



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FÍSICA

José Luciano Batista Moreira

Avaliação termoeconômica de um sistema de poligeração de alto desempenho

Cabo de Santo Agostinho - PE

2023

JOSÉ LUCIANO BATISTA MOREIRA

Avaliação termoeconômica de um sistema de poligeração de alto desempenho

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia Física.

Área de concentração: Materiais

Orientador: Prof. Dr. Adriano da Silva Marques

Cabo de Santo Agostinho - PE

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M838a Moreira, José Luciano Batista
 Avaliação termoeconômica de um sistema de poligeração de alto desempenho / José Luciano Batista
 Moreira. - 2023.
 72 f. : il.
- Orientador: Dr. Adriano da Silva Marques.
 Inclui referências.
- Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Física, Cabo de Santo Agostinho, 2023.
1. Poligeração. 2. Termoeconomia. 3. Eficiência energética. 4. Custo exergetico. I. Marques, Dr. Adriano
da Silva, orient. II. Título

JOSÉ LUCIANO BATISTA MOREIRA

Avaliação termoeconômica de um sistema de poligeração de alto desempenho

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Rural de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Engenharia Física

Aprovada em: _____

Banca Examinadora

Dr. ADRIANO DA SILVA MARQUES

Orientador

Dr. JOSÉ VICENTE HALLAK D'ANGELO

Examinador externo

Dr. WELITON SOARES MARTINS

Examinador interno

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu filho Raul que a cada dia me motiva a ser uma pessoa melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força e disposição para alcançar meus objetivos e por sempre iluminar meu caminho.

À minha família, minha mãe Antônia Batista, meu pai Luiz Moreira, minha irmã Priscila e meu irmão Lucas, pela minha formação ética, moral e por sempre estarem a disposição para me ajudar. Em meio a tantas adversidades o apoio de vocês nunca foi ausente ou insuficiente.

Aos meus amigos da UFRPE e do Ceará, por todo o suporte ao longo dessa caminhada.

Ao meu orientador, professor Dr. Adriano da Silva Marques, que desde a graduação me orienta e sempre contribuiu para a concretização do meu sonho, ser professor universitário do curso de engenharia mecânica.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), pela concessão da bolsa de estudos ao longo de todo o período da pesquisa.

Por fim agradeço a todos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física da UFRPE e aos membros da UFPB, que contribuíram de maneira valiosa para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Sistemas de poligeração de energia destacam-se dos sistemas de geração convencionais por apresentarem maior eficiência energética. Este sistema tem sido cada vez mais explorado com o intuito de reduzir os insumos utilizados na produção de energia e danos ambientais, causados principalmente por equipamentos que dissipam grande quantidade de energia térmica que pode ser reaproveitada. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo propor uma planta de poligeração e submeter a unidade a uma avaliação energética, exergética e termoeconômica, aplicando o método TCE (Teoria do Custo Exergético). A planta representa uma proposta teórica, que utiliza em sua configuração equipamentos que já foram modelados e avaliados separadamente em estudos validados. A unidade foi projetada para operar com um MCI (motor de combustão interna) que usa biogás como combustível, um sistema de refrigeração por absorção de água e amônia que utiliza calor residual dos gases de escape do MCI, e um conjunto de painéis fotovoltaicos com um sistema de refrigeração acoplado as placas solares, além desses equipamentos faz parte da planta um tanque para armazenamento de água quente, que utiliza calor residual do MCI e do sistema de refrigeração dos painéis. A avaliação energética indicou que quantitativamente, o principal componente em termos de valores energéticos é o motor de combustão interna que consome 0,0875 (kg/s) de biogás, produz 534 (kW) de energia elétrica, além de fornecer energia térmica para o sistema de refrigeração e o tanque de água quente a uma taxa de 145,08 (kW) e 332,22 (kW), respectivamente. A planta de poligeração apresentou fator de utilização total equivalente a 65,12 %, um aumento de 25,83 %, comparando-se a operação apenas do MCI. O valor obtido pela avaliação termoeconômica do custo nivelado para produzir eletricidade, água quente (tanque de energia térmica) e água gelada (*chiller* de absorção) foi 19,83 (R\$/h), 12,52 (R\$/h) e 12,76 (R\$/h), respectivamente. O estudo de variação paramétrica indicou que o tanque de água quente e o MCI, são os equipamentos mais sensíveis em relação a mudanças no fator de manutenção, a diminuição de 20% com gastos operacionais no tanque e no MCI, resulta em uma economia de 0,49 (R\$/h) e 0,64 (R\$/h). Diante dos resultados apresentados a proposta da planta de poligeração, contribui para um sistema de alta eficiência energética que utiliza insumos renováveis, contribuindo para uma operação econômica e ecologicamente sustentável.

Palavras-chave: Poligeração; termoeconomia; eficiência energética; custo exergético.

ABSTRACT

Power polygeneration systems stand out from conventional generation systems because they are more energy efficient. This system has been increasingly explored to reduce the inputs used in energy production and environmental damage, mainly caused by equipment that dissipates a large amount of thermal energy that can be reused. In this context, this study aims to propose a polygeneration plant and submit the unit to an energy, exergetic, and thermoeconomic evaluation, applying the ECT method (Exergetic Cost Theory). The plant is a theoretical proposal, which uses its configuration equipment that has already been modeled and evaluated separately, in published studies. The unit was designed to operate with an ICE (internal combustion engine) that uses biogas as fuel, a cooling system by absorption of water and ammonia that uses residual heat from the exhaust gases of the ICE, and a set of photovoltaic panels with a cooling system coupled to solar panels, in addition to this equipment, a tank for hot water storage is part of the plant, which uses residual heat from the MCI and the cooling system of the panels. The energy evaluation indicated that, quantitatively, the main component in terms of energy values is the internal combustion engine that consumes 0.0875 (kg/s) of biogas, produces 534 (kW) of electrical energy, in addition to providing thermal energy for the cooling system and the hot water tank at a rate of 145.08 (kW) and 332.22 (kW), respectively. The polygeneration plant presented a total utilization factor equivalent to 65.12%, an increase of 25,83 %, comparing the ICE operation only. The value obtained by the thermoeconomic evaluation of the leveled cost to produce electricity, hot water (thermal energy tank), and chilled water (absorption chiller) was 19.83 (R\$/h), 12.52 (R\$/h) and 12.76 (R\$/h), respectively. The parametric variation study indicated that the hot water tank and the ICE, are the most sensitive equipment to changes in the maintenance factor, the 20% decrease in operational expenses in the tank and the ICE, results in a saving of 0.49 (R\$/h) and 0.64 (R\$/h). Given the results presented, the proposed polygeneration plant contributes to a high energy efficiency system that uses renewable inputs, contributing to an economically and ecologically sustainable operation.

Keywords: polygeneration; thermoeconomics; energy efficiency; exergetic cost.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases da execução de uma revisão sistemática.....	18
Figura 2 - Configuração do sistema de trigeriação.....	27
Figura 3 - Configuração do sistema de poligeriação	28
Figura 4 - Suprimento total de energia primária no mundo (1973).....	32
Figura 5 - Suprimento total de energia primária no mundo (2019).....	33
Figura 6 – Matriz energética brasileira.	33
Figura 7 - Unidade de poligeriação proposta	35
Figura 8 – Diagrama de bloco da avaliação termodinâmica.....	41
Figura 9 – Captura de tela da interface do EES	52
Figura 10 – Captura de tela, propriedades termofísicas no EES.....	53
Figura 11 – Contribuição do fator de utilização dos componentes da planta	55
Figura 12 – Valores exergéticos dos produtos e insumos da planta	56
Figura 13 – Exergia destruída dos componentes da planta	57
Figura 14 – Valores de energia e exergia da planta.....	58
Figura 15 – Eficiência exergética dos principais fluxos da planta.....	60
Figura 16 – Valores dos custos monetários dos principais fluxos da planta	61
Figura 17 – Valores da taxa de custos da análise de comparação dos resultados ...	63
Figura 18 – Variação de parâmetros monetários associados ao MCI	64
Figura 19 – Variação de parâmetros monetários associados ao <i>chiller</i>	64
Figura 20 – Variação de parâmetros monetários associados ao tanque.....	65
Figura 21 – Variação de parâmetros associados ao custo do combustível.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Síntese de resultados dos sistemas de multi geração.....	19
Tabela 2 – Campos de aplicação dos sistemas de poligeração.....	29
Tabela 3 – Parâmetros do motor a combustão interna	37
Tabela 4 – Especificações do sistema de refrigeração	38
Tabela 5 – Parâmetros dos painéis fotovoltaicos	39
Tabela 6 –Especificações do sistema de refrigeração dos painéis	40
Tabela 7 – Balanço de exergia.....	46
Tabela 8 – Equações da eficiência exergética	47
Tabela 9 – Equações da preposição 01 do método TCE	47
Tabela 10 – Equações da preposição 03 do método TCE	48
Tabela 11 – Equações da preposição 05 do método TCE	49
Tabela 12 – Taxa de custo monetário dos componentes da planta	50
Tabela 13 – Equações do custo monetário do método TCE	50
Tabela 14 – Equações auxiliares do balanço de custo monetário.....	51
Tabela 15 – Valores dos parâmetros de custos operacionais	51
Tabela 16 –Fluxos energéticos e exergéticos da planta	54
Tabela 17 – Resultados da avaliação exergoeconômica	59

LISTA DE SIGLAS

BEN	Balanço Energético Nacional
CCHP	<i>Combined Cooling, Heating, And Power</i>
COGEN	Associação da Indústria de Cogeração de Energia
E&S	Negentropia Como um Fluxo de Exergia
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
EJ	Exajoule
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GNC	Gás Natural Comprimido
IEA	<i>International Energy Agency</i>
MCI	Motor de Combustão Interna
ORC	Ciclo Rankine Orgânico
SOFC	Célula de Combustível de Óxido Sólido
SPECO	<i>Specific Exergy Costing</i>
TCE	Teoria do Custo Exergético
UFS	Energia Interna, Trabalho do Fluxo e Entropia

LISTA DE ABREVIATURAS

A	Área	(m ²)
\dot{C}	Custo monetário	(R\$/h)
e_x	Exergia específica	(kJ/kg)
Ex	Exergia	(kW)
Ex *	Custo exergético	(kJ/kg)
h	Entalpia específica	(kJ/kg)
k	Custo exergético unitário	(kJ/kg)
\dot{m}	Fluxo de massa	(kg/s)
P _{ci}	Poder calorífico inferior	(kJ/kg)
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor	(kW)
t	Tempo	(s)
T	Temperatura	K ou °C
\dot{W}	Trabalho	kW
\dot{Z}	Custo de investimento	(R\$/h)
η	Eficiência energética	(Adimensional)
α	Fração dos gases de exaustão destinados ao <i>chiller</i>	(Adimensional)
ε_x	Eficiência exergética	(Adimensional)

LISTA DE SUBSCRITOS

a	Fluxo de um produto (avaliação termoeconômica)
abs	Chiller de absorção
arre	Fluido de arrefecimento
b	Biogás
ele	Energia elétrica
ent	Fluxo de entrada
eva	Evaporador
ext	Gases de exaustão
m	Motor de combustão interna
o	Estado morto
p	Painel solar
pe	Fluxo de perda (avaliação termoeconômica)
sai	Fluxo de saída
taq	Tanque para armazenamento de água quente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÕES	16
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	17
1.3	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	TERMOECONOMIA.....	22
2.2	MÉTODOS TERMOECONÔMICOS	23
2.3	SISTEMAS DE GERAÇÃO COMBINADA DE ENERGIA	26
2.4	ENERGIA	29
3	METODOLOGIA	35
3.1	DESCRIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO	35
3.2	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PLANTA	36
3.3	DIAGRAMA DE BLOCOS DO ESTUDO	41
3.4	AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA	42
3.5	APLICAÇÃO DO TCE	47
3.6	FERRAMENTA DE DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1	AVALIAÇÃO ENERGÉTICA	54
4.1.1	Fator de utilização da planta.....	55
4.2	AVALIAÇÃO EXERGÉTICA.....	56
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E EXERGÉTICA	58
4.4	AVALIAÇÃO EXERGOECONÔMICA	59
5	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E MOTIVAÇÕES

Conforme indica Hinrichs (2014) a disponibilidade e o uso da energia é uma questão fundamental para o desenvolvimento da sociedade, os recursos energéticos são necessários para se criar bens com base em insumos naturais, e para fornecer muitos dos serviços com os quais temos nos beneficiado, o desenvolvimento econômico e os altos padrões de vida são processos complexos que compartilham um denominador comum: a disponibilidade de um abastecimento adequado e confiável de energia.

O crescimento industrial e a urbanização dos países impulsionaram a demanda energética. De acordo com dados do IEA (2021) o fornecimento total de energia no mundo em 1973 foi de 254 EJ (Exajoules), enquanto no ano de 2019 foi observado um fornecimento de 606 EJ, um aumento equivalente a 239 % na quantidade mundial de energia fornecida, em pouco menos de meio século.

O aumento do consumo energético tem sido amplamente discutido nas principais conferências mundiais. A mais recente: 27ª Conferência de mudanças climáticas de Sharm El-Sheikh United Nations (2022) aconteceu em novembro de 2022, tendo como principal objetivo traçar ações e metas relacionadas a disponibilidade e uso dos recursos energéticos, além da redução da emissão de poluentes.

Diante do cenário de aumento da demanda de energia necessária para satisfazer as necessidades da sociedade, associada à preocupação com a degradação ambiental, duas ações têm sido amplamente avaliadas, a substituição dos combustíveis fósseis pelos combustíveis renováveis (WOLFF et al, 2022), e o uso de sistemas combinados de produção de energia (PINTO et al, 2022).

No Brasil a maior parte de energia elétrica é produzida a partir de usinas hidrelétricas, de acordo com o balanço energético nacional, BEN (2022) 56,8 % da energia elétrica do país foi produzida a partir deste tipo de energia renovável, somando-se a outros tipos de energia renovável em 2021 o país utilizou 86,3 % da energia elétrica. Um destaque positivo para o país comparando-se a matriz de energia elétrica do mundo, que apresenta um valor equivalente a pouco mais de 70 % da produção de energia elétrica oriunda de combustíveis fósseis.

Já o cenário do uso dos sistemas de geração combinada de energia ainda é pouco explorado no Brasil, de acordo com dados do COGEN (2022) o uso desse tipo de sistema representa apenas 11 % do parque de geração do país, um percentual baixo se comparado com a Dinamarca, que possui 33 % do parque de geração do país constituído por sistemas de multigeração. Estudos como o de Marques de Lima et al (2020) destacam que a ausência de incentivos fiscais e os custos de investimento, são entraves relevantes para a utilização reduzida desse tipo de sistema no Brasil.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.2.1 Objetivo Geral

Propor uma planta de poligeração de alto desempenho e realizar avaliação termoeconômica utilizando o método TCE (Teoria do Custo Exergético).

1.2.2 Objetivos Específicos

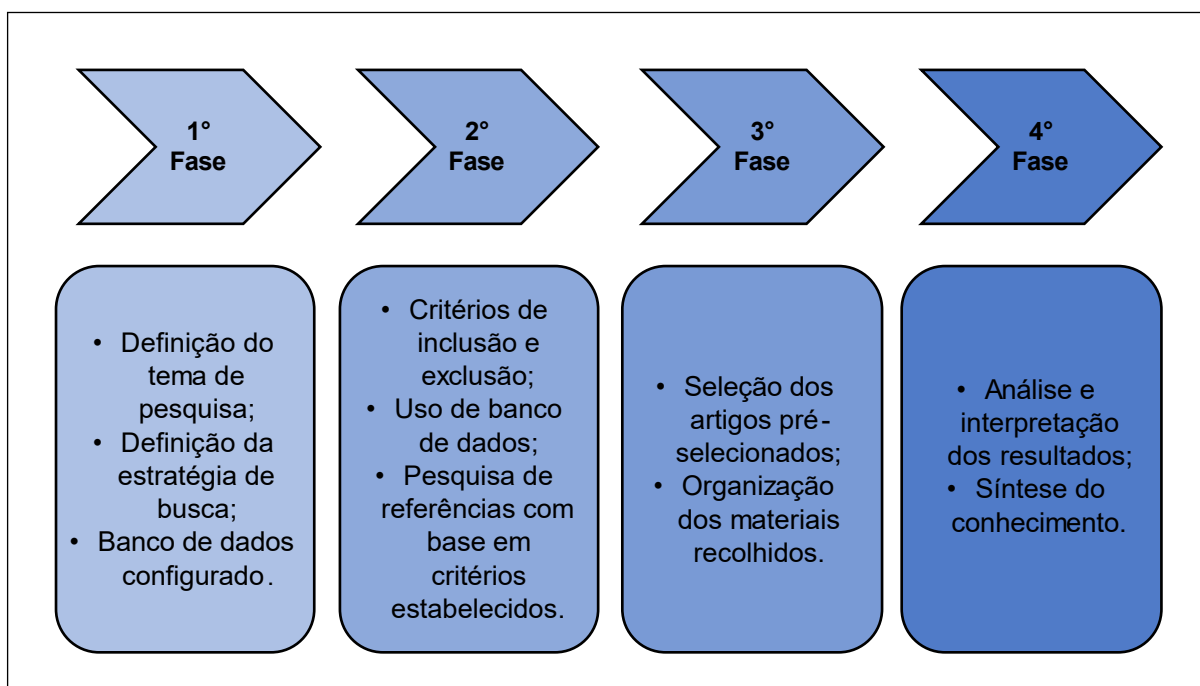
- Propor uma planta de poligeração para atender demandas de frio, calor e energia elétrica;
- Avaliar termodinamicamente a planta proposta;
- Realizar o diagnóstico termoeconômico dos equipamentos e processos da planta;
- Analisar o custo termoeconômico com base nos produtos e insumos dos equipamentos;
- Apresentar o diagnóstico termoeconômico com base nos valores da eficiência exergoeconômica da planta;
- Realiza estudo de variação paramétrica dos custos operacionais da planta.

1.3 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Com base nos sistemas que produzem diferentes tipos de energia simultaneamente foi feita uma revisão bibliográfica sistemática. A figura 01 representa

as fases da revisão bibliográfica, que compreende desde a seleção dos artigos até a síntese dos principais resultados avaliados.

Figura 1 - Fases da execução de uma revisão sistemática



Fonte: Adaptado de Santos et al (2021)

1.3.1 Seleção dos artigos da revisão sistemática

O tema da pesquisa foi definido a partir do questionamento: Quais os principais sistemas de geração combinada foram avaliados do ponto de vista exergoeconômico atualmente? Em torno do questionamento central foram listadas informações relacionadas a:

- Configuração do sistema (cogeração, trigeração ou poligeração);
- Tipo de combustível utilizado;
- Principal equipamento em termos de dissipação de energia;
- Método exergoeconômico utilizado.

A pesquisa dos artigos foi feita através do site Google Scholar a partir das palavras-chave: *Exergoeconomic*, *thermoeconomic*, *polygeneration*, *trigeneration*, *cogeneration*, CCHP (*combined cooling, heating, and power*).

A pesquisa de pré-seleção foi feita com base em filtros relacionados ao tempo de publicação, últimos 10 anos (2012 - 2022) e ao tipo de artigo (somente artigos de

pesquisa). A partir das palavras-chave e dos filtros, foram selecionados os artigos por ordem de relevância.

Dos artigos pré-selecionados, foram escolhidos 10 estudos para que fosse feita a revisão sistemática, os critérios de exclusão foram:

- Aplicação do método exergoeconômico, estudos que não abordavam avaliação termoeconômica;
- Estudos dedicados exclusivamente a otimização ou variação paramétrica.

A tabela 01 apresenta uma síntese dos resultados da revisão sistemática dos 10 artigos selecionados.

Tabela 1 – Síntese de resultados dos sistemas de multi geração

Autor	Sistema	Combustível	Principal equipamento	Método exerg.
Xi et al (2021)	Poligeração	Energia solar	ORC	SPECO
Ji-chao e Sobhani (2021)	Cogeração	Biomassa	Turbina a gás	TCE
Chen et al (2021)	Trigeração	Energia solar	ORC	SPECO
Schröder et al (2020)	Poligeração	Metano	MCI	SPECO
Ghaebi et al (2018)	Trigeração	Gás natural/ geotérmica	MCI	TCE
Shokati et al (2018)	Cogeração	Diesel	MCI	SPECO
Gungor et al (2012)	Cogeração	Gás natural	MCI	SPECO
Chitsaz et al (2017)	Trigeração	Metano	Célula a combustível	TCE
Wang et al (2020)	Trigeração	Metano	Turbina a gás	SPECO
Zhang et al (2019)	Poligeração	Biomassa	Turbina a gás	SPECO

Fonte: Produzido pelo autor (2023)

Os sistemas de poligeração estão em 30 % dos estudos, enquanto as plantas de trigerção e cogeração somam 40 % e 30 % respectivamente;

A maior parte dos estudos (70 %) utiliza como insumo combustíveis renováveis, enquanto 20 % das plantas operam com combustíveis fósseis e um sistema de trigerção utiliza os dois tipos de combustíveis;

Em relação ao tipo de equipamento principal (que dissipa energia residual, para que seja convertida em energia útil) a revisão indicou que o MCI (Motor de Combustão Interna) é a máquina térmica mais utilizada para essa finalidade presente em 40 % das plantas, a turbina a gás foi avaliada em 30 % dos estudos, e equipamentos como o ORC (Ciclo Rankine Orgânico) e células a combustível fazem parte do objeto de estudo de 30 % dos artigos.

A partir da pesquisa e dos filtros aplicados a revisão indicou que 70 % dos artigos utilizaram o método termoeconômico SPECO (*Specific Exergy Costing*), enquanto o restante 30 % das plantas foram avaliada com método exergoeconômico TCE.

Além da análise de características específicas dos estudos como a máquina térmica e o combustível utilizado em cada uma das plantas, foi feita uma síntese de alguns artigos avaliados, reunindo as principais informações dos estudos:

O estudo de Chitsaz et al (2017) avaliou um sistema de trigerção que produz energia elétrica, refrigeração e aquecimento através de uma SOFC (Célula de Combustível de Óxido Sólido) que utiliza metano como combustível. O modelo é avaliado pelas equações de balanço de massa, energia e exergia, aplicando o método termoeconômico TCE. Como principais resultados a eficiência energética e exérgica do sistema de trigerção são: 81,49% e 50,71% respectivamente.

O estudo de Ji-chao e Sobhani (2021) avaliou um sistema de cogeração baseado em uma combinação de um ciclo de turbina a gás que utiliza biomassa como combustível, um ciclo de CO₂ supercrítico e um ciclo Kalina, concebido para aquecimento e geração de energia. Foi feita uma análise energética, exérgica e exergoeconômica, aplicando o método termoeconômico TCE. De acordo com os principais resultados a eficiência energética e exérgica do sistema tem valor equivalente a: 78,15% e 40,97%, respectivamente.

Schröder et al (2020) estudou um sistema de poligeração que produz hidrogênio, eletricidade e vapor de processo para aquecimento de água. A planta foi analisada por meio do método exergoeconômico SPECO. O principal componente da

unidade de poligeração em termos de destruição de exergia é um motor de combustão interna que utiliza metano como combustível. Como principais resultados o estudo de variação paramétrica atingiu eficiência exergética geral equivalente a 66%, representando 18% a mais, comparando regimes variáveis de operação.

O estudo de Wang et al (2020) propôs um novo sistema de trigeriação composto por um ciclo de turbina a gás (ciclo de Brayton) utilizando metano como combustível, um ciclo Rankine orgânico e um ciclo de refrigeração por absorção. O estudo realizou avaliação termodinâmica e exergoeconômica utilizando o método SPECO. Como principais resultados do estudo pode se destacar os valores de potência líquida, capacidade de refrigeração e carga de aquecimento equivalentes a 40,65 MW, 6,02 MW e 6,02 MW, respectivamente.

1.3.2 Conclusão da revisão sistemática

A partir da avaliação dos artigos selecionados com os critérios de inclusão e exclusão da revisão sistemática, observou-se elevado grau de versatilidade levando em conta a máquina térmica, e o tipo de combustível utilizando nas plantas de produção de energia combinada. A maior parte dos combustíveis empregados nas unidades são renováveis, o que indica esforços relacionados a diminuição dos impactos ambientais, oriundos da operação de plantas de conversão de energia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TERMOECONOMIA

Para Bejan et al (1996) a termoeconomia é o ramo da engenharia que combina análise exergetica e princípios econômicos para fornecer ao projetista ou operador do sistema, informações não disponíveis por meio de análises convencionais de energia e avaliações econômicas, dessa forma pode-se considerar a termoeconomia como o estudo da minimização de custos auxiliada pelos valores exergeticos do sistema.

De acordo com Moran e Shapiro (2018) o termo termoeconomia ou exergoeconomia é aplicado quando a modelagem de sistemas termodinâmicos é feita levando em conta consideração explícitas de economia, a utilização desse tipo de análises é feita através da aplicação de metodologias que combinam exergia e economia.

Segundo Moran e Shapiro (2018) avaliar o custo dos vários fluxos e processos em uma planta ajuda a entender o processo de formação de custos, desde os recursos de entrada até os produtos finais, estes processos podem resolver problemas complexos em sistemas de energia, que normalmente não pode ser resolvido usando análise de energia convencional com base na primeira lei da termodinâmica (somente balanços de massa e energia), podendo-se destacar:

- Avaliação racional de preços de produtos;
- Otimização de variáveis específicas da unidade de processo para minimizar os custos do produto final e economizar energia de recursos;
- Detecção de ineficiências e cálculo de seus efeitos econômicos de plantas em operação;
- Avaliação de várias alternativas de projeto ou decisões de operação e maximização da lucratividade;
- Auditorias energéticas.

Todas as metodologias termoeconômicas usam custos baseados na segunda lei da termodinâmica, o que permite qualificar os processos de um sistema, quanto ao uso dos recursos energéticos.

2.2 MÉTODOS TERMOECONÔMICOS

Ao longo das últimas décadas foram publicados diversos estudos relacionados a aplicação de metodologias termoeconômicas, desde estudos como o de Lozano e Valero (1993) que avaliou ciclos de potência aplicando o método TCE, até estudos mais recentes como o de Fortes et al (2018), que aplica o método UFS (Energia Interna, Trabalho do Fluxo e Entropia) em uma bomba de calor utilizada para desidratação de alimentos e produção de água. Pode-se ainda destacar estudos como o de Haydargil e Abuşoğlu (2018) que aplica e compara 4 diferentes métodos termoeconômicos em um sistema de cogeração movido a biogás, onde o parâmetro mais importante avaliado é o custo do trabalho produzido pelo motor a gás.

As próximas seções exploram alguns tipos de métodos termoeconômicos.

2.2.1 SPECO

Para Lazzaretto e Tsatsaronis (2006) o método exergoeconômico SPECO (*Specific Exergy Costing*) é constituído de 3 principais etapas.

De acordo com Lazzaretto e Tsatsaronis (2006) inicialmente deve-se decidir se a análise dos componentes deve ser conduzida usando exergia total, ou formas separadas da exergia total de um fluxo de material (por exemplo exergia, térmica, mecânicas e químicas). A consideração de formas de exergia separadas, melhora a precisão dos resultados. No entanto, esta melhoria é muitas vezes marginal e não é necessária para extrair as principais conclusões da avaliação exergoeconômica. A segunda etapa consiste em definir os insumos e produtos do sistema avaliado, os valores levam em conta a exergia em cada um dos fluxos da planta. A terceira e última etapa consiste na modelagem das equações de custo, as equações denotam custos médios por unidade de exergia, associados a entrada e saída de um fluxo, transferência de calor e trabalho.

2.2.2 Modelo E&S

De acordo com Santos et al (2009) o modelo E&S: Negentropia como um fluxo de componente de exergia, surge como uma ferramenta que permite quantificar por

exemplo, o produto do condensador em uma planta de ciclo a vapor, o que não era possível antes porque o condensador é um componente dissipativo, cujo produto não pode ser expresso em termos de exergia. Quando a negentropia é incorporada ao método termoeconômico E&S, é introduzido um fluxo fictício, juntando-se ao fluxo de exergia, a fim de definir os custos associados aos dispositivos dissipativos dos sistemas, ao contabilizar esses custos o método permite avaliar todos os componentes da planta, em termos de custo financeiro por unidade de exergia, independente do componente representar um equipamento dissipativo ou não.

2.2.3 TCE

O método termoeconômico TCE (Teoria do Custo Exergético), trata-se da ferramenta implementado neste estudo, esse método foi inicialmente explorado por Lozano e Valero (1993) que indicou o custo exergético de um fluxo de massa e/ou energia associado a quantidade de exergia usada para produzi-lo.

2.2.3.1 *Custo exergético*

De acordo com Lozano e Valero (1993) a aplicação do método TCE baseia-se na aplicação de cinco preposições distintas, as preposições buscam igualar o número de incógnitas ao número de equação linearmente independentes, possibilitando obter o custo exergético, a partir da quantidade de recursos exergéticos necessários para produzir um fluxo.

- Preposição 01: O custo exergético é uma propriedade conservativa, portanto, para cada componente o custo dos fluxos de entradas é igual ao custo da saída, equação 01.

$$\sum_{ent} Ex^* = \sum_{sai} Ex^* \quad (01)$$

- Preposição 02: Para um volume de controle com mais de um insumo energético entrando ou saindo, os custos exergéticos unitários que entram num

subsistema, será igual aos custos exergéticos unitários dos fluxos de exergia que saem, equação 02.

$$Ex_{ent}^*/Ex_{ent} = Ex_{sai}^*/Ex_{sai} \rightarrow k_{ent} = k_{sai} \quad (02)$$

- Preposição 03: Se o produto de um componente tiver vários fluxos de saída, a mesma unidade de custo exergético será atribuído a todos eles, equação 03.

$$Ex_a^*/Ex_a = Ex_a'^*/Ex_a' \rightarrow k_a = k_a' \quad (03)$$

- Preposição 04: Todos os custos gerados pelo processo de produção devem ser incluídos no custo dos produtos finais. Na ausência de uma avaliação externa, temos que atribuir um valor zero para o custo das perdas da planta. Isso nos permite formular tantas equações quanto os fluxos de perda existentes, equação 04.

$$Ex_{pe}^*/Ex_{pe} = 0 \quad (04)$$

- Preposição 05: Na ausência de valoração externa, o custo de exergia de cada fluxo que entra na planta é igual ao seu valor exergético, equação 05.

$$Ex_{ent}^* = Ex_{ent} \quad (05)$$

2.2.4 Custo monetário

De acordo com Lozano e Valero (1993) o custo monetário leva em consideração o custo econômico do combustível consumido, bem como o custo de instalação e operação da planta e define a quantidade de dinheiro consumida para gerar uma massa e/ou fluxo de energia. Esses custos são uma medida da eficiência econômica de um processo. Da mesma forma, o custo monetário unitário de um fluxo de massa e/ou energia, é a quantidade de unidades monetárias necessárias para obter uma unidade de exergia.

A equação 06 adaptada de Moran e Shapiro (2018) é utilizada para calcular a taxa de custo dos fluxos.

$$\dot{Z} + \sum_{\text{ent}} \dot{C} = \sum_{\text{sai}} \dot{C} \quad (06)$$

Em alguns casos a aplicação somente do balanço de custo representado da equação 06, não é suficiente para valorar a taxa de custo de todos os fluxos, porque alguns volumes de controle possuem mais incógnitas do que equações linearmente independentes. Esse problema pode ser resolvido através da aplicação das preposições do método TCE, equações modeladas de acordo com Lozano e Valero (1993), na base monetária, ao invés da base exergética.

2.3 SISTEMAS DE GERAÇÃO COMBINADA DE ENERGIA

De acordo com Pilatowsky et al (2011) o uso simultâneo de energia permite alcançar altos níveis de eficiência energética, menores emissões de CO₂, segurança de abastecimento e redução no desperdício de energia. Os sistemas de geração combinada de energia são frequentemente classificados como: cogeração, trigeração e poligeração.

2.3.1 Cogeração

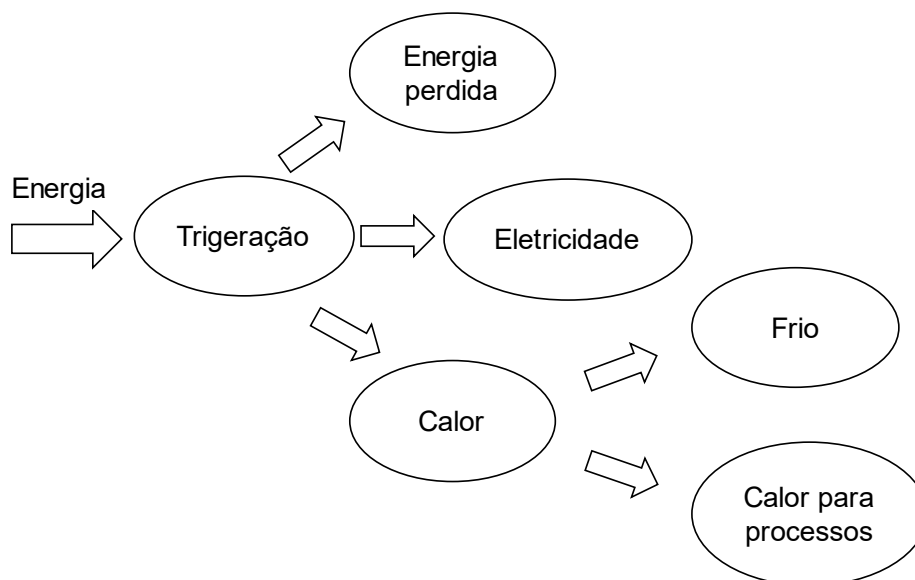
. Para Moreira (2021) a cogeração consiste no processo de produção simultânea ou sequencial de duas formas de energia a partir de um único combustível como óleo, carvão, gás natural ou liquefeito, biomassa e energia solar, considerando-se o gás natural o combustível mais utilizado nos processos de cogeração de energia. Em geral observa-se sistemas de cogeração com uso baseado em energia térmica e mecânica.

2.3.2 Trigeração

De acordo com Pilatowsky et al (2011) se for necessário ou outro sistema de conversão de energia, e este for produzido pela mesma fonte energética, este processo é conhecido como trigeração, em geral observa-se sistemas de produção

simultânea de eletricidade, calor e frio. A Figura 02 representa um exemplo da dinâmica do consumo energético em um sistema de trigeração.

Figura 2 - Configuração do sistema de trigeração



Fonte: Adaptado de Pilatowsky et al (2011)

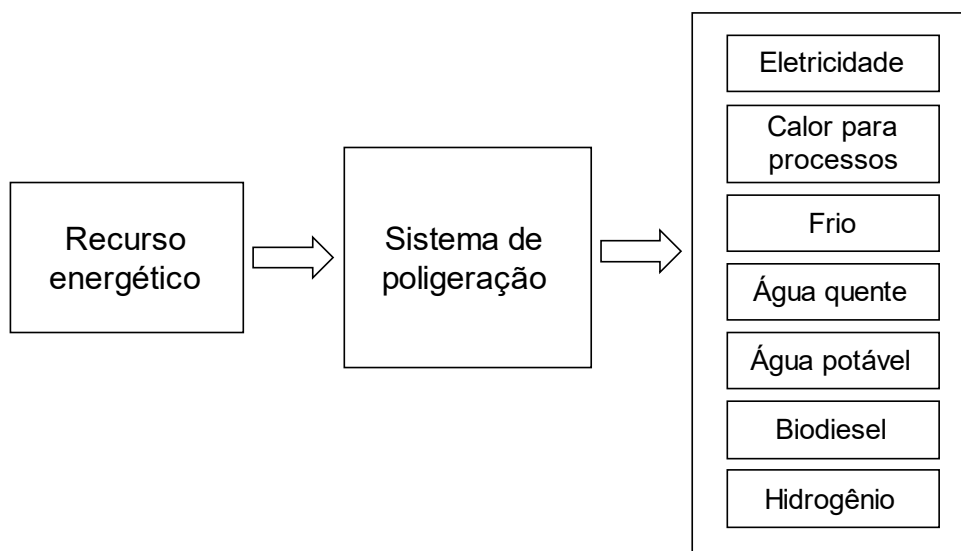
O processo de trigeração aumenta a eficiência energética devido à melhor utilização do calor residual, frequentemente sendo empregado em sistemas de resfriamento. De acordo com Pilatowsky et al (2011) esse resfriamento pode ser feito através de ciclos de refrigeração por absorção ou adsorção, esses sistemas são adaptados para recuperar calor residual industrial e comercial, líquido quente ou gás quente e vapor, para fornecer frio para ar condicionado ou processos de baixa temperatura, pois é possível atingir altas taxas de desempenho usando fluxos térmicos residuais em temperatura relativamente baixa.

2.3.3 Poligeração

Segundo Francesco et al (2022) o tema poligeração não é novo, e vários estudos abordaram esse tipo de sistema nos últimos anos, tais sistemas representam um conceito inovador e atraente, pois podem fornecer simultaneamente vários vetores de energia (refrigeração, aquecimento e energia) e outros subprodutos (água doce, gás de síntese, uréia, H₂, entre outros), a partir de fontes de energia renováveis (solar,

biomassa, geotérmica, eólica, entre outras) e combustíveis fósseis. A figura indica a representação dos sistemas de poligeração.

Figura 3 - Configuração do sistema de poligeração



Fonte: Adaptado de Amidpour e Manesh (2021)

De acordo com Amidpour e Manesh (2021) Devido às questões mais urgentes que surgiram em relação a disponibilidade de combustíveis fósseis ou não renováveis e seu impacto ambiental, os sistemas de poligeração tornaram-se particularmente interessantes, principalmente devido aos seus possíveis arranjos e integração com fontes de energia renováveis.

Para Amidpour e Manesh (2021) embora a poligeração represente uma solução positiva com a multigeração, resultando em redução no consumo de energia, os sistemas de poligeração ainda são pouco utilizados em todo o mundo, a produção de energia obtida a partir das plantas de poligeração representam apenas 10% da produção de energia, a Holanda, Dinamarca e Finlândia são exceções: nesses países, a penetração dos sistemas de poligeração atingiu até 50% do total de usinas, atualmente, vários países da União Europeia reconhecem as usinas de poligeração como uma tecnologia eficiente e sustentável, estratégica para incentivar a redução das emissões de gases de efeito estufa. A tabela 02 representa o panorama de aplicações dos sistemas de poligeração.

Tabela 2 – Campos de aplicação dos sistemas de poligeração

	Industrial	Comercial	Institucional
Aplicação	Refinamento	Hotéis	Hospitais
	Borracha e plásticos	Lavanderias	Escolas
	Gás natural	Restaurantes	Universidades
	Têxteis	Supermercados	Conjuntos habitacionais
	Cimento	Edifícios verdes	Tratamento de água
Temperatura do fluido de trabalho	Alta	Média ou baixa	Média ou baixa
Capacidade produtiva	1 - 500 MW	1 kW - 10 MW	1 kW - 10 MW

Fonte: Adaptado de Amidpour e Manesh (2021)

2.4 ENERGIA

De acordo com Moreira (2021) o conceito científico de energia é de difícil entendimento, por se tratar de uma grandeza física proveniente do inter-relacionamento entre dois sistemas físicos, a origem da palavra energia provém do grego, e seu significado está associado com a capacidade de realização do trabalho. Entre as diversas formas em que se apresenta na natureza, a energia pode ser transformada de uma forma em outra por meio dos chamados processos de conversão de energia.

2.4.1 Formas de energia

Moreira (2021) indica e define as principais formas de energias, destacando:

- Energia solar: fonte de energia renovável e inesgotável, proveniente das radiações eletromagnéticas emitidas pelo Sol, na forma de calor e luz;
- Energia química: é a energia acumulada nas ligações químicas entre os átomos das moléculas, as principais fontes de energia química são os hidrocarbonetos provenientes do refino do petróleo, como os óleos

combustíveis, a gasolina, o gás liquefeito de petróleo, além do gás natural. Além dessas, existem também a lenha, o etanol, o carvão mineral, o carvão vegetal, a biomassa, o biogás, o biometano e o hidrogênio;

- Energia elétrica: normalmente associada à circulação de cargas elétricas através de um campo de potencial elétrico, pode-se também considerar sua presença em cargas estacionárias, como nos capacitores elétricos ou em nuvens eletricamente carregadas;
- Energia mecânica: pode ser encontrada nas formas potencial e cinética, além da forma de eixo girante, como nos eixos de motores e turbinas;
- Energia eletromagnética: tipo de energia acumulada na forma de campos eletromagnéticos, que é utilizada de modo prático no transporte e na transformação de energia elétrica em transformadores.

2.4.2 Energia renovável

Para Santos (2013) o aproveitamento de fontes alternativas de energia (eólica, solar, hidráulica entre outras.) representa um grande desafio para a humanidade no sentido de atender à demanda mundial de energias, essas fontes deverão provocar uma menor agressão ao meio ambiente em relação às fontes advindas dos combustíveis fósseis e também terão de ser competitivas economicamente.

2.4.2.1 Biogás

De acordo com Abbasi et al (2012) quando a matéria orgânica (alimentos, restos de plantas, esterco animal, lodo de esgoto, porções biodegradáveis de resíduos sólidos urbanos, entre outros.) sofre decomposição em a ausência de oxigênio livre, normalmente gera um gás que consiste em 40% a 70% metano, sendo o restante principalmente dióxido de carbono com traços de outros gases. Se inflamado, este gás queima de forma limpa (ou seja, não emite fuligem ou mau cheiro) semelhante ao GLP (gás liquefeito de petróleo) ou GNC (gás natural comprimido). Este gás é comumente chamado de biogás, a palavra biogás é usada exclusivamente para

denotar o combustível constituído por CH₄ e CO₂ (além de vestígios de outros gases) que é gerado pela decomposição anaeróbica da matéria orgânica.

2.4.2.2 *Energia solar*

Segundo Vian et al (2021) atualmente a tecnologia fotovoltaica, que transforma energia solar em elétrica, vem experimentando importante avanço, impulsionado pelos vários pontos positivos que apresenta, dentre os quais se destacam o baixo impacto ambiental, a flexibilidade de utilização e facilidade de construção e de operação.

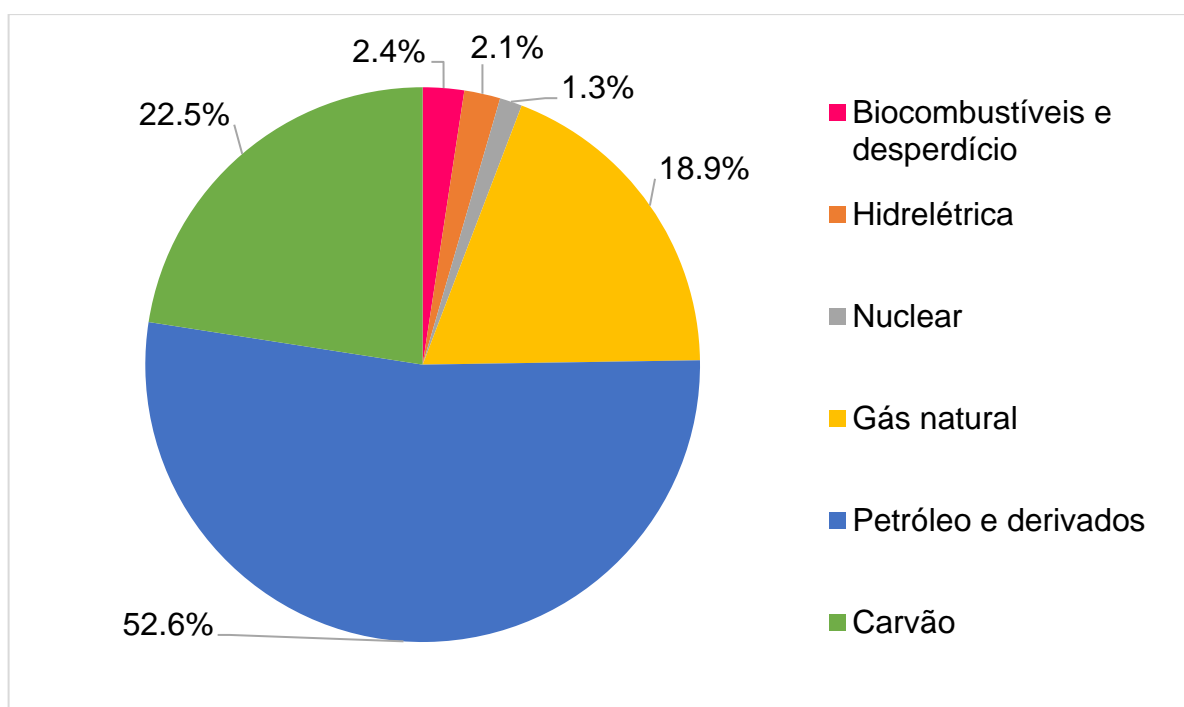
Para Vian et al (2021) por várias décadas a oferta de energia fotovoltaica teve como principal obstáculo o alto custo que apresentava, no entanto, nos últimos anos houve uma expressiva expansão da utilização no mundo todo dessa tecnologia com redução de custo, graças a intensas pesquisas motivadas por incentivos de governo e demanda crescente por fontes limpas.

2.4.3 **Matriz energética mundial**

Moreira (2021) indica que a matriz energética é o panorama de distribuição real de aproveitamento dos recursos energéticos dentro de um país, de uma região ou do mundo, sua determinação está diretamente vinculada ao balanço energético, e sua aplicação consiste em estudos setoriais, com finalidade de apresentar a evolução da demanda e da oferta de energia de um país, região ou de todo o mundo.

A figura 04 apresenta o suprimento total de energia primária no mundo no ano de 1973, de acordo com IEA (2021) o valor total de energia primária utilizada neste ano foi equivalente a 254 EJ.

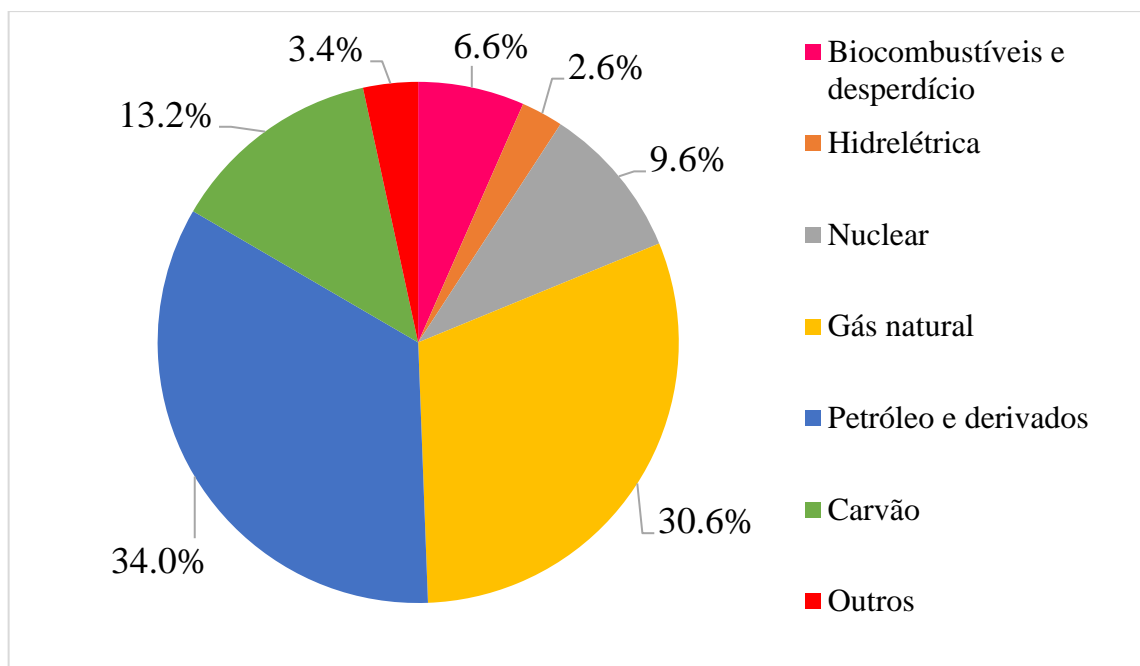
Figura 4 - Suprimento total de energia primária no mundo (1973)



Fonte: Adaptado de IEA (2021)

A figura 05 também apresenta o suprimento total de energia primária no mundo, no entanto os valores indicados estão relacionados ao ano de 2019, de acordo com IEA (2021) o valor total de energia primária utilizada neste ano foi equivalente a 606 EJ, um aumento de 352 EJ em 46 anos.

Figura 5 - Suprimento total de energia primária no mundo (2019)

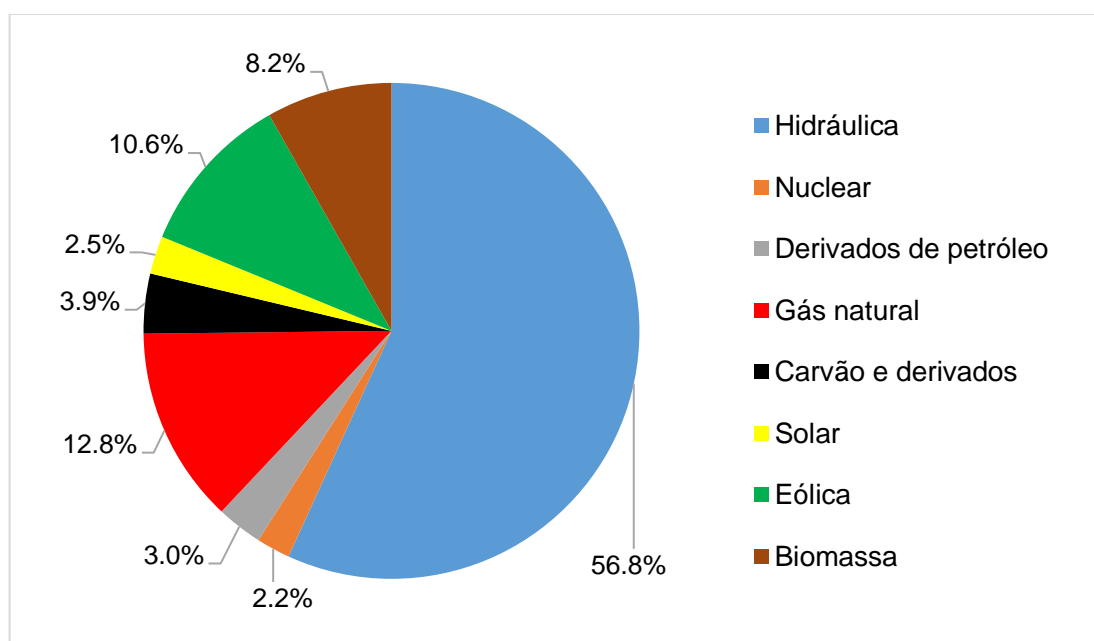


Fonte: Adaptado de IEA (2021)

2.4.4 Matriz energética brasileira

No contexto nacional a matriz energética brasileira está representada pela figura 06 que indica a oferta de energia elétrica no país no ano de 2021.

Figura 6 – Matriz energética brasileira.



Fonte: Adaptado de BEN (2022)

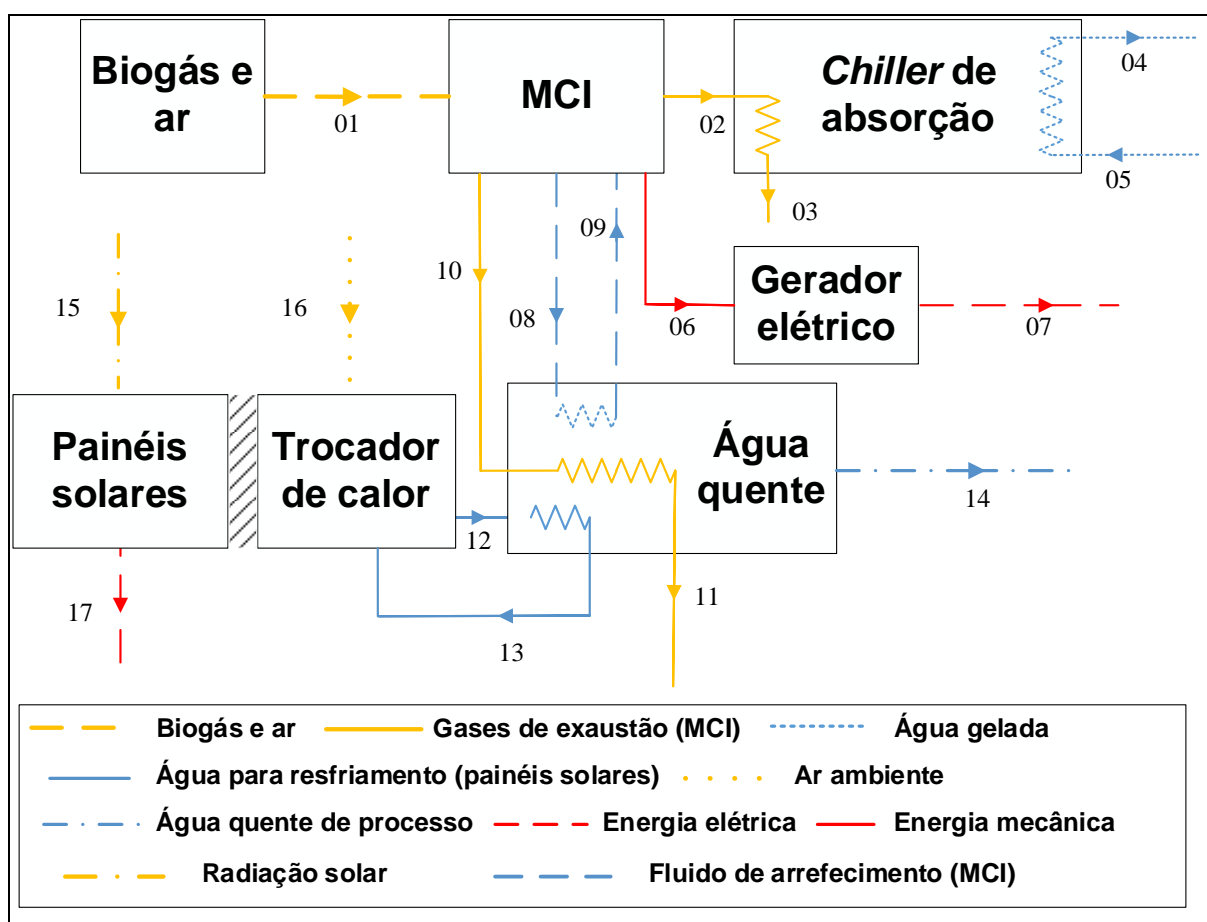
De acordo com dados disponíveis no relatório de BEN (2022) o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a fonte hídrica que responde por 53,4% da oferta interna. Considerando que quase a totalidade das importações são oriundas da usina de Itaipu, a fonte hídrica atinge valor equivalente a 57%. As fontes renováveis representam 78,1% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável.

3 METODOLOGIA

3.1 DESCRIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

A configuração apresentada na figura 7 trata-se de uma proposta teórica de um sistema de poligeração que pode ser empregado em condomínios, shopping centers, prédios, entre outras instalações com capacidade de produção de matéria orgânica que pode ser convertida em biogás e utilizada como combustível.

Figura 7 - Unidade de poligeração proposta



Fonte: Produzido pelo autor (2023)

Os equipamentos empregados na planta, foram avaliados em outros trabalhos, de maneira separada ou em artigos que estudam outros sistemas de poligeração.

A unidade é constituída por um MCI (motor de combustão interna) com ignição por centelha, conectado a um gerador de energia elétrica. Além de fornecer trabalho

útil ao gerador o MCI tem os gases de exaustão recuperados para um sistema de refrigeração por absorção. Outro constituinte da planta é um conjunto de painéis fotovoltaicos equipados com uma unidade de refrigeração, os painéis fornecem energia elétrica que pode ser utilizada de maneira simultânea ao processo de produção de energia elétrica, ou utilizado pela rede de distribuição de energia. O último componente da planta é um tanque para armazenamento de água quente que pode ser utilizado para aplicações domésticas ou industriais, o reservatório térmico absorve energia da unidade de refrigeração dos painéis solares, dos gases de exaustão e do fluido de arrefecimento do MCI.

Os equipamentos empregados na planta, foram avaliados em outros estudos, de maneira separada, como o conjunto de painéis fotovoltaicos equipados com sistema de refrigeração, apresentado no trabalho de Daghigh et al (2020). Ou em artigos que avaliam outros sistemas de produção de energia combinada, de onde foram coletados dados relacionados ao MCI e ao sistema de refrigeração por absorção, avaliados nos estudos de Yağlı et al (2016) e Marques et al (2020), respectivamente.

3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA PLANTA

3.2.1 Motor a Combustão Interna

O motor utilizado está presente no estudo de Yağlı et al (2016), utiliza como combustível biogás que após a passagem pelos filtros de tratamento (dessulfurizador e desumidificador), apresenta constituição de 55% de CH_4 e 45% de CO_2 . O motor é conectado a um gerador de energia elétrica e é equipado com sistemas de aproveitamento do calor dos gases de exaustão e do fluido de arrefecimento. As especificações da máquina térmica estão apresentadas na tabela 4.

Tabela 3 – Parâmetros do motor a combustão interna

Parâmetro	Valor	Unidade de medida
Eficiência mecânica	40,6	%
Vazão de entrada do combustível	0,088	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Poder calorífico do biogás	22,38	$\frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$
Temperatura do fluido de arrefecimento	90	°C
Temperatura dos gases de exaustão	450	°C
Fluxo de massa dos gases de exaustão	0,83	$\frac{\text{kg}}{\text{s}}$
Eficiência do trocador de calor dos gases de exaustão	80	%
Eficiência do trocador de calor do fluido de arrefecimento	90	%

Fonte: Adaptado de Yağlı et al (2016); Mariani et al (2021)

A partir dos dados indicados nos estudos de Yağlı et al (2016) e Yağlı et al (2021) relacionados ao MCI, além do estudo de Mariani et al (2021) que fornece dados relacionados ao biogás, foi calculado a quantidade de energia liberada pelo biogás na combustão do motor conforme indicado pela equação 1.

$$\dot{Q}_b = \dot{m}_b \cdot P_{ci} \quad (1)$$

A partir da taxa de calor total liberada pelo combustível e da eficiência do motor relacionada à conversão de energia mecânica em energia elétrica, obtém-se o valor da energia útil disponível pelo gerador de energia elétrica, através da equação 2.

$$\dot{W}_m = \dot{Q}_b \cdot \eta_m \quad (2)$$

A energia liberada pelo motor através dos gases de exaustão e pelo fluido de arrefecimento podem ser calculados pelas equações 3 e 4 respectivamente:

$$\dot{Q}_{\text{ext}} = (h_{\text{ext}} - h_o) \cdot \dot{m}_{\text{ext}} \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{\text{arre}} = (h_{\text{arre}} - h_o) \cdot \dot{m}_{\text{arre}} \quad (4)$$

3.2.2 Sistema de Refrigeração por Absorção

O sistema de refrigeração avaliado faz parte do trabalho de Marques et al. (2020), o equipamento utiliza como fluido refrigerante uma mistura de água e amônia. O calor fornecido ao sistema de refrigeração é resultante dos gases de exaustão do motor. Foram utilizados dois *chillers* de refrigeração, a utilização de dois equipamentos ao invés de um com maior potência de refrigeração, foi feita com base na manutenção, que pode acontecer de maneira separada. As especificações técnicas do equipamento estão disponíveis na tabela 5.

Tabela 4 – Especificações do sistema de refrigeração

Parâmetro	Valor	Unidade de medida
Capacidade de refrigeração	17,58	kW
Energia absorvida pelo chiller	58,03	kW
Eficiência do trocador de calor	80	%
Temperatura de saída da água no chiller	7	°C
Temperatura de entrada da água no chiller	12	°C

Fonte: Adaptado de Marques et al (2020).

A partir dos dados indicados na tabela 05, obtém-se a quantidade de calor requerida para o funcionamento do sistema de refrigeração por absorção, a equação 5 descreve o fluxo de massa dos gases de exaustão necessários para fornecer calor ao *chiller* de absorção.

$$\dot{m}_{\text{ext}} = \frac{\dot{Q}_{\text{abs}}}{(h_{\text{ext}} - h_o) \cdot \eta_{\text{abs}}} \quad (5)$$

A quantidade de energia requerida foi calculada levando em conta o valor da eficiência do trocador de calor conforme é indicado por Marques et al (2020).

De posse do fluxo de massa dos gases de escape destinados ao *chiller*, equação 5, pode-se aplicar a equação 6 e quantificar a razão dos gases de exaustão utilizados no sistema de refrigeração.

$$\alpha = \frac{\dot{m}_{abs}}{\dot{m}_{ext}} \quad (6)$$

3.2.3 Painéis Fotovoltaicos

O painel fotovoltaico empregado na planta de poligeração está presente no estudo de Daghigh et al (2020), este painel é o do tipo célula monocristalina, suas especificações estão listadas na tabela 6.

Tabela 5 – Parâmetros dos painéis fotovoltaicos

Parâmetro	Valor	Unidade de medida
Potência de Pico	80,0	W
Temperatura de operação	-40,0 a 85,0	°C
Taxa de conversão de energia mensal (painel sem trocador de calor)	28,24	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Taxa de conversão de energia mensal (painel com trocador de calor)	30,34	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}$
Área dos painéis fotovoltaicos	20,90	m^2

Fonte: Adaptado de Daghigh et al (2020)

A equação 7 é utilizada para calcular a quantidade de energia solar convertida em energia elétrica.

$$\dot{W}_{ele} = \frac{\dot{W}_p \cdot A_p}{t} \quad (7)$$

Os painéis fotovoltaicos são equipados com um sistema de refrigeração, também avaliado no estudo de Daghigh et al (2020), esse sistema conta com um

trocador de calor posicionado na parte inferior das placas, fixado ao painel com adesivo de silicone, água é utilizada como fluido refrigerante escoando através dos dutos de aço. A tabela 7 fornece informações desse sistema.

Tabela 6 –Especificações do sistema de refrigeração dos painéis

Parâmetro	Valor	Unidade de medida
Área exposta a radiação solar (1 painel)	0,52	m ²
Temperatura de entrada do fluido de resfriamento	35,0	°C
Temperatura de saída do fluido de resfriamento	58,0	°C
Taxa média de radiação solar	1000	$\frac{W}{m^2}$
Fluxo de massa do fluido de resfriamento	0,012	kg/s

Fonte: Adaptado de Daghigh et al (2020)

3.2.4 Tanque Para Armazenamento de Água Quente

As equações 8 e 9 estão relacionadas a energia armazenada pelo tanque de água quente, dissipada pelos gases de escape e pelo fluido de arrefecimento do motor de combustão interna, respectivamente.

$$\dot{Q}_{\text{ext}} = (1 - \alpha) \cdot \dot{m}_{\text{ext}} \cdot (h_{\text{ext}} - h_o) \cdot \eta_{\text{ext}} \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{\text{arre}} = \dot{m}_{\text{arre}} \cdot (h_{\text{arre}} - h_o) \cdot \eta_{\text{arre}} \quad (9)$$

A equação 10 representa a energia dissipada pelo fluido da unidade de refrigeração dos painéis solares.

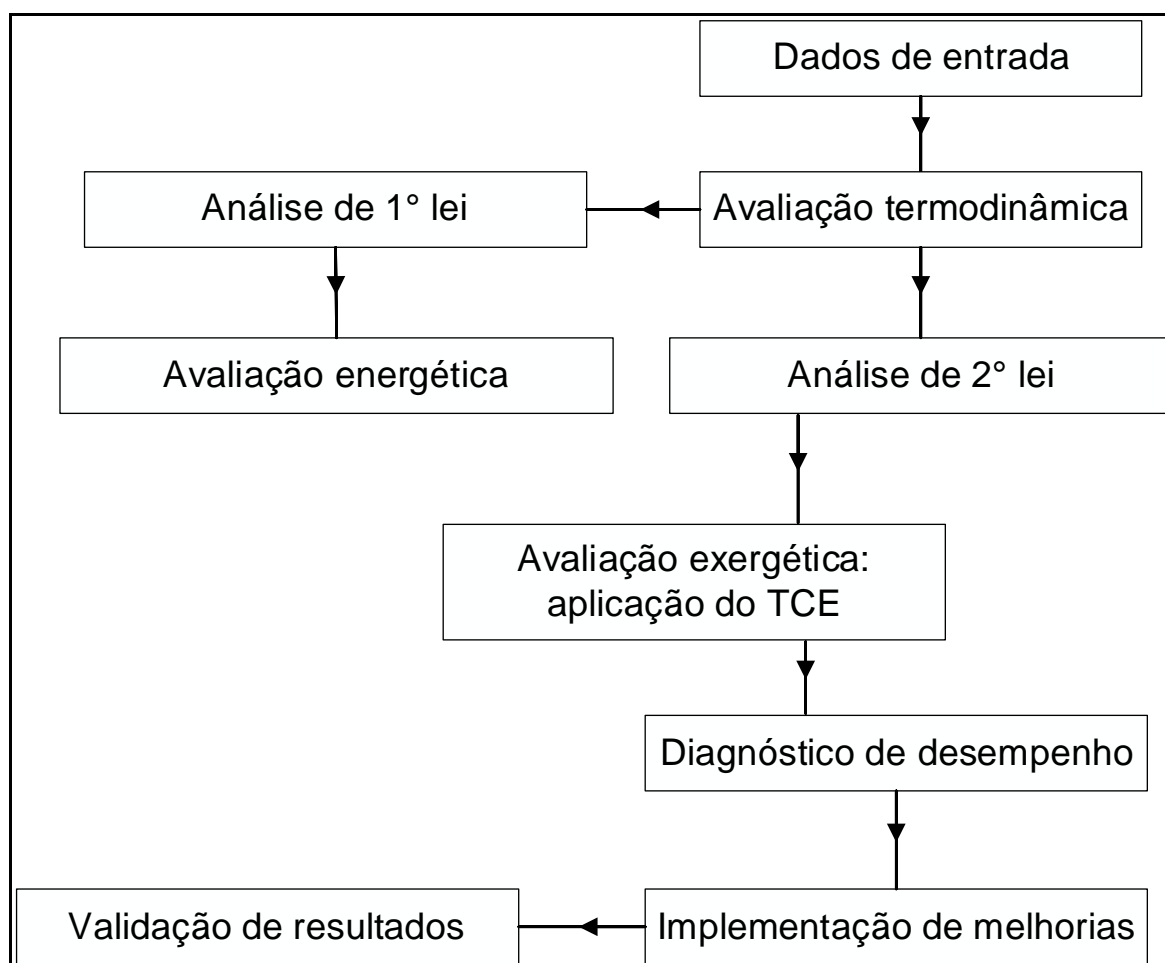
$$\dot{Q}_p = \dot{m}_p \cdot (h_p - h_o) \cdot \eta_p \quad (10)$$

O tempo de operação dos painéis é considerado o mesmo da planta de poligeração (7 horas por dia).

3.3 DIAGRAMA DE BLOCOS DO ESTUDO

A figura 08 representa um diagrama de blocos da avaliação energética, exergetica e exergoeconômica da unidade de poligeração.

Figura 8 – Diagrama de bloco da avaliação termodinâmica



Fonte: Produzido pelo autor (2023)

A partir dos dados de entrada de cada um dos pontos indicados no objeto de estudo (figura 07), foi escrito o código computacional no EES (*Engineering Equation Solver*) inicialmente definido o estado termodinâmico de todos os fluxos com ao menos duas propriedades conhecidas, o segundo passo para a avaliação termodinâmica é aplicar o balanço de energia, o que possibilita definir as propriedades dos fluxos desconhecidos.

De posse de todas as propriedades dos fluxos (fluxo de massa, temperatura, pressão, entalpia, entre outras) foi feita a avaliação de 1º lei da termodinâmica, que

consiste na avaliação energética, a partir dessa etapa é possível obter os valores de energia dissipada ou absorvida de todos os componentes, além da eficiência de cada um dos componentes da planta e da unidade de poligeração.

A avaliação da 2ª lei da termodinâmica (avaliação exergetica) permite quantificar os valores de exergia de todos os fluxos. A partir desses valores foi aplicado o método exergoeconômico TCE, como resultados foram obtidos os valores de custo exergetico e eficiência exergetica, de cada um dos componentes e da planta de poligeração.

A aplicação do método termoeconômico permite realizar o diagnóstico de desempenho dos componentes, indicando as principais ineficiências e os equipamentos mais sensíveis a melhorias. A partir desse diagnóstico é feita a implementação de melhorias na operação da planta, alterando parâmetros do código computacional. Após a mudança é feita uma validação de resultados, utilizando como base outros estudos já validados.

3.4 AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA

3.4.1 Hipóteses Simplificadoras

- Cada volume de controle avaliado na planta opera em regime permanente;
- As variações de energia cinética e potencial gravitacional são desprezíveis;
- As quedas de pressão e dissipação de calor através das tubulações são desprezíveis;
- A água de alimentação do tanque para armazenamento de energia térmica e o ar do motor a combustão possuem custo desprezível;
- A combustão do motor ocorre de maneira completa;
- Propriedades da água dessalinizada foram consideradas para o fluido de arrefecimento do MCI;
- A operação da planta ocorre durante o período matutino e vespertino;
- No sistema de painéis solares, apenas o trocador de calor dos painéis faz parte da avaliação exergoeconômica;
- Foi considerado tempo de operação da planta equivalente a 7 horas por dia.

3.4.2 Avaliação energética

A equação 11 indica o balanço de massa, avaliado em todos os volumes de controle da planta.

$$\sum_{ent} \dot{m} = \sum_{sai} \dot{m} \quad (11)$$

A equação 12, adaptada de Çengel e Boles (2013) representa o balanço de energia, nessa equação foram suprimidos os termos relacionados a energia cinética e energia potencial gravitacional, conforme indicado nas hipóteses simplificadoras. Outros termos podem também ser desconsiderados a depender do volume de controle avaliado.

$$\dot{Q}_{ent} + \dot{W}_{ent} + \sum_{ent} \dot{m} \cdot h = \dot{Q}_{sai} + \dot{W}_{sai} + \sum_{sai} \dot{m} \cdot h \quad (12)$$

3.4.2.1 Avaliação energética do MCI

O balanço de massa dos gases de exaustão e do fluido de arrefecimento do MCI está representada pelas equações 13 e 14, respectivamente.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_{10} \quad (13)$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (14)$$

A equações 15 representa o balanço energético do MCI.

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 = \dot{m}_2 \cdot (h_2 - h_3) + \dot{m}_{10} \cdot (h_{10} - h_{11}) + \dot{m}_8 \cdot (h_8 - h_9) + \dot{W}_6 \quad (15)$$

3.4.2.2 Avaliação energética do Chiller de absorção

As equações 16 e 17 indicam o balanço de massa dos gases de exaustão e da circulação de água gelada no chiller, respectivamente.

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{10} \quad (16)$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad (17)$$

A equação 18 representa o balanço energético do *chiller* de absorção.

$$\dot{m}_2 \cdot h_2 = \dot{Q}_{\text{eva}} \quad (18)$$

3.4.2.3 Avaliação energética do painel solar

A equação 19 está relacionada ao balanço de massa e a equação 20 ao balanço energético, ambas associadas ao sistema de refrigeração dos painéis solares.

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} \quad (19)$$

$$\dot{m}_{12} \cdot h_{12} = \dot{m}_{13} \cdot h_{13} \quad (20)$$

3.4.2.4 Avaliação energética do tanque de água quente

As equações 21 a 23 indicam o balanço de massa do tanque para armazenamento de água quente.

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \quad (21)$$

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} \quad (22)$$

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} \quad (23)$$

A equação 24 indica o balanço energético do sistema para armazenamento de energia térmica.

$$\dot{m}_{14} \cdot h_{14} = (\dot{m}_{12} \cdot h_{12} - \dot{m}_{13} \cdot h_{13}) + (\dot{m}_{10} \cdot h_{10} - \dot{m}_{11} \cdot h_{11}) + (\dot{m}_8 \cdot h_8 - \dot{m}_9 \cdot h_9) \quad (24)$$

3.4.2.5 Fator de utilização da planta

Com base nos insumos e produtos de cada um dos equipamentos da planta a equação 25 representa o fator de utilização total da planta.

$$\frac{\dot{W}_m + \dot{W}_p + \dot{Q}_{eva} + \dot{Q}_{taq}}{\dot{Q}_b + \dot{W}_{bomb}} \quad (25)$$

3.4.3 Avaliação exergetica

De acordo com Moran e Shapiro (2018) exergia é o máximo trabalho teórico possível de ser obtido a partir de um sistema global, composto por um sistema e o ambiente, conforme este entra em equilíbrio com o ambiente (atinge o estado morto).

A equação 26 foi adaptada de Çengel e Boles (2013), representa a exergia específica de escoamento dos fluxos em cada um dos pontos da planta.

$$e_x = (h - h_o) - t_o \cdot (s - s_o) \quad (26)$$

A exergia, assim como a energia, pode ser transferida para, ou de um sistema de três formas: calor, trabalho e fluxo de massa (ÇENGEL e BOLES, 2013), as equações 27 a 29 representam os três casos respectivamente.

$$E\dot{x}_{calor} = \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) \cdot \dot{Q} \quad (27)$$

$$E\dot{x}_{trabalho} = \dot{W}_{\acute{u}til} \quad (28)$$

$$E\dot{x}_{massa} = \dot{m} \cdot e_x \quad (29)$$

De acordo com Moran et al (2015) a variação de exergia de um sistema durante um processo não é necessariamente igual à exergia líquida transferida, porque a exergia pode ser destruída se estiverem presentes irreversibilidades no sistema durante o processo. A equação 30 indica a variação de exergia avaliada em um volume de controle em regime permanente.

$$\dot{E}x_{\text{destruída}} = \sum \dot{E}x_{\text{calor}} - \dot{E}x_{\text{trabalho}} + \sum_{\text{ent}} \dot{E}x_{\text{massa}} - \sum_{\text{sai}} \dot{E}x_{\text{massa}} \quad (30)$$

A partir da equação 30 foi elaborado a tabela 7 com as equações 31 a 34 que representam o balanço de exergia, aplicado em todos os volumes de controle da planta, em determinados equipamentos alguns termos da equação 30 podem ser suprimidos.

Tabela 7 – Balanço de exergia

Equipamento	Balanço de energia
MCI	$\dot{E}x_1 + \dot{E}x_9 = \dot{E}x_6 + \dot{E}x_2 + \dot{E}x_8 + \dot{E}x_{10} + \dot{E}x_{\text{destruída}} \quad (31)$
Chiller	$\dot{E}x_2 + \dot{E}x_5 = \dot{E}x_4 + \dot{E}x_{\text{destruída}} \quad (32)$
Painel solar	$\dot{E}x_{12} = \dot{E}x_{13} + \dot{E}x_{\text{destruída}} \quad (33)$
Tanque	$\dot{E}x_{10} + \dot{E}x_{12} + \dot{E}x_8 = \dot{E}x_{14} + \dot{E}x_{\text{destruída}} \quad (34)$

Fonte: Produzido pelo autor (2023)

Para Cavalcanti et al (2020) a exergia destruída também pode ser avaliada levando em conta os insumos e produtos dos volumes de controle da planta, com base na equação 35.

$$\dot{E}x_{\text{destruída}} = \dot{E}x_{\text{insumo}} - \dot{E}x_{\text{produto}} \quad (35)$$

De posse dos valores da equação anterior pode ser calculada a eficiência exergética do volume de controle avaliado, de acordo com Bejan et al (1996) através da equação 36.

$$\varepsilon_x = \frac{\dot{E}x_{\text{produto}}}{\dot{E}x_{\text{insumo}}} \quad (36)$$

A tabela 8 apresenta as equações 37 a 40 relacionadas a eficiência exergética de cada um dos componentes da planta.

Tabela 8 – Equações da eficiência exergética

Equipamento	Eficiência exergética
MCI	$\frac{\dot{E}x_{02} + \dot{E}x_{06} + \dot{E}x_{08} + \dot{E}x_{10}}{\dot{E}x_{01} + \dot{E}x_{09}} \quad (37)$
Chiller	$\frac{\dot{E}x_{04}}{\dot{E}x_{02} + \dot{E}x_{05}} \quad (38)$
Painel solar	$\frac{\dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{16}}{\dot{E}x_{15} + \dot{E}x_{13}} \quad (39)$
Tanque	$\frac{\dot{E}x_{14}}{\dot{E}x_{12} + \dot{E}x_{10} + \dot{E}x_{08}} \quad (40)$

Fonte: Produzido pelo autor (2023)

3.5 APLICAÇÃO DO TCE

3.5.1 Custo exergético

Para obter o custo exergético em cada fluxo da planta, as preposições do método termoeconômico TCE foram aplicadas nos equipamentos da unidade de poligeração.

3.5.1.1 Aplicação da preposição 1 do método TCE

A tabela 9 apresenta as equações 41 a 44, que consiste na aplicação da preposição 1 do TCE (balanço do custo exergético).

Tabela 9 – Equações da preposição 01 do método TCE

Equipamento	Preposição 01
MCI	$Ex_1^* = Ex_2^* + Ex_{10}^* + (Ex_8^* - Ex_9^*) + Ex_6^* \quad (41)$
Chiller	$Ex_2^* + Ex_5^* = Ex_4^* \quad (42)$
Painel solar	$Ex_{12}^* = Ex_{13}^* Ex_{14}^* \quad (43)$
Tanque	$Ex_{14}^* = (Ex_{12}^* - Ex_{13}^*) + (Ex_8^* - Ex_9^*) + (Ex_{10}^* - Ex_{11}^*) \quad (44)$

Fonte: Produzido pelo autor (2023)

3.5.1.2 Aplicação da preposição 2 do método TCE

A equação 45 relacionada a preposição 2 do método TCE (regra dos insumos), foi aplicada ao MCI da unidade de poligeração.

$$\frac{Ex_1^* + Ex_9^*}{\dot{Ex}_1 + \dot{Ex}_9} = \frac{Ex_2^* + Ex_{10}^* + Ex_8^* + Ex_6^*}{\dot{Ex}_2 + \dot{Ex}_{10} + \dot{Ex}_8 + \dot{Ex}_6} \quad (45)$$

3.5.1.3 Aplicação da preposição 3 do método TCE

A tabela 10 indica as equações 46 a 48, relacionadas a aplicação da preposição 03 do TCE (regra dos produtos).

Tabela 10 – Equações da preposição 03 do método TCE

Equipamento	Preposição 03
MCI	$\frac{Ex_2^*}{\dot{Ex}_2} = \frac{Ex_8^*}{\dot{Ex}_8} \quad (46)$
Painel solar	$\frac{Ex_{12}^*}{\dot{Ex}_{12}} = \frac{Ex_{13}^*}{\dot{Ex}_{13}} \quad (47)$
Tanque	$\frac{Ex_{14}^*}{\dot{Ex}_{14}} = \frac{(Ex_{12}^* - Ex_{13}^*) + (Ex_8^* - Ex_9^*) + (Ex_{10}^* - Ex_{11}^*)}{(\dot{Ex}_{12} - \dot{Ex}_{13}) + (\dot{Ex}_8 - \dot{Ex}_9) + (\dot{Ex}_{10} - \dot{Ex}_{11})} \quad (48)$

Fonte: Produzido pelo autor (2023)

3.5.1.4 Aplicação da preposição 4 do método TCE

As equações 49 e 50 estão associadas a aplicação preposição 4 do TCE (fluxos relacionados a perdas do sistema).

$$Ex_3^* = 0 \quad (49)$$

$$Ex_{11}^* = 0 \quad (50)$$

3.5.1.5 Aplicação da preposição 5 do método TCE

A tabela 11 apresenta as equações 51 a 54, associada a aplicação da preposição 5 do TCE (ausência de valoração externa).

Tabela 11 – Equações da preposição 05 do método TCE

Equipamento	Preposição 05
MCI	$Ex_1^* = E\dot{x}_1$ (51)
MCI	$Ex_6^* = E\dot{x}_6$ (52)
Painel solar	$Ex_4^* = E\dot{x}_4$ (53)
Tanque	$Ex_{12}^* = E\dot{x}_{12}$ (54)

Fonte: Produzido pelo autor (2023)

Dessa forma a partir da aplicação das 5 preposições do método termoeconômico TCE, é obtido o custo exergetico de todos os pontos da planta.

3.5.2 Custo monetário

A equação 55 adaptada de Moran e Shapiro (2018) é utilizada para calcular a taxa de custo dos fluxos.

$$\dot{Z} + \sum_{ent} \dot{C} = \sum_{sai} \dot{C} \quad (55)$$

Para calcular a taxa de custo monetário foram coletados na literatura dados relacionados a aquisição do insumo (biogás), e aos valores relacionados a aquisição e manutenção dos equipamentos. A tabela 12 reúne os dados dos custos monetários.

Tabela 12 – Taxa de custo monetário dos componentes da planta

Equipamento	Valor (R\$/h)	Referência
Custo do biogás: \dot{C}_1	33,74	(Mehr et al. 2015)
MCI: \dot{Z}_1	6,71	(Zhang et al. 2019)
<i>chiller</i> : \dot{Z}_4	1,50	(Zhang et al. 2019)
Sistema de resfriamento dos painéis (bombeamento e trocador de calor): \dot{Z}_{12}	0,46	Adaptado de (Zoghi et al. 2019)
Tanque (água quente): \dot{Z}_{14}	0,57	(Zhang et al. 2019)

Fonte: Produzido pelo autor (2023)

A aplicação somente do balanço de custo representado pela equação 55, não é suficiente para valorar a taxa de custo de todos os fluxos, porque alguns volumes de controle possuem mais incógnitas do que equações linearmente independentes. Esse problema pode ser resolvido através da aplicação das preposições do método TCE, equações modeladas de acordo com Lozano e Valero (1993), na base monetária, ao invés da base exergética.

A tabela 13 apresenta as equações 56 a 59, resultante do balanço de custo monetário aplicado aos equipamentos da planta.

Tabela 13 – Equações do custo monetário do método TCE

Equipamento	Balanço de custo monetário
MCI	$\dot{C}_1 + \dot{Z}_1 = \dot{C}_2 + \dot{C}_{10} + \dot{C}_8 + \dot{C}_6$ (56)
<i>Chiller</i>	$\dot{C}_2 + \dot{Z}_4 + \dot{C}_5 = \dot{C}_4$ (57)
Painel solar	$\dot{C}_{12} + \dot{Z}_{12} = \dot{C}_{14} + \dot{C}_{13}$ (58)
Tanque	$\dot{C}_{10} + (\dot{C}_{12} - \dot{C}_{13}) + (\dot{C}_8 - \dot{C}_9) + \dot{Z}_{14} = \dot{C}_{14}$ (59)

Fonte: Produzido pelo autor (2023)

A tabela 14 indica as equações 60 a 63, obtidas através da aplicação da método TCE na base monetária.

Tabela 14 – Equações auxiliares do balanço de custo monetário

Equipamento	Equação auxiliar
MCI	$\frac{\dot{C}_8}{\dot{E}x_8} = \frac{\dot{C}_2}{\dot{E}x_2} \quad (60); \quad \frac{\dot{C}_6}{\dot{E}x_6} = \frac{\dot{C}_{10}}{\dot{E}x_{10}} \quad (61)$
Chiller	$\frac{\dot{C}_4}{\dot{E}x_4} = \frac{\dot{C}_2 + \dot{C}_5}{\dot{E}x_2 + \dot{E}x_5} \quad (62)$
Painel solar (trocador de calor)	$\frac{\dot{C}_{12}}{\dot{E}x_{12}} = \frac{\dot{C}_{13}}{\dot{E}x_{13}} \quad (63)$

Fonte: Produzido pelo autor (2023)

Dessa forma a partir das equações do balanço de custo monetário e das equações auxiliares, é possível calcular o custo monetário de todos os fluxos da planta.

3.5.3 Estudo de variação paramétrica

Com base na avaliação do custo monetário dos fluxos, foi desenvolvida uma análise de variação paramétrica, variando-se os parâmetros relacionados aos custos operacionais do MCI, *chiller* de absorção e do tanque para armazenamento de água quente, além da variação de custos do combustível (biogás). Para esta avaliação os valores superiores e inferiores foram obtidos através da soma e subtração de uma fração de 10 % do valor inicial, respectivamente. A tabela 15 apresenta estes valores.

Tabela 15 – Valores dos parâmetros de custos operacionais

Equipamento	Valor inicial	Valor inferior [+10%]	Valor superior [-10%]
MCI (\dot{Z}_1)	6,71	7,38	6,04
Chiller (\dot{Z}_4)	1,50	1,65	1,35
Tanque (\dot{Z}_{14})	0,57	0,62	0,51
Biogás (\dot{C}_1)	33,75	30,38	37,13

Fonte: Produzido pelo autor (2023)

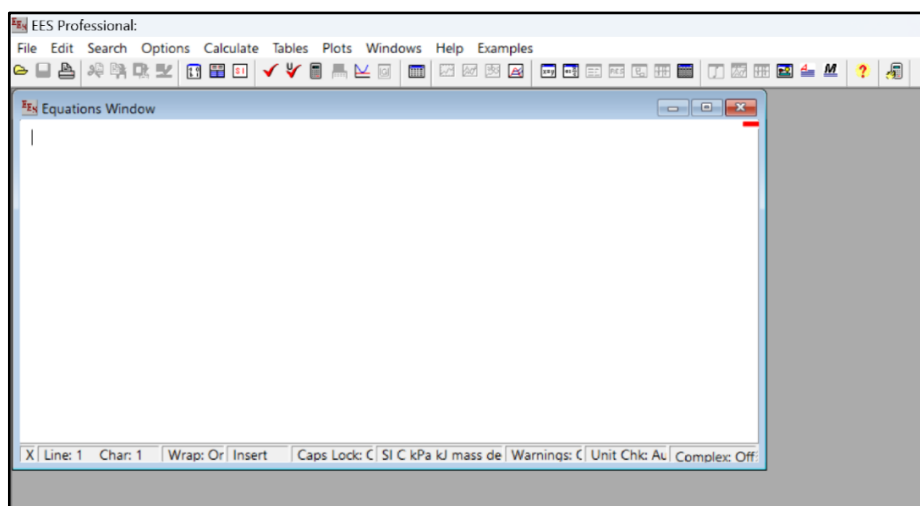
A variação de parâmetros obtida através dos valores representados na tabela 15, tem o intuito de investigar as implicações na alteração dos valores dos custos operacionais. Essas alterações podem ser ocasionadas por condições associadas a

manutenção, características construtivas e de confiabilidade dos equipamentos, local de instalação da planta, disponibilidade e demanda do combustível, entre outros fatores.

3.6 FERRAMENTA DE DIAGNÓSTICO TERMOECONÔMICO

As equações da avaliação, energética, exérgica e exergoeconômica foram resolvidas utilizando o software EES, um solucionador de equações. A interface do software EES está representada pela figura 09.

Figura 9 – Captura de tela da interface do EES

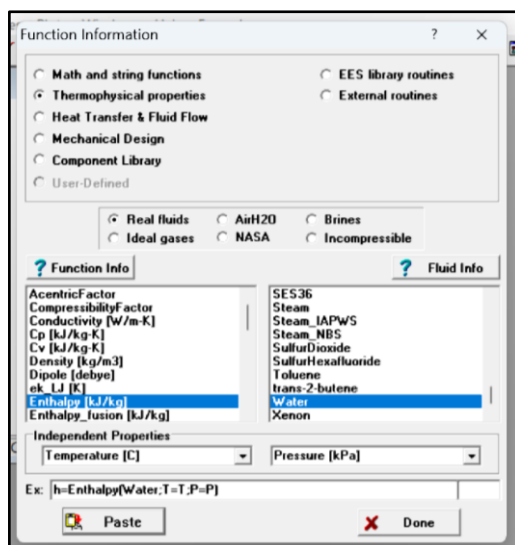


Fonte: F-Chart (2011)

De acordo com F-Chart (2011) o EES fornece muitas funções de propriedades matemáticas e termodinâmicas úteis para cálculos de engenharia, por exemplo, as tabelas de um fluido são implementadas de tal forma que qualquer propriedade termodinâmica, pode ser obtida a partir de uma chamada de função de quaisquer outras duas propriedades do fluido avaliado. A praticidade do software em relação a aquisição de propriedades termodinâmicas, faz com que esse programa de computador seja amplamente utilizado em estudos na área de ciências térmicas.

A figura 10 representa uma janela de informações a respeito das propriedades termodinâmicas de fluidos disponíveis no EES.

Figura 10 – Captura de tela, propriedades termofísicas no EES



Fonte: F-Chart (2011)

A figura 10 representa como a entalpia da água pode ser obtida através do EES, usando valores de entrada associados a temperatura e pressão da água. Assim como a entalpia, a entropia, exergia entre outras propriedades fundamentais para uma avaliação termoeconômica, podem ser obtidas pelo solucionador de equações EES.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AVALIAÇÃO ENERGÉTICA

A partir da avaliação energética foram quantificadas as principais propriedades correspondentes a cada um dos equipamentos, a tabela 16 representa esses valores. Os pontos listados na tabela estão relacionados aos pontos indicadas no objeto de estudo.

Tabela 16 – Fluxos energéticos e exeréticos da planta

Ponto	T [°C]	P [bar]	\dot{m} [kg/s]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg]	e_x [kJ/kg]	\dot{E} [kW]
1 (biogás)	30,1	1,02	0,0875	4638,00	11,64	18570	1624,88
1 (ar)	25	1,02	0,728	0	0	0	0,00
2	450	2,40	0,369	465,44	5,85	385,90	142,40
3	70	1,17	0,369	72,40	0,91	116,30	42,91
4	7	1,34	1,514	29,51	0,11	93,52	141,59
5	12	1,34	1,514	50,46	0,18	112,60	170,48
8	90	2,80	0,625	377,00	1,19	413,80	258,63
9	30	2,80	0,625	125,80	0,44	181,50	113,44
10	450	2,40	0,446	465,44	5,85	385,90	172,11
11	70	1,17	0,446	72,40	0,91	116,30	51,87
12	58	1,10	0,480	242,90	0,81	289,40	138,91
13	35	1,10	0,480	146,70	0,51	200,70	96,34
14	90	1,34	0,857	377,00	1,19	413,80	354,63

Fonte: Produzido pelo autor (2023)

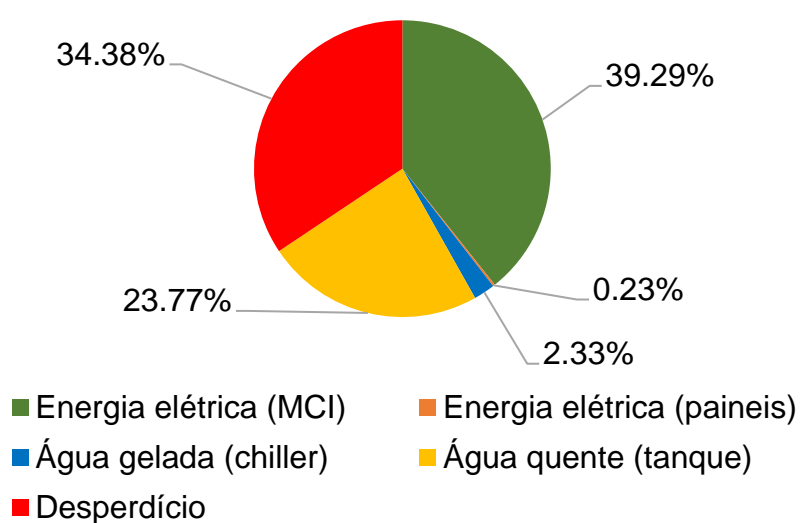
A partir de um consumo equivalente a 0,0875 (kg/s) de biogás, o MCI dissipa calor através de 0,815 (kg/s) de gases de exaustão e 0,625 (kg/s) do fluido de arrefecimento. O calor liberado pelo fluido de arrefecimento é integralmente absorvido pelo sistema de armazenamento de energia térmica, enquanto o calor dissipado pelos gases de exaustão fornece energia para o sistema de refrigeração por absorção, que utiliza aproximadamente 45 % dos gases de escape, e para o tanque de água quente que absorve o calor restante, equivalente a 55 % dos gases de exaustão.

Levando em conta valores de temperatura equivalentes a 70 (°C) e 30 (°C) para os gases de exaustão e o fluido de arrefecimento respectivamente, na saída dos trocadores de calor (ponto de menor temperatura), o tanque para armazenamento de energia térmica fornece água com temperatura de 90 (°C) a uma taxa de 0,857 (kg/s). Em termos de exergia, o maior valor está associado ao insumo do MCI (biogás) valor equivalente a 37 % do valor total (soma da exergia de todos os fluxos da planta).

4.1.1 Fator de utilização da planta

O valor do fator de utilização total da planta levando em conta os produtos e insumos de todos os equipamentos, é equivalente a 65,12%, este valor não leva em consideração o insumo relacionado a radiação solar dos painéis, pois este insumo não representa gastos para a operação da planta. Comparando-se com o valor da eficiência do motor em uso convencional (apenas convertendo energia térmica em energia mecânica), a utilização da unidade de poligeração aumenta em 25,83 % a eficiência do sistema. A figura 11 representa o a contribuição de cada um dos equipamentos da planta para o valor do fator de utilização total, bem como o percentual de energia desperdiçada devido as irreversibilidades.

Figura 11 – Contribuição do fator de utilização dos componentes da planta



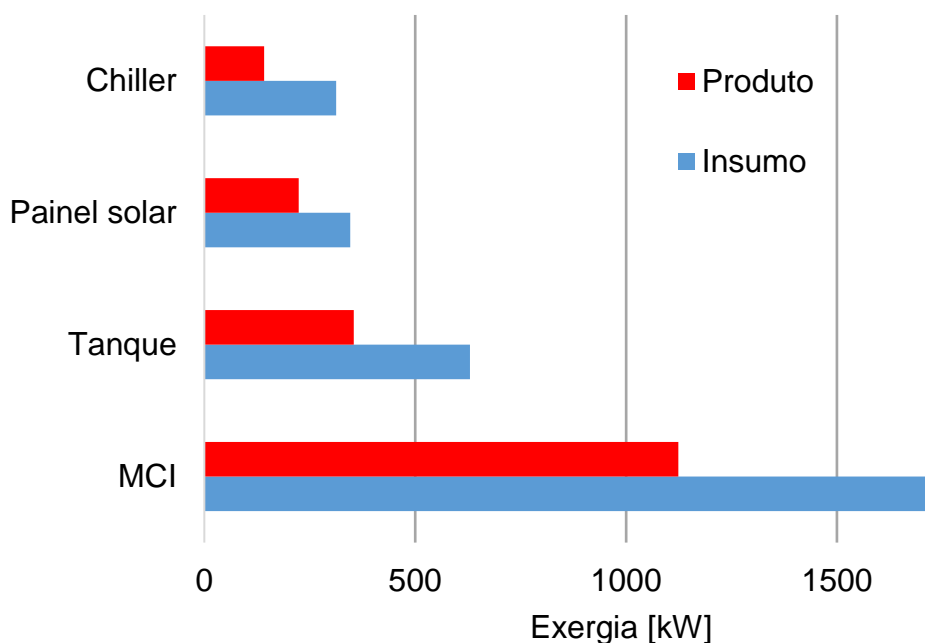
Fonte: Produzido pelo autor (2023)

A maior contribuição para o valor do fator de utilização alcançado está associada ao produto do MCI, enquanto o menor valor está relacionado a produção de energia dos painéis solares (valor aproximado de 20,22 kWh/dia), ao ser comparado com a produção de energia elétrica pelo o MCI ou energia do tanque para armazenamento de energia térmica, este valor representa baixa contribuição percentual para o valor total de utilização da planta. O valor de produção de energia elétrica pelos painéis pode ser aumentado utilizando uma quantidade maior de painéis solares. A variação da quantidade dos painéis empregados na planta deve ser avaliada de acordo com a demanda de energética.

4.2 AVALIAÇÃO EXERGÉTICA

Com base na avaliação de segunda lei da termodinâmica, a figura 12 representa os valores de exergia, associados aos produtos e insumos de cada um dos componentes da planta.

Figura 12 – Valores exergéticos dos produtos e insumos da planta



Fonte: Produzido pelo autor (2023)

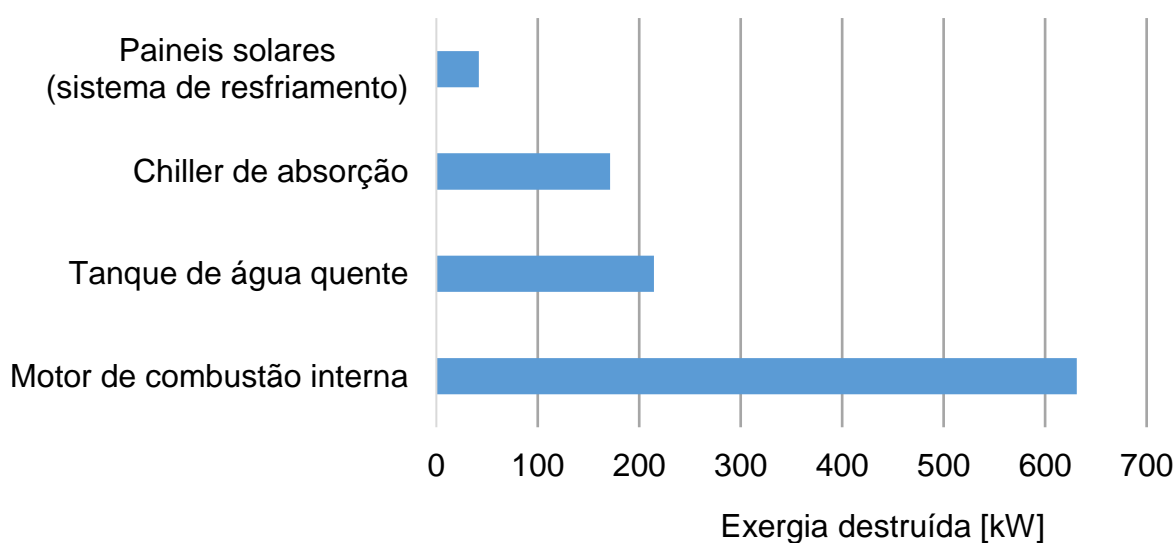
O chiller de absorção é o equipamento da planta que possui os menores valores de exergia, sendo o insumo e o produto equivalentes a 312,9 (kW) e 141,6

(kW) respectivamente. Estes valores são justificados pela demanda reduzida de energia absorvida pelo componente, se comparado com os outros equipamentos, e por conta da baixa temperatura do fluido que circula no evaporador, o produto do *chiller* (água gelada).

No motor de combustão interna são observados os maiores valores de exergia 1625 (kW) e 1124 (kW) associados aos insumos e produtos, respectivamente. O insumo do motor é o biogás e aos produtos são trabalho e energia térmica, os valores de exergia observados no motor, são compatíveis com o principal equipamento da planta em termos de consumo e dissipação de energia.

Os valores de exergia destruída dos componentes da planta estão indicados no gráfico da figura 13.

Figura 13 – Exergia destruída dos componentes da planta



Fonte: Produzido pelo autor (2023)

O menor valor de exergia destruída é observado no sistema de refrigeração dos painéis solares, equivalente a 41,9 (kW), esse valor é justificado pela baixa temperatura do fluido de resfriamento, comparando-se com os fluidos de arrefecimento e os gases de exaustão, o que contribuí para um valor reduzido de entalpia, facilitando a troca de calor e reduzindo perdas devido irreversibilidades.

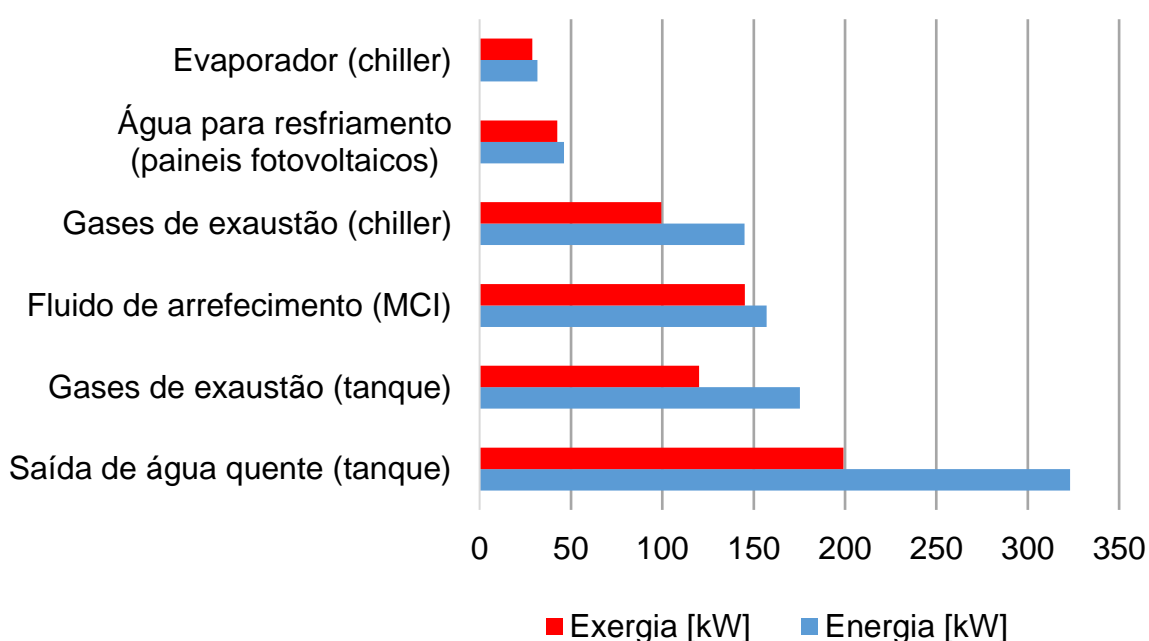
O *chiller* de absorção e o tanque para armazenamento de água quente possuem valores intermediários de destruição de exergia 171,3 (kW) e 214,3 (kW) respectivamente. Esses valores são justificados pela elevada temperatura e entalpia

dos dos gases de exaustão e do fluido de arrefecimento do motor, o que contribui para o aumento das irreversibilidades associados a transferência de calor.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE AVALIAÇÃO ENERGÉTICA E EXERGÉTICA

A figura 14 mostra os valores de energia e exergia em (kW), correspondente aos principais fluxos da planta de poligeração.

Figura 14 – Valores de energia e exergia da planta



Fonte: Produzido pelo autor (2023)

O menor valor energético e exerético é observado no evaporador do chiller, 31,7 (kW) e 28,9 (kW), respectivamente. Os baixos valores de energia e exergia do chiller são justificados pela baixa temperatura da água gelada que circula no evaporador.

Os maiores valores de energia e exergia são observados no tanque 199,1 (kW) e 323,1 (kW), respectivamente, que absorve calor do MCI (água de resfriamento e gases de exaustão) e do sistema de resfriamento dos painéis fotovoltaicos. A energia absorvida pelo tanque tem um valor constante, no entanto, a temperatura de saída e o fluxo de massa de água quente podem variar de acordo com a demanda.

O evaporador do *chiller*, o sistema de resfriamento dos painéis e o sistema de arrefecimento do motor apresentam pequena diferença comparando-se os valores de energia e exergia. Em todos estes sistemas água pura é utilizada como fluido nos trocadores de calor, o que contribui para aumento no transporte de energia e consequente diferença reduzida nos valores de energia e exergia. Um comportamento diferente é observado nos gases de exaustão destinados ao *chiller* e ao tanque para armazenamento de energia térmica, esses fluxos estão associados aos gases de exaustão o que contribui para o aumento da diferença nos valores de energia e exergia.

4.4 AVALIAÇÃO EXERGOECONÔMICA

A tabela 17 mostra os valores da avaliação exergoeconômica, resultados da aplicação do método exergoeconômico TCE aos fluxos da unidade de poligeração.

Tabela 17 – Resultados da avaliação exergoeconômica

Ponto	Ex [kW]	Ex* [kW]	K [kW/kW]	η	\dot{C} [R\$/h]
1 (biogás)	1625	1625	1	1	33,75
2	142,4	332,8	2,337	0,4279	5,128
3	42,91	0	-	-	0
4	141,6	503,3	3,555	0,2813	12,76
5	170,5	170,5	1	1	6,139
6	551	551	1	1	19,83
7	534	534	1		19,83
8	258,6	604,2	2,336	0,4281	9,309
9	113,4	265	2,336	0,4281	4,083
10	172,1	401,9	2,335	0,4283	6,192
11	51,87	0	-	-	0
12	138,2	138,2	1	1	0,2075
13	96,34	96,34	1	1	0,1446
14	354,6	1205	3,398	0,2943	12,52

Fonte: Produzido pelo autor (2023)

A entrada de combustível e a saída de trabalho no MCI representam os maiores custos exergeticos: 33,75 (R\$/h) e 19,83 (R\$/h), respectivamente. O alto

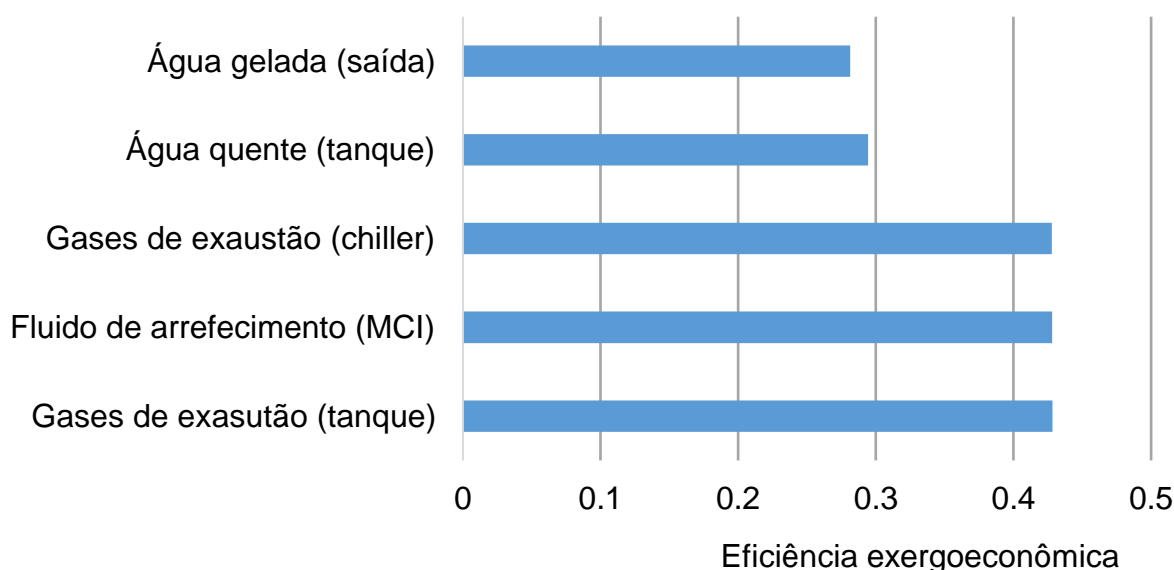
custo exergético nos pontos 01 (biogás) e 07 (potência mecânica do motor), está relacionado aos valores de aquisição de biogás e custo de investimento e operação do MCI respectivamente. Os altos valores apresentados são compatíveis com MCI, principal componente da planta em termos de energia absorvida e dissipada.

As vazões de entrada e saída do fluido refrigerante dos painéis solares representam os menores custos exergoeconômicos, 0,21 (R\$/h) e 0,14 (R\$/h), respectivamente. O baixo valor da potência de bombeamento e da temperatura do fluido refrigerante dos painéis, contribui para baixo valor do custo exergético apresentado.

Os maiores valores do custo exergético unitário são observados na entrada de biogás e na saída de água quente do tanque: 1625 (kW) e 1205 (kW), respectivamente.

A figura 15 indica a eficiência exergoeconômica dos principais fluxos da planta, resultados da análise exergoeconômica.

Figura 15 – Eficiência exergética dos principais fluxos da planta



Fonte: Produzido pelo autor (2023)

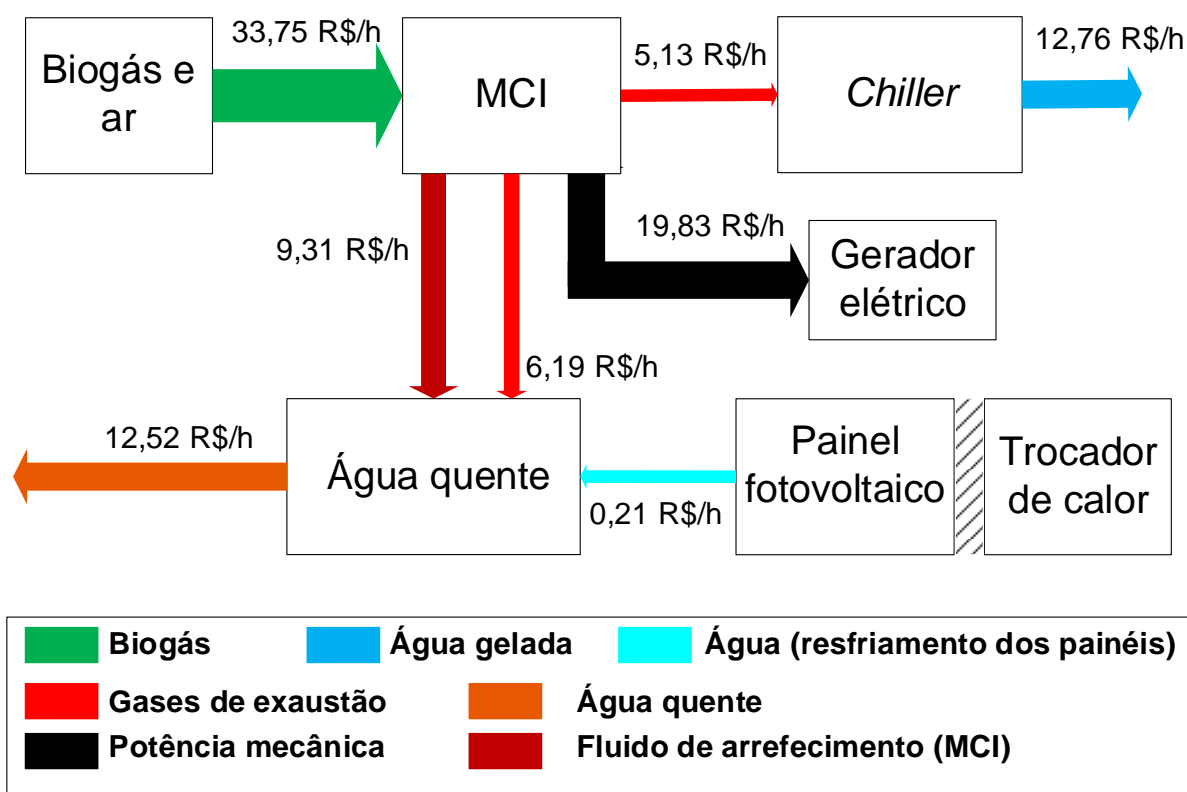
O fluxo com a menor eficiência exergoeconômica está relacionado a saída de água gelada do chiller, 28,13%, o menor valor de eficiência do *chiller* pode ser justificado pelo elevado consumo energético deste equipamento, comparando-se ao fluxo do seu produto (água gelada). O alto custo termoeconômico relacionado a

aquisição e operação do *chiller* (comparando-se aos outros componentes), contribui para o valor reduzido da eficiência exergoeconômica.

Os fluxos associados aos gases de exaustão e ao fluido de arrefecimento do MCI apresentam valores semelhantes, equivalentes a aproximadamente 43 %. A semelhança entre os valores de eficiência exergoeconômica dos fluxos indicados, é compatível com os valores de custo exergético unitário dos fluxos.

A figura 16 representa os valores de custo exergético da planta de poligeração. A espessura das setas varia de acordo com o valor do custo exergético de cada fluxo.

Figura 16 – Valores dos custos monetários dos principais fluxos da planta



Fonte: Produzido pelo autor (2023)

Os valores mais altos são observados na entrada de biogás e na saída de energia do MCI. Enquanto o valor mais baixo é encontrado no fluido refrigerante dos painéis fotovoltaicos.

O balanço de custos exergéticos do insumo (vazão de biogás) e dos produtos (produção de energia elétrica, água fria e água quente) é proporcional aos valores

apresentados no estudo de Yang et al (2019) que também aplicou o método TCE a um MCI.

O valor do fluxo exergético em (R\$/h) dos produtos e insumos é uma informação importante para a aquisição de uma usina de poligeração, através desses dados é possível observar a despesa financeira ao longo de um determinado período de operação.

4.4.1 Comparação de resultados

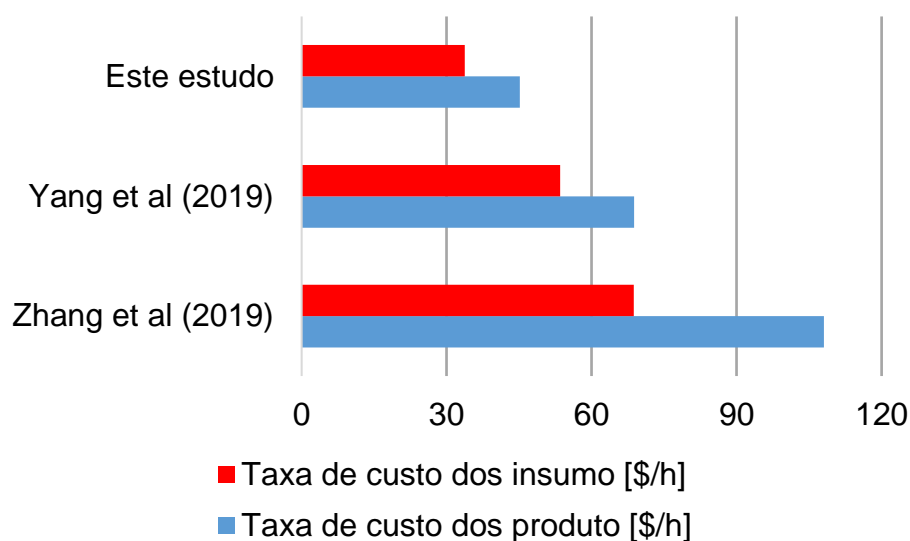
Com base nos valores obtidos pela avaliação termoeconômica, foi feito um estudo de comparação de resultados, avaliando o desempenho de outros dois estudos publicados, relacionados a análise termoeconômica de sistemas de multigeração.

O estudo de Yang et al (2019) propõe um sistema combinado de resfriamento, aquecimento e energia elétrica, utilizando biomassa e gás natural como combustíveis. O sistema é composto por um gaseificador e unidade de condicionamento de gás, um motor de combustão interna, um sistema de refrigeração por absorção e um tanque para armazenamento de energia térmica, o sistema é proposto com o intuito de suprir a demanda de energética de um hotel. Neste estudo o custo do insumo (biomassa e gás natural) é equivalente a 53,49 \$/h, enquanto o custo total dos produtos, energia elétrica, água gelada e energia térmica são: 20,34 \$/h, 31,48 \$/h e 16,94 \$/h, respectivamente, totalizando 68,76 \$/h, o custo para a produção de energia útil.

O estudo de Zhang et al (2019) avalia um sistema de poligeração constituído por um gaseificador de biomassa, uma unidade para produção de hidrogênio, uma turbina, um chiller de absorção e um ciclo de bomba de calor geotérmica. A planta utiliza como insumos, energia geotérmica, gás natural e biomassa a uma taxa de custo para aquisição equivalente a 14,65 \$/h, 27,07 \$/h e 17,28 \$/h, respectivamente, totalizando o custo de 68,76 \$/h associado aos insumos. Os produtos da planta e suas respectivas taxas são: energia elétrica 20,63 (\$/h), água gelada 57,99 (\$/h), água quente 10,35 (\$/h) e hidrogênio 19,08 (\$/h), somando um custo total para produção de energia equivalente a 108,5 (\$/h).

A figura 17 representa a comparação dos resultados dos estudos indicados.

Figura 17 – Valores da taxa de custos da análise de comparação dos resultados



Fonte: Produzido pelo autor (2023)

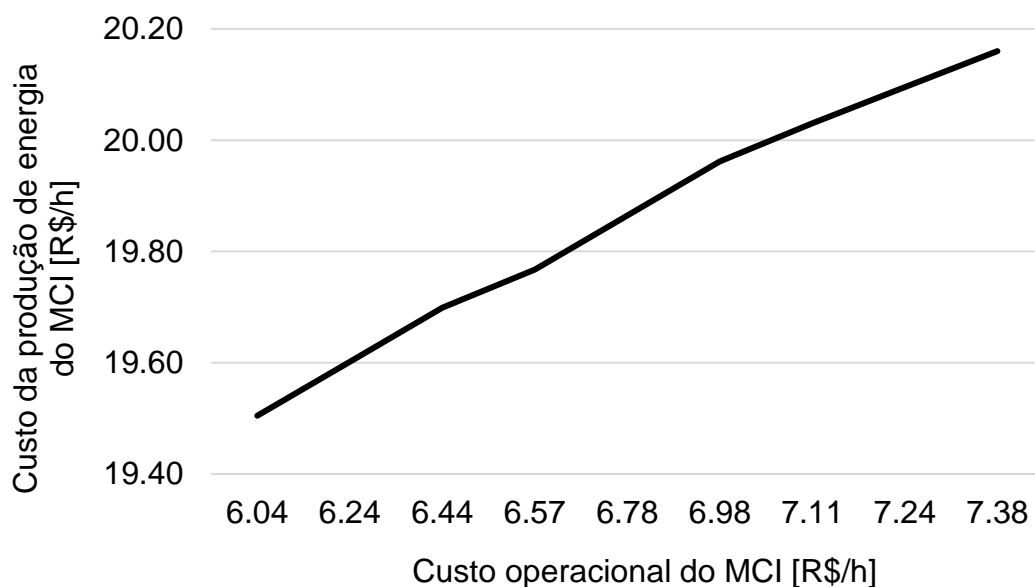
Ao comparar os três estudos observa-se elevado grau de variação da taxa de custo dos produtos (custo da produção de energia útil), essa discrepância é justificada por fatores como, variação da configuração e dos componentes da planta, diferentes faixas de suprimento da demanda energética, variação nos valores associados a aquisição e manutenção dos equipamentos, entre outros parâmetros.

4.4.2 Variação paramétrica aplicada a avaliação exergoeconômica

4.4.2.1 Variação do custo operacional dos equipamentos

As figuras 18 a 20 representam os gráficos que relacionam os custos operacionais dos equipamentos, aos valores associados a produção de energia do MCI, chiller de absorção e do tanque de água quente, respectivamente.

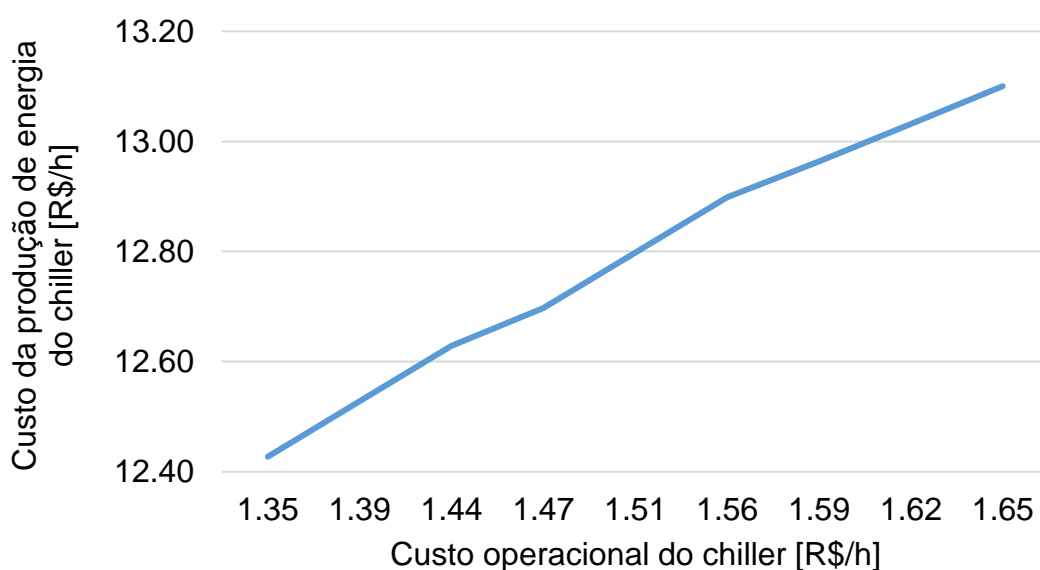
Figura 18 – Variação de parâmetros monetários associados ao MCI



Fonte: Produzido pelo autor (2023)

O menor e o maior valor dos custos operacionais são equivalentes a 6,04 (R\$/h) e 7,38 (R\$/h), respectivamente, os valores de produção de energia do MCI, associados a esses dois cenários são aproximadamente 19,50 (R\$/h) e 20,14 (R\$/h) respectivamente. A máxima diferença entre os valores de produção de energia do MCI é de 0,64 (R\$/h), o que representa uma variação diária do custo de produção de energia equivalente a 4,48 (R\$).

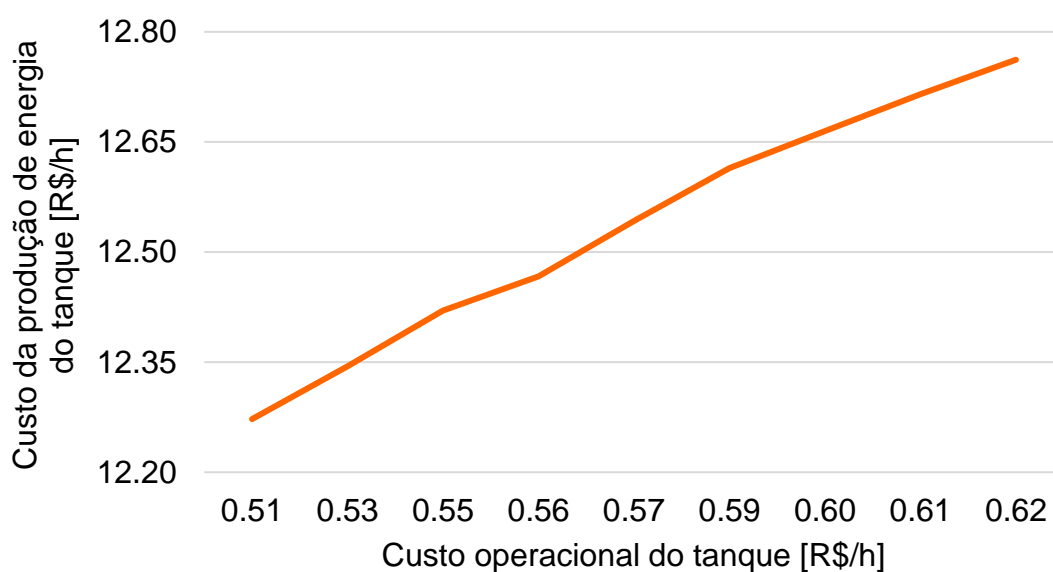
Figura 19 – Variação de parâmetros monetários associados ao *chiller*



Fonte: Produzido pelo autor (2023)

O intervalo de valores do custo de operação avaliado no *chiller* variou de 1,35 (R\$/h) a 1,65 (R\$/h) respectivamente, esses valores correspondem a um custo da produção de água gelada equivalente a 12,31 (R\$/h) 12,43 (R\$/h) respectivamente. A diferença entre os dois valores da produção de energia do *chiller* é de 0,12 (R\$/h), o que resulta em uma diferença de preço diária de 0,84 (R\$), comparando-se os dois principais cenários (maior e menor gasto monetário).

Figura 20 – Variação de parâmetros monetários associados ao tanque



Fonte: Produzido pelo autor (2023)

No tanque de água quente o custo operacional avaliado variou de 0,51 (R\$/h) a 0,62 (R\$/h) respectivamente, estes valores resultaram no custo para a produção de água quente equivalente a 12,27 (R\$/h) e 12,76 (R\$/h), em relação ao custo de produção de energia térmica observou-se uma variação diária de 0,49 (R\$/h), representando uma diferença do custo monetário de 3,43 (R\$).

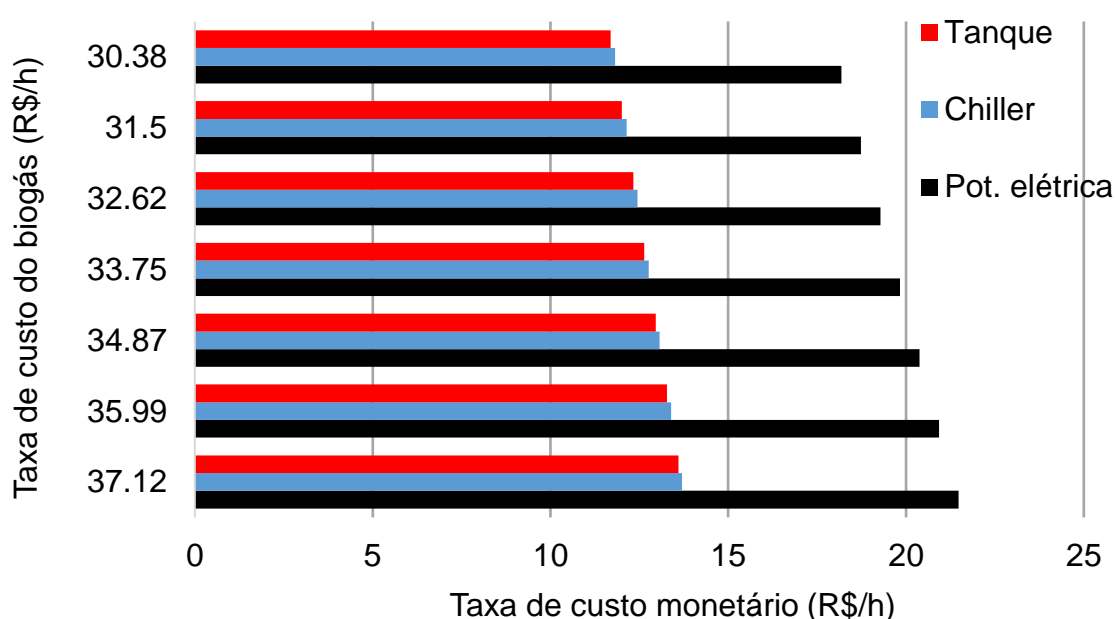
Uma análise proporcional comparando-se os maiores e menores valores associados a produção de energia, observados na variação paramétrica indicou que: uma redução de 20 % no valor do custo de manutenção, resulta na diminuição do valor da produção de energia equivalente a 3,18 % no MCI, 0,97 % no *chiller* e 3,84 % no tanque. O diagnóstico da avaliação proporcional revela que esforços relacionados a diminuição do custo de manutenção do MCI e do tanque, resultam em maiores reduções no custo de produção de energia, o mesmo comportamento não é

observado no *chiller*, que apresenta baixa redução no valor de produção de energia se comparado com os outros componentes da planta.

4.4.2.2 Variação de custo do combustível

A figura 21 indica a taxa de custo monetário dos produtos da planta, em função da variação do custo do biogás.

Figura 21 – Variação de parâmetros associados ao custo do combustível



Fonte: Produzido pelo autor (2023)

O aumento de 10 % no custo de fornecimento do biogás resulta em uma elevação percentual equivalente a 7,68 % no custo para produção de energia elétrica, 6,86 % no custo da produção de água gelada e 7,06 % no gasto relacionado a produção de água quente.

Já a redução de 10 % no valor do biogás resulta em uma economia de 3,54 (R\$/h), uma redução de custo diário equivalente a 24,78 (R\$).

O comparativo entre a redução no preço da aquisição do combustível e os impactos dessa mudança no custo da produção de energia útil, auxilia no diagnóstico de possíveis melhorias associadas ao custo operacional da unidade.

5 CONCLUSÃO

Este estudo propôs uma planta de poligeração de alto desempenho capaz de suprir demandas de frio, calor e energia elétrica. A modelagem da planta foi feita com base em equipamentos que foram validados separadamente em artigos publicados. O estudo teórico avaliou a viabilidade da planta em termos de energia, exergia e exergoeconomia.

O motor de combustão interna, principal componente da planta em termos de destruição de exergia, consome 0,0875 (kg/s) de biogás. Produz 534 (kW) de energia elétrica, além de fornecer calor ao sistema de refrigeração por absorção e ao reservatório de energia térmica a uma taxa de 145,08 (kW) e 332,22 (kW), respectivamente.

A avaliação exergoeconômica indica que a vazão com menor eficiência exérgica é a saída de água gelada do chiller 28,13 %. Os fluxos associados aos gases de exaustão e ao fluido de arrefecimento do MCI, apresentam valores de eficiência exergoeconômica equivalentes a aproximadamente 43 %.

O custo nivelado de produção de eletricidade, água quente (tanque de energia térmica) e água gelada (*chiller* de absorção) é de 19,83 (R\$/h), 12,52 (R\$/h) e 12,76 (R\$/h), respectivamente. O maior custo da planta está associado ao insumo do MCI, o biogás que representa um custo de 33,75 (R\$/h).

O estudo da variação paramétrica relacionou os custos de manutenção aos valores de produção de energia elétrica, água gelada e água quente. O diagnóstico termoeconômico obtido pela variação dos custos de manutenção indicou que o MCI e o tanque de água quente, são os componentes mais sensíveis em relação a melhorias nos custos de manutenção. Uma redução de 20 % resulta na diminuição de 3,84 % e 3,18 % nos custos de produção de energia do tanque e do MCI, respectivamente.

A variação de custo do combustível representa em valores percentuais alterações semelhantes no custo para produção de energia útil, variando-se 10 % no valor do biogás observa-se 6,86 % de diferença no custo para a produção de água gelada (valor mínimo de variação) e 7,68 % de alteração no custo para produção de energia elétrica pelo MCI (valor máximo de variação).

Os resultados deste trabalho podem contribuir futuramente com os seguintes estudos:

- Avaliação exergoambiental mais a análise do ciclo de vida dos equipamentos da planta;
- Análise de otimização para avaliar os efeitos dos índices de operação e manutenção da planta em relação aos custos de produção de energia;
- Análise de variação da demanda de energia, alterando-se os valores dos produtos de acordo com uma demanda variável ao longo do dia;
- Análise comparativa com outras plantas, capazes de suprir demandas semelhantes de energia e que utilizam outros tipos de equipamentos.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, T.; TAUSEEF, S. M.; ABBASI, S. A. **Biogas Energy**. Springer em ciências ambientais. New York: Springer, 2012.
- AMIDPOUR, M.; MANESH, M. H. K. **Cogeneration and polygeneration systems**. Ciências Físicas e Engenharia. Londres: Elsevier, 2020.
- BEN. **Balanco Energético Nacional**. Empresa de Pesquisa Energética - EPE, Rio de Janeiro, 2022.
- BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. **Thermal Design and Optimization**. John Wiley & Sons Inc., 1996.
- CAVALCANTI, E. J. C.; CARVALHO, M.; DA SILVA, D. R. S. Energy, exergy and exergoenvironmental analyses of a sugarcane bagasse power cogeneration system. **Energy Conversion and Management**, v. 222, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420307767>. Acesso em: 2 fev. 2023.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. Porto Alegre: AMGH, 2013
- CHEN, Y.; XU, J.; ZHAO, D.; WANG, J.; LUND, P. D. Exergo-economic assessment and sensitivity analysis of a solar-driven combined cooling, heating and power system with organic Rankine cycle and absorption heat pump. **Energy**, v. 230, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221009658>. Acesso em: 2 fev. 2023.
- CHITSAZ, A.; HOSSEINPOUR, J.; ASSADI, M. Effect of recycling on the thermodynamic and thermoeconomic performances of SOFC based on trigeneration systems; A comparative study. **Energy**, v. 124, p. 613–624, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217301937>. Acesso em: 2 fev. 2023.
- COGEN. **Cogeração no Mundo**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.cogen.com.br/cogeracao/cogeracao-no-mundo>. Acesso em: 12/12/2022.
- DAGHIGH, R.; ORAMIPOOR, H.; SHAHIDIAN, R. Improving the performance and economic analysis of photovoltaic panel using copper tubular-rectangular ducted heat exchanger. **Renewable Energy**, v. 156, p. 1076–1088, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148120306376>. Acesso em: 2 fev. 2023.
- F-CHART, S. **Engineering Equation Solver**. 2011. Disponível em: <https://fchartsoftware.com/ees/>. Acesso em: 02 fev. 2023.
- FORTES, A. F. C.; CARVALHO, M.; DA SILVA, J. A. M. Environmental impact and cost allocations for a dual product heat pump. **Energy Conversion and Management**, v. 173, p. 763–772, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890418308410>. Acesso em: 2 fev. 2023.

FRANCESCO, C.; D'ACCADIA M. D.; VANOLI L.; VICIDOMINI M. **Polygeneration Systems**. Design, Processes and Technologies. Londres: Elsevier, 2021.

GHAEBI, H.; PARIKHANI, T.; ROSTAMZADEH, H. A novel trigeneration system using geothermal heat source and liquefied natural gas cold energy recovery: Energy, exergy and exergoeconomic analysis. **Renewable Energy**, v. 119, p. 513–527, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117311837>. Acesso em: 2 fev. 2023.

GUNGOR, A.; ERBAY, Z.; HEPBASLI, A. Exergoeconomic (Thermoeconomic) Analysis and Performance Assessment of a Gas Engine–Driven Heat Pump Drying System Based on Experimental Data. **Drying Technology**, v. 30, n. 1, p. 52–62, 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07373937.2011.618897>. Acesso em: 2 fev. 2023.

HAYDARGIL, D.; ABUŞOĞLU, A. A comparative thermoeconomic cost accounting analysis and evaluation of biogas engine-powered cogeneration. **Energy**, v. 159, p. 97–114, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544218311678>. Acesso em: 2 fev. 2023.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M.; REIS, L. B. **Energia e meio ambiente**. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

IEA. **Key World Energy Statistics**. Paris, 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>. Acesso em: 12/12/2022.

JI-CHAO, Y.; SOBHANI, B. Integration of biomass gasification with a supercritical CO₂ and Kalina cycles in a combined heating and power system: A thermodynamic and exergoeconomic analysis. **Energy**, v. 222, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544221002292>. Acesso em: 2 fev. 2023.

LAZZARETTO, A.; TSATSARONIS, G. SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. **Energy**, v. 31, n. 8–9, p. 1257–1289, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544205000630>. Acesso em: 2 fev. 2023.

LOZANO, M. A.; VALERO, A. Theory of the exergetic cost. **Energy**, v. 18, n. 9, p. 939–960, 1993. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054429390006Y>. Acesso em: 2 fev. 2023.

MARIANI, A.; MINALE, M.; UNICH, A. Use of biogas containing CH₄, H₂ and CO₂ in controlled auto-ignition engines to reduce NO_x emissions. **Fuel**, v. 301, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236121008024>. Acesso em: 2 fev. 2023.

MARQUES, A. DA S.; CARVALHO, M.; LOURENÇO, A. B.; DOS SANTOS, C. A. C. Energy, exergy, and exergoeconomic evaluations of a micro-trigeneration system. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 42,

n. 6, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-020-02399-y>. Acesso em: 2 fev. 2023.

MARQUES, K. DE L.; BANDEIRA M. DE D.; CARVALHO, M. A Review on The Panorama of Combined Heating, Cooling, and Power in Brazil. **Energetics**. 2020. Disponível em: <https://energetics.cosrec.org/wp-content/uploads/2020/12/Poster-1>. Acesso em: 2 fev. 2023.

MEHR, A. S.; MAHMOUDI, S. M. S.; YARI, M.; CHITSAZ, A. Thermodynamic and exergoeconomic analysis of biogas fed solid oxide fuel cell power plants emphasizing on anode and cathode recycling: A comparative study. **Energy Conversion and Management**, v. 105, p. 596–606, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S019689041500744X>. Acesso em: 2 fev. 2023.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2018.

MOREIRA, R. S. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2021.

PILATOWSKY, I.; ROMERO, R.; ISAZA, C.; et al. **Cogeneration Fuel Cell-Sorption Air Conditioning Systems: Green Energy and Technology**. Londres: Springer, 2011.

PINTO, E. S.; SERRA, L. M.; LÁZARO, A. Energy communities approach applied to optimize polygeneration systems in residential buildings: Case study in Zaragoza, Spain. **Sustainable Cities and Society**, v. 82, p. 103885, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670722002086>. Acesso em: 2 fev. 2023.

SANTOS, D. A. B. dos. et al. (2021). Evaluation of the energy performance of refrigeration systems using nanofluids: a systematic and critical review. **Principia**. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/viewFile/6319/1909>. Acesso em: 2 fev. 2023.

SANTOS, J.; NASCIMENTO, M.; LORA, E.; REYES, A. M. On the Negentropy Application in Thermoconomics: A Fictitious or an Exergy Component Flow? **Int. J. of Thermodynamics**, v. 12, n. 4, p. 163–176, 2009. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/42539968>. Acesso em: 2 fev. 2023.

SANTOS, M. A. **Fontes de Energia Nova e Renovável**. Rio de Janeiro: LTC. 2013.

SCHRÖDER, D.; HEGNER, R.; GÜNGÖR, A.; ATAKAN, B. Exergoeconomic analysis of an HCCI engine polygeneration process. **Energy Conversion and Management**, v. 203, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S019689041931091X>. Acesso em: 2 fev. 2023.

SHOKATI, N.; RANJBAR, F.; YARI, M. A comprehensive exergoeconomic analysis of absorption power and cooling cogeneration cycles based on Kalina, part 1: Simulation.

Energy Conversion and Management, v. 158, p. 437–459, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890417312451>. Acesso em: 2 fev. 2023.

UNITED NATIONS. **Sharm El-Sheikh Climate Change Conference**. Sharm El-Sheikh, 2022. Disponível em: <https://unfccc.int/cop27>. Acesso em: 12/12/2022.

VIAN, Â.; TAHAN, C. M. V.; AGUILAR, G. J. R.; GOUVEA, M. R.; GEMIGNANI, M. M. F. **Energia Solar: Fundamentos Tecnologia e Aplicações**. São Paulo: Blucher. 2021.

WANG, S.; LIU, C.; LI, J.; et al. Exergoeconomic analysis of a novel trigeneration system containing supercritical CO₂ Brayton cycle, organic Rankine cycle and absorption refrigeration cycle for gas turbine waste heat recovery. **Energy Conversion and Management**, v. 221, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890420306087>. Acesso em: 2 fev. 2023.

WOLFF, M.; BECKER, T.; WALTHER, G. Long-term design and analysis of renewable fuel supply chains – An integrated approach considering seasonal resource availability. **European Journal of Operational Research**, v. 304, n. 2, p. 745–762, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221722002910>. Acesso em: 2 fev. 2023.

XI, Z.; ESHAGHI, S.; SARDARI, F. Energy, exergy, and exergoeconomic analysis of a polygeneration system driven by solar energy with a thermal energy storage tank for power, heating, and freshwater production. **Journal of Energy Storage**, v. 36, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X2100181X>. Acesso em: 2 fev. 2023.

YAĞLI, H.; KOÇ, Y.; KOÇ, A.; GÖRGÜLÜ, A.; TANDIROĞLU, A. Parametric optimization and exergetic analysis comparison of subcritical and supercritical organic Rankine cycle (ORC) for biogas fuelled combined heat and power (CHP) engine exhaust gas waste heat. **Energy**, v. 111, p. 923–932, 2016. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/304251291>. Acesso em: 2 fev. 2023.

YAĞLI, H.; KOÇ, Y.; KÖSE, Ö.; KOÇ, A.; YUMRUTAŞ, R. Optimisation of simple and regenerative organic Rankine cycles using jacket water of an internal combustion engine fuelled with biogas produced from agricultural waste. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 155, p. 17–31, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582021004614>. Acesso em: 2 fev. 2023.

YANG, K.; ZHU, N.; DING, Y.; et al. Exergy and exergoeconomic analyses of a combined cooling, heating, and power (CCHP) system based on dual-fuel of biomass and natural gas. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 893–906, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618329901>. Acesso em: 2 fev. 2023.

ZHANG, X.; ZENG, R.; DU, T.; et al. Conventional and energy level based exergoeconomic analysis of biomass and natural gas fired polygeneration system integrated with ground source heat pump and PEM electrolyzer. **Energy Conversion and Management**, v. 195, p. 313–327, 2019. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890419305667>. Acesso em: 2 fev. 2023.

ZHANG, X.; ZENG, R.; MU, K.; et al. Exergetic and exergoeconomic evaluation of co-firing biomass gas with natural gas in CCHP system integrated with ground source heat pump. **Energy Conversion and Management**, v. 180, p. 622–640, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890418312536>. Acesso em: 2 fev. 2023.

ZOGHI, M.; HABIBI, H.; CHITSAZ, A.; JAVAHERDEH, K.; AYZAZPOUR, M. Exergoeconomic analysis of a novel trigeneration system based on organic quadrilateral cycle integrated with cascade absorption-compression system for waste heat recovery. **Energy Conversion and Management**, v. 198, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890419308003>. Acesso em: 2 fev. 2023.



Emitido em 03/03/2023

DOCUMENTO COMPROBATÓRIO Nº 2/2023 - SCP-UACSA (11.01.64.01.03.02)
(Nº do Documento: 40)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

(Assinado digitalmente em 03/03/2023 12:43)

MERCIA HELENA DA SILVA LEITE

ASSISTENTE EM ADMINISTRACAO

SCP-UACSA (11.01.64.01.03.02)

Matrícula: ###103#6

Visualize o documento original em <https://sigs.ufrpe.br/documentos/> informando seu número: **40**, ano: **2023**, tipo: **DOCUMENTO COMPROBATÓRIO**, data de emissão: **03/03/2023** e o código de verificação: **ced897618e**