v. 160, p. 411-425 (2018).

SAUVE, G., ESGUERRA, J.L., LANER, D., VAN PASSEL, S., VAN ACKER, K.: Integrated early-stage environmental and economic assessment of emerging technologies and its applicability to the case of plasma gasification. **Journal of Cleaner Production**, 382, 134684 (2023).

SILVEIRA, JL ET AL.: Ecological efficiency and thermoeconomic analysis of a cogeneration system at a hospital. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 2894–2906 (2012).

SOARES, LO, MORAES, DR, CALLEJO, LH, BOLOY, RAM: Energy-ecological efficiency of dual-fuel series plug-in hybrid electric vehicle considering WTW emissions. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, p. 74346–74364 (2022).

SOARES, P. B. ET AL.: Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre Tecnologia de Construção e Edificações na base de dados Web of Science. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 175–185 (2016).

SOUZA, M. C.O.; CORAZZA, R. I.; Do Protocolo Kyoto Ao Acordo De Paris: Uma Análise Das Mudanças No Regime Climático Global A Partir Do Estudo Da Evolução De Perfis De Emissões De Gases De Efeito Estufa. **Desenvolvimento do Meio Ambiente**, p. 52-80 (2017).

SPROUSE III, C., DEPICK, C.: Review of organic Rankine cycles for internal combustion engine exhaust waste heat recovery. **Applied Thermal Engineering**, v. 51, p. 711-722 (2013).

SUSASTRIAWAN, A.A.P., SAPTOADI, H.; Small-Scale Downdraft Gasifiers for Biomass Gasification: A Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 76, p. 989-1003 (2017).

TAMOOR M., TAHIR, MS, SAGIR, M.: Projeto de sistema integrado de geração de energia de 3 kW a partir de energia solar e biogás. **Int. J. Hydrogen Energy**, v. 45, p. 12711–12720 (2020).

THANAWONG, K., PERRET, S.R., BASSET-MENS, C.: Eco-efficiency of paddy rice production in Northeastern Thailand: A comparison of rain-fed and irrigated cropping systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 73, p. 204-217 (2014).

THOPIL, G.A., SACHSE, C.E., LALK, J., THOPIL, M.S.: Techno-economic performance comparison of crystalline and thin film PV panels under varying meteorological conditions: A high solar resource southern hemisphere case. **Applied Energy**, v. 275, p. 115041 (2020).

TONETO J. R.; PINHO, M.; SILAN, B.; Economia De Baixo Carbono: Impactos De Novos Marcos Regulatórios E Tecnologias Sobre A Economia Brasileira. Ribeirão Preto, SP: **FUNPEC Editora** (2015).

URBAN, F., GEALL, S., WANG, Y.: Solar PV and solar water heaters in China: Different pathways to low carbon energy. **Sustainable Energy Reviews**, v. 64, p. 531–542 (2016).

USINA PULITA ENERGY BIOMASS GASIFIERS. Disponível em: <http://www.pulitaenergy.com/en/pd.jsp?id=15>, Acesso em dezembro de 2022.

VALE D'AVILA, J. ET AL.: Economic and financial feasibility of final disposal system of sewage sludge. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, v. 12 (2), p. 541–555 (2019).

VERFAILLIE, H.A., BIDWELL, R.: Measuring eco-efficiency – A guide to reporting company performance. World Business Council of Sustainable Development. 2000, p. 25. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gdrc.org/sustbiz/measuring.pdf> Acesso em julho de 2024.

WILLIAMS, NJ, JARAMILLO, P., TANEJA, J.: Enabling private sector investment in microgrid-based rural electrification in developing countries: a review. **Renew Sustainable Energy Review**, v. 52, p.1268–1281 (2015).

XUE, K., LI, J., CHEN, H., XU, G., LIU, T.: Development of a novel power generation system based on the co-combustion of agriculture biomass and sludge integrated with solar-aided sludge drying. **Energy Conversion and Management**, v. 253, p. 115185 (2022).

YARD, S.: Developments of the payback method. **International Journal of Production Economics**, v. 67 (2), p. 155–167 (2000).

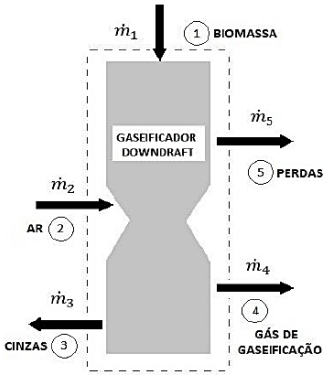
ZANATTA, D.; NETO, RM: Algumas considerações sobre o planejamento tributário: uma comparação por meio de simulação entre o Simples, o Lucro Presumido e o Lucro Real. **Revista de Ciências Gerenciais**, v. 10 (12), p. 16–24 (2006).

ZHANG, C., SUN, J., LUBELL, M.: Design and simulation of a novel hybrid solar-biomass energy supply system in northwest China. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, p. 1221-1239 (2019).

ZHANG, X., BISWAS, W.K.: Development of eco-efficient bricks – A life cycle assessment approach. **Journal of Building Engineering**, v. 42, p. 102429, 2021.

ANEXO I – MEMÓRIA DE CÁLCULO DO BALANÇO DE ENERGIA

BALANÇO ENERGÉTICO NO GASEIFICADOR



1 $\dot{Q}_{bio} = \dot{m}_{bio} \times PCI_{bio}$

$\dot{m}_{bio}$	0,03333	[kg/s]
PCI_{bio}	18400	[kJ/kg]
$\dot{Q}_{bio}$	**613,33**	[kW]

2 $\dot{Q}_{ar} = \dot{m}_{ar} \sum_{1}^{j} w_j \, x \, Cp_j (T - T_0)$

$\dot{m}_{ar}$	0,03265	[kg/s]
Cp_{ar}	1,005	[kJ/kgK]
T_0	25+273	[K]
T	600+273	[K]
$\dot{Q}_{ar}$	**9,90**	[kW]

3 $\dot{Q}_{cinzas} = \dot{m}_{cinzas} \times h_{cinzas}$

$\dot{m}_{cinzas}$	0,00083	[kg/s]
h_{cinzas}	538,43	[kJ/kg]
$\dot{Q}_{cinzas}$	**0,45**	[kW]

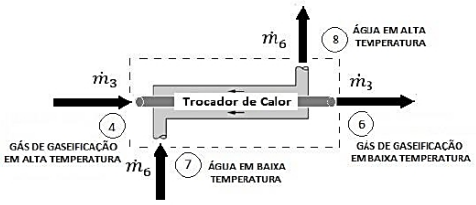
4 $\dot{Q}_{gás} = \dot{m}_{gás} \times PCI_{gás}$

$\dot{m}_{gás}$	0,11069	[m3/s]
$PCI_{gás}$	4000	[kJ/m3]
$\dot{Q}_{gás}$	**442,80**	[kW]

5 $\dot{Q}_{bio} + \dot{Q}_{ar} = \dot{Q}_{gás} + \dot{Q}_{cinzas} + \dot{Q}_{perdas}$

$\dot{Q}_{perdas}$	**179,98**	[kW]

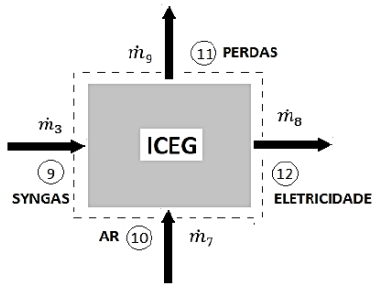
BALANÇO ENERGÉTICO NO TROCADOR DE CALOR



8 $\dot{Q}_{H2O} = \dot{m}_{gás} \times Cp_{gás} (T - T_0)$

$\dot{m}_{gás}$	0,04472	[kg/s]
$Cp_{gás}$	1,34917	[kJ/kgK]
T_0	600+273	[K]
T	40+273	[K]
$\dot{Q}_{H2O}$	**-33,79**	[kW]

BALANÇO ENERGÉTICO NO MOTOR-GERADOR



9 $\dot{Q}_{syn} = \dot{Q}_{gás} + \dot{Q}_{H2O}$

$\dot{Q}_{syn}$	**409,01**	[kW]

10 $\dot{Q}_{ar} = \dot{m}_{ar} \sum_{1}^{j} w_j \, x \, Cp_j (T - T_0)$

$\dot{m}_{ar}$	0,00222	[kg/s]
Cp_{ar}	1,005	[kJ/kgK]
T_0	25+273	[K]
T	40+273	[K]
$\dot{Q}_{ar}$	**0,06**	[kW]

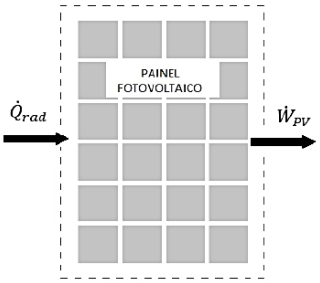
11 $\dot{Q}_{gex} = \dot{Q}_{atr} + \dot{Q}_{par} + \dot{Q}_{amb} + \dot{Q}_{conv}$

$\dot{Q}_{atr}$	40,91	[kW]
$\dot{Q}_{par}$	122,72	[kW]
$\dot{Q}_{amb}$	143,17	[kW]
$\dot{Q}_{conv}$	20,45	[kW]
$\dot{Q}_{gex}$	**327,25**	[kW]

12 $\dot{W}_{ICEG} = \dot{Q}_{syn} + \dot{Q}_{ar} - \dot{Q}_{gex}$

$\dot{W}_{ICEG}$	**81,81**	[kW]

DIMENSIONAMENTO DO PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO



$W_{PV} = \eta_{PV} \times N_{PV} \times A_{PV} \times I_{PV}$

	20	[KW]
η_{PV}	19,9	[%]
A_{PV}	2,21	[m2]
I_{PV}	4800	[Wh/m2]
N_{PV}	**9,5**	

ANEXO II – MEMÓRIA DE CÁLCULO DO RENDIMENTO GLOBAL

EFICIÊNCIA GLOBAL - CASO 1

$$\eta_{HRES_caso1} = \frac{\dot{W}_{ICEG} + \dot{W}_{PV}}{\dot{Q}_{bio} + \dot{Q}_{rad}}$$

$\dot{W}_{ICEG}$	80	[KW]
$\dot{W}_{PV}$	20	[KW]
$\dot{Q}_{bio}$	613,33	[KW]
$\dot{Q}_{rad}$	106	[KW]
η_{HRES_caso1}	**13,90**	%

RECUPERAÇÃO DE CALOR RESIDUAL

$$\dot{Q}_{rec} = (\dot{Q}_{gex} + \dot{Q}_{H2O}) \times 0{,}07$$

$\dot{Q}_{gex}$	327,21	[KW]
$\dot{Q}_{H2O}$	33,79	[KW]
$\dot{Q}_{rec}$	**25,27**	[KW]

EFICIÊNCIA GLOBAL - CASO 2

$$\eta_{HRES_caso2} = \frac{\dot{W}_{ICEG} + \dot{W}_{PV} + \dot{Q}_{rec}}{\dot{Q}_{bio} + \dot{Q}_{rad}}$$

$\dot{W}_{ICEG}$	80	[KW]
$\dot{W}_{PV}$	20	[KW]
$\dot{Q}_{rec}$	25,27	[KW]
$\dot{Q}_{bio}$	613,33	[KW]
$\dot{Q}_{rad}$	106	[KW]
η_{HRES_caso2}	**17,43**	%

ANEXO III – MEMÓRIA DE CÁLCULO DO CUSTO DE INVESTIMENTO

ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA (LIFE CICLE COST)

CUSTOS DE AQUISIÇÃO			
Equipamento	**R$**	**US$**	**Ref**
Gasifier			
Dust remover			
Cooler			
Tarpurifier			
Centrifugal separator			
Filter			
Roots blower			
Splitter			
Filtering cleaner			
One-way valve			
Circulating water pump			
Electric control cabinet			
TOTAL GASEIFICAÇÃO		**$ 92.720,00**	
PAINEL SOLAR CANADIAN SOLAR 440 WP – 144 CELLS, MONO			
INVERSOR SUNGROW 250 kW			
PERFIL INDUSTRIAL ROOFTOP 6,3 MTS			
TERMINAL FINAL 35MM			
TERMINAL INTERMEDIARIO 35MM			
PARAFUSO AUTOPERFURANTE SEXTAVADO 5,5 X 25 MM			
FITA DE VEDAÇÃO EDPM			
CABO SOLAR 6MM VERMELHO			
CABO SOLAR 6MM PRETO			
TOTAL SOLAR		**$ 20.000,00**	
Soma Custo de Aquisição			
Custos Agregados			
Preparação do Terreno	5%	$ -	
Projeto e Engenharia	10%	$ -	
Contingência	5%	$ -	
Permissão	3%	$ -	
Soma Custos Agregagos	**23%**	**$ -**	
TOTAL CUSTOS DE AQUISIÇÃO		**$ 138.645,60**	

CUSTOS DA MATÉRIA PRIMA			
Matéria Prima	**U$$/kg**	**US$/ANO**	**Ref**
Biomassa	R$ -	$ -	
Energia Solar	R$ -	$ -	
TOTAL CUSTOS MATÉRIA PRIMA		$ -	

CUSTO OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO (O&M)			
Tecnologia	**US$/kWh**	**Custos O&M**	Ref
Gaseificação	4%	$ 3.708,80	
Placa Solar	4%	$ 800,00	
TOTAL CUSTOS O&M	**4%**	**$ 4.508,80**	

ANEXO IV – MEMÓRIA DE CÁLCULO DO LCOE - CASO 1

CALCULO LCOE - CASO 1	
Consumo de energia disponibilizada pelo subsistema syngas kWh/ano	
Dias	317
Horas	24
Potência [kW]	80
Total sub_syngas [kW]	**608640**
Consumo de energia disponibilizada pelo subsistema solar kWh/ano	
Dias	317
Horas	6
Potência [kW]	20
Total sub_solar [kW]	**38040**
Consumo de energia disponibilizada pelo sistema kWh/ano Total e Tarifas	
Total [kW]	**646680**
Tarifa de Eletricidade (US$/KWh)	**0,106792**
Total (US$)	**$ 69.060,25**

FATOR DE RECUPERAÇÃO DE CAPITAL		
i	21%	$CRF = \frac{i_r.(1+i_r)^n}{(1+i_r)^n - 1}$
n (anos)	10	
CRF	**0,242582841**	

PLANTA GASEIFICAÇÃO			
CRF		0,242582841	$LCOE = \frac{CRF.CI + C_{O\&M}}{PG_{liq_{anual}}}$
CI	$	114.045,60	
Co&m	$	3.708,80	
PG		608.640,00	
LCOE		**0,052**	

PLANTA PV			
CRF		0,242582841	$LCOE = \frac{CRF.CI + C_{O\&M}}{PG_{liq_{anual}}}$
CI	$	24.600,00	
Co&m	$	800,00	
PG		38.040,00	
LCOE		**0,178**	

PLANTA HIBRIDA - CASO 1			
CRF		0,242582841	$LCOE = \frac{CRF.CI + C_{O\&M}}{PG_{liq_{anual}}}$
CI	$	138.645,60	
Co&m	$	4.508,80	
PG (kw)		646.680,00	
LCOE		**0,059**	

ANEXO V – MEMÓRIA DE CÁLCULO DO LCOE – CASO 2

CALCULO LCOE - CASO 2	
Consumo de energia disponibilizada pelo subsistema syngas kWh/ano	
Dias	317
Horas	24
Potência [kW]	105,27
Total sub_syngas [kW]	**800917**
Consumo de energia disponibilizada pelo subsistema solar kWh/ano	
Dias	317
Horas	6
Potência [kW]	20
Total sub_solar [kW]	**38040**
Consumo de energia disponibilizada pelo sistema kWh/ano Total e Tarifas	
Total [kW]	**838957**
Tarifa de Eletricidade (US$/KWh)	**0,106792**
Total (US$)	**$ 89.593,88**

FATOR DE RECUPERAÇÃO DE CAPITAL		
i	21%	
n (anos)	10	$CRF = \frac{i_r.(1+i_r)^n}{(1+i_r)^n - 1}$
CRF	**0,242582841**	

PLANTA GASEIFICAÇÃO			
CRF		0,242582841	$LCOE = \frac{CRF.CI + C_{O\&M}}{PG_{liq_{anual}}}$
CI	$	114.045,60	
Co&m	$	3.708,80	
PG		800.916,86	
LCOE		**0,039**	

PLANTA PV			
CRF		0,242582841	$LCOE = \frac{CRF.CI + C_{O\&M}}{PG_{liq_{anual}}}$
CI	$	24.600,00	
Co&m	$	800,00	
PG		38.040,00	
LCOE		**0,178**	

PLANTA HIBRIDA - CASO 2			
CRF		0,242582841	$LCOE = \frac{CRF.CI + C_{O\&M}}{PG_{liq_{anual}}}$
CI	$	138.645,60	
Co&m	$	4.508,80	
PG (kw)		838.956,86	
LCOE_caso2		**0,045**	

ANEXO VI – MEMÓRIA DE CÁLCULO DA DERPECIAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Equipamento	Vida útil	Taxa de depreciação
Gaseificador	10	10%
Motor Gerador	10	10%
Trocador de Calor	10	10%
Bateria	10	10%
Equipamentos Solares	12,5	8%

$$D_t = \frac{CI - TD}{VU}$$

Depreciação do Gaseificador + MotoGerador +Trocador de Calor			
CI	$	92.720,00	[US$]
TD	$	9.272,00	[US$]
VU		10	anos
D_t	**$**	**8.344,80**	[US$]

Depreciação de Equipamentos Solares			
CI	$	20.000,00	[US$]
TD	$	1.600,00	[US$]
VU		12,5	anos
D_t	**$**	**1.472,00**	[US$]

Depreciação TOTAL			
D_t	**$**	**9.816,80**	[US$]

ANEXO VII – MEMÓRIA DE CÁLCULO DO FLUXO DE CAIXA, VPL TIR E PAYBACK – CASO 1

FLUXO DE CAIXA DESCONTADO - CASO 1

	ANO 0	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5	ANO 6	ANO 7	ANO 8	ANO 9	ANO 10
1- CUSTOS DE INVESTIMENTO											
CI Gaseificador	$ 114.045,60										
CI Solar PV	$ 24.600,00										
CI Total	**$ 138.645,60**										
2- RECEITA LÍQUIDA											
Receita bruta da planta de gaseificador		$ 64.997,88	$ 64.997,88	$ 64.997,88	$ 64.997,88	$ 64.997,88	$ 64.997,88	$ 64.997,88	$ 64.997,88	$ 64.997,88	$ 64.997,88
Receita bruta da planta de Solar PV		$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37
Impostos (PIS,CONFINS,CSLL,ICMS) 18%		$ 12.430,85	$ 12.430,85	$ 12.430,85	$ 12.430,85	$ 12.430,85	$ 12.430,85	$ 12.430,85	$ 12.430,85	$ 12.430,85	$ 12.430,85
Total receita liquida	0	**$ 56.629,41**	**$ 56.629,41**	**$ 56.629,41**	**$ 56.629,41**	**$ 56.629,41**	**$ 56.629,41**	**$ 56.629,41**	**$ 56.629,41**	**$ 56.629,41**	**$ 56.629,41**
3- DESPESAS											
Custo de produção de eletricidade - planta de gaseificador		$ 0,0515	$ 0,0515	$ 0,0515	$ 0,0515	$ 0,0515	$ 0,0515	$ 0,0515	$ 0,0515	$ 0,0515	$ 0,0515
Custo de produção de eletricidade - planta de solar pv		$ 0,1779	$ 0,0890	$ 0,0593	$ 0,0445	$ 0,0356	$ 0,0297	$ 0,0254	$ 0,0222	$ 0,0198	$ 0,0178
Custo de operação e manutenção da planta		$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80
Depreciação		$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80
Custo Materia Prima											
Total de despesas		**$ 14.325,83**	**$ 14.325,74**	**$ 14.325,71**	**$ 14.325,70**	**$ 14.325,69**	**$ 14.325,68**	**$ 14.325,68**	**$ 14.325,67**	**$ 14.325,67**	**$ 14.325,67**
4- LUCRO SEM IMPOSTO DE RENDA		$ 42.303,58	$ 42.303,66	$ 42.303,69	$ 42.303,71	$ 42.303,72	$ 42.303,72	$ 42.303,73	$ 42.303,73	$ 42.303,73	$ 42.303,74
5- IMPOSTO DE RENDA 34%		$ 14.383,22	$ 14.383,25	$ 14.383,26	$ 14.383,26	$ 14.383,26	$ 14.383,27	$ 14.383,27	$ 14.383,27	$ 14.383,27	$ 14.383,27
6- LUCRO LÍQUIDO APÓS DESCONTO DO IR		**$ 27.920,36**	**$ 27.920,42**	**$ 27.920,44**	**$ 27.920,45**	**$ 27.920,45**	**$ 27.920,46**	**$ 27.920,46**	**$ 27.920,46**	**$ 27.920,46**	**$ 27.920,47**
DEPRECIAÇÃO		$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80
FLUXO DE CAIXA LIVRE -FCL	$ -138.645,60	$ 37.737,16	$ 37.737,22	$ 37.737,24	$ 37.737,25	$ 37.737,25	$ 37.737,26	$ 37.737,26	$ 37.737,26	$ 37.737,26	$ 37.737,27
FCL ACUMULADO		$ 37.737,16	$ 75.474,38	$ 113.211,62	$ 150.948,87	$ 188.686,12	$ 226.423,38	$ 264.160,64	$ 301.897,90	$ 339.635,17	$ 377.372,43
FLUXO DE CAIXA LIVRE DESCONTADO -FCLD		$ 37.737,16	$ 33.208,70	$ 29.223,66	$ 25.716,82	$ 22.630,80	$ 19.915,10	$ 17.525,29	$ 15.422,26	$ 13.571,59	$ 11.943,00
		$ 37.737,16	$ 70.945,86	$ 100.169,52	$ 125.886,34	$ 148.517,14	$ 168.432,24	$ 185.957,53	$ 201.379,79	$ 214.951,37	$ 226.894,37

VP, TIR E PAYBACK DESCONTADO - CASO 1

PERÍODO (EM ANOS)	FLUXO DE CAIXA	VALOR PRESENTE	VALOR PRESENTE ACUMULADO
0	$ -138.645,60	$ -138.645,60	-R$ 138.645,60
1	$ 37.737,16	$ 33.693,89	-R$ 104.951,71
2	$ 37.737,22	$ 30.083,88	-R$ 74.867,83
3	$ 37.737,24	$ 26.860,62	-R$ 48.007,21
4	$ 37.737,25	$ 23.982,70	-R$ 24.024,50
5	$ 37.737,25	$ 21.413,13	-R$ 2.611,37
6	$ 37.737,26	$ 19.118,87	R$ 16.507,50
7	$ 37.737,26	$ 17.070,42	R$ 33.577,92
8	$ 37.737,26	$ 15.241,45	R$ 48.819,37
9	$ 37.737,26	$ 13.608,44	R$ 62.427,80
10	$ 37.737,27	$ 12.150,39	R$ 74.578,19

ANÁLISE DE INVESTIMENTO		
INVESTIMENTO INICIAL	R$	138.645,60
TAXA MÍNIMA ATRATIVIDADE (TMA)		12,00%
TEMPO EM ANOS - (PAY BACK)		5,14
TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)		24,07%
VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)	R$	74.578,19
TIR >= TMA ACEITÁVEL TIR < TMA REJEITÁVEL		
VPL >= (0) ACEIITÁVEL VPL < (0) REJEITÁVEL		

ANEXO VIII – MEMÓRIA DE CÁLCULO DO FLUXO DE CAIXA, VPL TIR E PAYBACK – CASO 2

FLUXO DE CAIXA DESCONTADO - CASO 2

	ANO 0	ANO 1	ANO 2	ANO 3	ANO 4	ANO 5	ANO 6	ANO 7	ANO 8	ANO 9	ANO 10
1- CUSTOS DE INVESTIMENTO											
CI Gaseificador	$ -										
CI Solar PV	$ -										
CI Total	$ -										
2- RECEITA LÍQUIDA											
Receita bruta da planta de gaseificador		$ 87.202,78	$ 87.202,78	$ 87.202,78	$ 87.202,78	$ 87.202,78	$ 87.202,78	$ 87.202,78	$ 87.202,78	$ 87.202,78	$ 87.202,78
Receita bruta da planta de Solar PV		$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37	$ 4.062,37
Impostos (PIS,CONFINS,CSLL,ICMS) 18%		$ 16.427,73	$ 16.427,73	$ 16.427,73	$ 16.427,73	$ 16.427,73	$ 16.427,73	$ 16.427,73	$ 16.427,73	$ 16.427,73	$ 16.427,73
Total receita liquida		**$ 74.837,42**	**$ 74.837,42**	**$ 74.837,42**	**$ 74.837,42**	**$ 74.837,42**	**$ 74.837,42**	**$ 74.837,42**	**$ 74.837,42**	**$ 74.837,42**	**$ 74.837,42**
3- DESPESAS											
Custo de produção de eletricidade - planta de gaseificador		$ 0,0384	$ 0,0384	$ 0,0384	$ 0,0384	$ 0,0384	$ 0,0384	$ 0,0384	$ 0,0384	$ 0,0384	$ 0,0384
Custo de produção de eletricidade - planta de solar pv		$ 0,1779	$ 0,0890	$ 0,0593	$ 0,0445	$ 0,0356	$ 0,0297	$ 0,0254	$ 0,0222	$ 0,0198	$ 0,0178
Custo de operação e manutenção da planta		$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80	$ 4.508,80
Depreciação		$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80
Custo Matéria Prima											
Total de despesas		**$ 14.325,82**	**$ 14.325,73**	**$ 14.325,70**	**$ 14.325,68**	**$ 14.325,67**	**$ 14.325,67**	**$ 14.325,66**	**$ 14.325,66**	**$ 14.325,66**	**$ 14.325,66**
4- LUCRO SEM IMPOSTO DE RENDA		$ 60.511,61	$ 60.511,70	$ 60.511,73	$ 60.511,74	$ 60.511,75	$ 60.511,76	$ 60.511,76	$ 60.511,76	$ 60.511,77	$ 60.511,77
5- IMPOSTO DE RENDA 34%		$ 20.573,95	$ 20.573,98	$ 20.573,99	$ 20.573,99	$ 20.574,00	$ 20.574,00	$ 20.574,00	$ 20.574,00	$ 20.574,00	$ 20.574,00
6- LUCRO LÍQUIDO APÓS DESCONTO DO IR		**$ 39.937,66**	**$ 39.937,72**	**$ 39.937,74**	**$ 39.937,75**	**$ 39.937,76**	**$ 39.937,76**	**$ 39.937,76**	**$ 39.937,76**	**$ 39.937,77**	**$ 39.937,77**
DEPRECIAÇÃO		$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80	$ 9.816,80
FLUXO DE CAIXA LIVRE -FCL	$ -	$ 49.754,46	$ 49.754,52	$ 49.754,54	$ 49.754,55	$ 49.754,56	$ 49.754,56	$ 49.754,56	$ 49.754,56	$ 49.754,57	$ 49.754,57
FCL ACUMULADO		$ 49.754,46	$ 99.508,98	$ 149.263,52	$ 199.018,07	$ 248.772,63	$ 298.527,19	$ 348.281,75	$ 398.036,31	$ 447.790,88	$ 497.545,45
FLUXO DE CAIXA LIVRE DESCONTADO -FCLD		$ 49.754,46	$ 43.783,93	$ 38.529,86	$ 33.906,27	$ 29.837,52	$ 26.257,02	$ 23.106,18	$ 20.333,43	$ 17.893,42	$ 15.746,21
		$ 49.754,46	$ 93.538,39	$ 132.068,24	$ 165.974,52	$ 195.812,04	$ 222.069,05	$ 245.175,23	$ 265.508,66	$ 283.402,08	$ 299.148,30

VP , TIR E PAYBACK DESCONTADO - CASO 2

PERÍODO (EM ANOS)	FLUXO DE CAIXA	VALOR PRESENTE	VALOR PRESENTE ACUMULADO
0	$ -138.645,60	$ -138.645,60	-R$ 138.645,60
1	$ 49.754,46	$ 44.423,63	-R$ 94.221,97
2	$ 49.754,52	$ 39.664,00	-R$ 54.557,97
3	$ 49.754,54	$ 35.414,30	-R$ 19.143,68
4	$ 49.754,55	$ 31.619,92	R$ 12.476,24
5	$ 49.754,56	$ 28.232,07	R$ 40.708,31
6	$ 49.754,56	$ 25.207,21	R$ 65.915,52
7	$ 49.754,56	$ 22.506,44	R$ 88.421,96
8	$ 49.754,56	$ 20.095,03	R$ 108.516,99
9	$ 49.754,57	$ 17.942,00	R$ 126.458,99
10	$ 49.754,57	$ 16.019,64	R$ 142.478,63

ANÁLISE DE INVESTIMENTO

INVESTIMENTO INICIAL	R$ 138.645,60
TAXA MÍNIMA ATRATIVIDADE (TMA)	12,00%
TEMPO EM ANOS - (PAY BACK)	3,61
TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)	33,96%
VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL)	R$ 142.478,63

TIR >= TMA ACEITÁVEL
TIR < TMA REJEITÁVEL

VPL >= (0) ACEITÁVEL
VPL < (0) REJEITÁVEL

ANEXO IX – MEMÓRIA DE CÁLCULO DA EFICIÊNCIA ECOLÓGICA E INDICADOR DE ECOEFICIÊNCIA

EFICIÊNCIA ECOLÓGICA

1º Passo

$$f_{espécie} = \frac{n_mols_{espécie} \times MW_{espécie}}{n_mols_{comb} \times MW_{comb}}$$

Reagentes	No. Moles	P. Mol.
CH_4	0,0094	16
CO	0,1967	28
CO_2	0,1014	44
H2	0,2489	2
O_2	1,352	32
N_2	0,2416	28

nxW (comb)

10,6174 [kg_comb]

Produtos	No. Moles	P. Mol.	f espécie
CO_2	0,3004	44	1,244899881
CH_4	1,193E-18	16	1,7978E-18
N_2O	5,861E-08	44	2,42888E-07
SO_2	0	64	0
NO_x	0,0012	30	0,003390661
MP	0	12	0

2º Passo

$$f_{co_2 eq} = f_{CO2} + 28 f_{CH4} + 265 f_{N20}$$

F_CO2 1,244964247 [kg_Co2eq/kg_comb]

$$f_{1,4\,DCB\,eq} = 4{,}54\, f_{SO2} + 56{,}71 f_{NO_x} + 38{,}75 f_{PM}$$

F_1,4DCB 0,192284363 [kg_1,4DCBeq/kg_comb]

3º Passo - Indicador de Poluente de Gases do Efeito Estufa e Toxidade Humana

$$\Pi_{GW} = \frac{f_{CO_2_eq}}{PCI_{comb}}$$

$$\Pi_{HT} = \frac{f_{1,4DCB_eq}}{PCI_{comb}}$$

$$\Pi_p = 0.742\,\Pi_{HT} + 0.258\,\Pi_{GW}$$

PCI_comb 5,5

MP	0,000010	0,000020	0,000030	0,000040
f_MP	1,13022E-05	2,2604E-05	3,39066E-05	4,52088E-05
f_1,4DCB	0,192722324	0,193160284	0,193598244	0,194036205
Π_GW	0,226357136	0,226357136	0,226357136	0,226357136
Π_HT	0,035040422	0,035120052	0,035199681	0,03527931
Π	0,084400135	0,084459219	0,084518304	0,084577389

4º Passo - Eficiência Ecológica

$$\varepsilon = \left[c \frac{\eta}{\eta + \Pi} \ln(K \pm \Pi) \right]^n$$

MP	0,000010	0,000020	0,000030	0,000040
Π	0,084400135	0,084459219	0,084518304	0,084577389
ε_caso1	79,01815%	79,00776%	78,99736%	78,98697%
ε_caso2	82,39529%	82,38602%	82,37675%	82,36749%

c	0,204
n	0,5
K	135
rend_case1	14,0%
rend_case2	17,8%

ECOEFICIÊNCIA

$$EE = \frac{VPL}{f_{CO_2_eq}}$$

NPV_caso1 $ 74.578,30 US$

NPV_caso2 $ 142.478,72 US$

F_CO2eq 1,244964247 [kg_Co2eq/kg_comb]

F_CO2eq 13,21828339 kg_Co2eq

EE_caso 1 5642,06

EE_caso2 10778,91