

SUBMETIDO 23/10/2023

APROVADO 02/02/2024

PUBLICADO ON-LINE 19/02/2024


VERSÃO FINAL DIAGRAMADA 31/07/2025

EDITOR ASSOCIADO

Prof. Dr. José Carlos de Lima Júnior

Análise energética de um *chiller* de absorção integrado a uma unidade de cogeração a gás natural

 Suellen Cristina Sousa Alcântara ^[1]

 Alvaro Antonio Villa Ochoa ^[2] ✱

 José Ângelo Peixoto da Costa ^[3]

 Kleber Lima César ^[4]

[1] s.alcaantara@gmail.com
[4] kleber@ufpi.edu.br
Universidade Federal de Piauí (UFPI),
Teresina, Piauí, Brasil

[2] ochoaalvaro@recife.ifpe.edu.br
[3] angelocosta@recife.ifpe.edu.br
Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de
Pernambuco (IFPE), Recife,
Pernambuco, Brasil

✱ Autor para correspondência.

RESUMO: Os sistemas de cogeração oferecem um potencial significativo para a exploração racional de recursos energéticos, proporcionando vantagens econômicas e ambientais em vários níveis de complexidade. Este estudo apresenta uma análise energética de um sistema de cogeração composto por um conjunto gerador a gás natural, um *chiller* de absorção de efeito único operando com LiBr/H₂O, um trocador de calor e uma torre de resfriamento. A modelagem termodinâmica foi realizada utilizando a plataforma computacional Engineering Equation Solver® (EES-32), da F-Chart. O estudo avaliou a influência dos principais parâmetros operacionais do sistema de cogeração. Com base em dados fornecidos pelos fabricantes dos componentes do sistema e na aplicação da primeira lei da termodinâmica, analisou-se o efeito de parâmetros como carga do motor na distribuição de gases de exaustão entre a alimentação do *chiller* de absorção e um processo secundário. Para os valores padrões adotados, o *Coefficient of Performance* (COP) obtido foi de 0,7427, sendo necessários apenas 50% dos gases de exaustão rejeitados pelo motor para alimentar o *chiller*. A eficiência energética do sistema de cogeração foi de aproximadamente 45,5%, podendo ser aumentada se 100% dos gases de exaustão do motor forem utilizados.

Palavras-chave: análise de sensibilidade; *chiller* de absorção; cogeração; COP.

Energy analysis of an absorption chiller integrated into a natural gas cogeneration unit

ABSTRACT: Cogeneration systems offer significant potential for the rational exploitation of energy resources, providing economic and environmental advantages at various levels of complexity. This study presents an energy analysis of a cogeneration system composed of a natural gas-powered generator set, a single-effect absorption chiller operating with LiBr/H₂O, a heat exchanger, and a cooling tower. The thermodynamic modeling was carried out using the Engineering Equation Solver® (EES-32 by F-Chart) computational platform. The study evaluated the influence of the cogeneration system's

main operational parameter. Based on data provided by the system component manufacturers and the application of the first law of thermodynamics, it analyzed the effect of parameters such as engine load on the distribution of exhaust gases between powering the absorption chiller and a secondary process. For the adopted standard values, the Coefficient of Performance (COP) obtained was 0.7427, requiring only 50% of the exhaust gases rejected by the engine to power the chiller. The energy efficiency of the cogeneration system was approximately 45.5%, which can be increased if 100% of the engine's exhaust gases are utilized.

Keywords: absorption chiller, cogeneration; COP; sensitivity analysis.

Nomenclatura

Abreviações	Descrição
COP	Coefficient of Performance
EES	Engineering equation solver
PCI	Poder calorífico [kJ.kg ⁻¹]
U	Coefficiente global de transferência de calor [kW.K ⁻¹]
A	Área
Lista de símbolos	
\dot{W}	Fluxo de trabalho [kW]
T	Temperatura [°C]
\dot{m}	Fluxo de massa [kg.s ⁻¹]
R^2	Coefficiente de correlação
Carga	Carga de operação do motor [%]
a, b, c, d	Coefficientes estequiométricos
\dot{Q}	Fluxo de calor [kW]
C_p	Calor específico [kJ.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Y	Fração mássica
η	Eficiência energética
X	Concentração
H	Entalpia [kJ.kg ⁻¹]
V	Velocidade [m.s ⁻¹]
G	Gravidade [m.s ⁻²]
Z	Altura [m]
Letras gregas	
ΔT_m	Temperatura média logarítmica
β	Coefficiente estequiométrico para o ar
α	Porcentagem dos gases [%]

Subscritos	
LiBr	Brometo de lítio
H ₂ O	Água
motor	Motor
ge	Gases de exaustão
gn	Gás natural
x, y, w, k	Número de mols dos componentes do combustível
comb	Combustível
0	Condição ambiente (27 °C e 101,32 kPa)
i	Componente
vc	Volume de controle
e	Entrada
s	Saída
evap	Evaporador
ger	Gerador
bomba	Bomba
cogeração	Cogeração

1 Introdução

A população mundial já ultrapassou a marca de 8 bilhões de habitantes, conforme relatório das Nações Unidas (United Nations, 2024), alcançando um nível de desenvolvimento econômico, científico e tecnológico perceptivelmente incompatível com os meios tradicionais de conversão energética e com a disponibilidade de recursos naturais. Logo, os sistemas destinados a maximizar a eficiência energética têm sido considerados a estratégia mais lógica e segura para mitigar essa conjuntura e garantir o progresso da humanidade. Nesse contexto, os sistemas de cogeração emergem como uma alternativa promissora por reduzirem o desperdício energético ao explorarem uma única fonte, além de serem versáteis e confiáveis.

A cogeração, ou produção combinada de calor e energia elétrica, consiste na utilização de um conjunto de componentes interligados para promover simultaneamente a geração de mais de uma forma útil de energia, geralmente eletricidade e calor de processo (Abbas; Issa; Ilinca, 2020; Kabeyi; Olanrewaju, 2022; Matelli, 2016). Essa abordagem não apenas reduz a dependência de combustíveis fósseis nas indústrias, como também viabiliza a redução de custos operacionais e da dependência em relação às concessionárias de energia elétrica, destacando-se sob o ponto de vista da Segunda Lei da Termodinâmica. Quando os combustíveis fósseis são substituídos por fontes renováveis, como biogás e biomassa, os sistemas de cogeração tornam-se aliados no combate ao aquecimento global (Cavalcanti; Carvalho; Ochoa, 2019; Freire; Santos; Almeida, 2020; Ochoa *et al.*, 2014).

Segundo Wang, Fan e Zhou (2022), a demanda energética deverá aumentar em mais de 300% até o término do século XXI. Além disso, observa-se uma significativa desigualdade mundial na distribuição de recursos energéticos, o que exige estratégias complexas de abastecimento para garantir a segurança energética. Esse cenário tem intensificado o interesse pela produção descentralizada de energia, especialmente no

âmbito da micro e minigeração (Frenkel *et al.*, 2019). A cogeração, ao possibilitar a produção simultânea e descentralizada de calor e eletricidade, desempenha um papel central nos esforços da União Europeia para reduzir o uso de fontes primárias e emissões de poluentes, especialmente por meio dos sistemas de microcogeração (Atanasoae, 2020; Kallio; Siroux, 2022; Murugan; Horák, 2016a; Schneider; Müller; Karl, 2020).

Os sistemas de cogeração podem ser classificados como trigeração ou poligeração, de acordo com os níveis de aproveitamento da fonte primária de energia. No primeiro caso, ocorre o fornecimento combinado de aquecimento, resfriamento e eletricidade. Já no segundo, viabilizam-se múltiplas aplicações do calor, como refrigeração, secagem, ventilação, dessalinização e preaquecimento (Kasaeian *et al.*, 2020; Murugan; Horák, 2016b).

A literatura apresenta inúmeras contribuições voltadas ao aperfeiçoamento contínuo dos sistemas de cogeração. Yue *et al.* (2015) realizaram uma análise energética bem-sucedida de sistemas de trigeração inovadores em veículos automotivos, utilizando o calor residual dos gases de exaustão e do sistema de arrefecimento como fonte primária. Marion, Louahlia e Gualous (2016) avaliaram o desempenho de sistemas de cogeração para configurações distintas de motores Stirling (α , β e γ) acionados por glicerol, identificando a configuração mais eficiente em termos de consumo e trabalho mecânico. Valenti *et al.* (2014), por sua vez, validaram experimentalmente um modelo numérico de uma unidade de microcogeração com motor Stirling comercial com capacidade elétrica de 1 kW. De acordo com Schreiber (2007), estudos abordando motores Stirling tiveram seu apogeu para projetos automotivos durante a crise do petróleo em 1973 e, uma vez que os preços dos combustíveis estabilizaram, esses dispositivos se mostraram mais atraentes para aplicações de cogeração de energia.

Estudos em maior escala também têm sido realizados. Badami, Gerboni e Portoraro (2017) conduziram uma análise energética para avaliar e determinar os índices de desempenho de um sistema de cogeração destinado ao aquecimento distrital em Turim, Itália. Recentemente, Qin, Zhang e Zhang (2022) investigaram a viabilidade de um sistema híbrido de cogeração envolvendo uma célula de combustão de hidrogênio e um sistema de refrigeração termoeletrico duplex, sendo esse último composto por um gerador termelétrico acionado pelo rejeito térmico da célula combustível, além de um resfriador termelétrico diretamente acionado pela eletricidade produzida pelo sistema.

Quatro diferentes modelos termodinâmicos e suas premissas (padrão a ar, padrão a ar frio, CGAM e combustão completa) foram comparados por Araújo *et al.* (2020), que, por meio de análises termoeconômicas e de alocação de custos, determinaram os melhores cenários e suas implicações para a otimização de um sistema de cogeração envolvendo uma turbina a gás. De forma complementar, Alcântara *et al.* (2019) analisaram diferentes cenários de trigeração em uma planta de fabricação de sorvetes, utilizando uma avaliação termoeconômica e indicadores econômicos, como valor presente líquido, taxa interna de retorno e *payback*. Os resultados não apenas contribuíram para o entendimento e aperfeiçoamento desses sistemas, como também nortearam futuros investimentos financeiros da fábrica estudada.

Uma análise de desempenho termodinâmico, econômico e ambiental foi realizada por Oliveira, Burin e Bazzo (2023) em uma usina de produção de etanol, objetivando investigar um acionamento híbrido (energia solar térmica e biomassa) da planta, considerando aspectos energéticos e exergéticos, além de um estudo de viabilidade econômica e ambiental. A abordagem demonstrou a viabilidade do sistema de cogeração e possibilitou a comprovação de uma redução de emissões de CO₂ equivalente a 143.332 t/ano em duas localizações e condições ambientais distintas. De maneira semelhante, Lira *et al.* (2023) realizaram um estudo experimental para avaliar o potencial

energético de uma planta de cogeração para produção de etanol, utilizando briquetes de sorgo sacarino como fonte primária de energia. Foram avaliadas a biomassa, a produção de etanol e a cogeração de energia, identificando as melhores condições na irrigação com efluentes de esgoto doméstico.

O uso de tecnologias de cogeração está fortemente associado aos sistemas de refrigeração por absorção, que empregam energia térmica para produzir resfriamento (Arabi; Dehghani, 2015). Essas unidades são acionadas por fontes térmicas de energia e, ao integrarem sistemas de cogeração, podem aproveitar rejeitos térmicos, como a água quente proveniente de processos e a energia dos gases oriundos da combustão (Dadpour *et al.*, 2022; Garimella *et al.*, 2019; Nikbakhti *et al.*, 2020; Qasem *et al.*, 2022; Xu *et al.*, 2021). Assim, esses componentes têm tido constantes contribuições, demonstrando-se aliados importantes na preservação ambiental devido ao uso de fluidos de trabalho que não contribuem para o aquecimento global (Caldas *et al.*, 2020; Cézar *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2021).

No contexto de avanços tecnológicos em refrigeradores por absorção, Szabó (2021) estabeleceu novos indicadores qualitativos que, somados aos já consolidados indicadores quantitativos, permitiram definir procedimentos claros e práticos para a otimização exérgica em *chillers* de absorção. De forma complementar, Chun *et al.* (2023), utilizando modelagens termodinâmicas e termoeconômicas complexas e inovadoras, determinaram o *chiller* de absorção mais adequado às condições de otimização energética de uma superestrutura. Por sua vez, Marques *et al.* (2021) destacaram os benefícios econômicos, técnicos e ambientais de um sistema de microcogeração composto por um motor de combustão interna movido a gás e um refrigerador de absorção amônia-água com capacidade de 5 TR.

Diante do exposto, este estudo propõe analisar energeticamente uma unidade de cogeração de energia composta por um grupo gerador que utiliza gás natural como combustível, um sistema de refrigeração por absorção com capacidade de 35,16 kW e o fornecimento de calor para um processo secundário. As principais contribuições deste trabalho incluem: i) o desenvolvimento de um modelo termodinâmico computacional de cogeração de energia utilizando gás natural como combustível; ii) a análise de sensibilidade dos principais parâmetros de operação do grupo gerador sob diferentes condições de carga parcial.

O restante do artigo está estruturado da seguinte forma: a seção 2 apresenta a modelagem energética do sistema de cogeração, a seção 3 discute e interpreta os resultados obtidos a partir do modelo, e a seção 4 expõe as conclusões mais relevantes sobre o estudo de cogeração realizado.

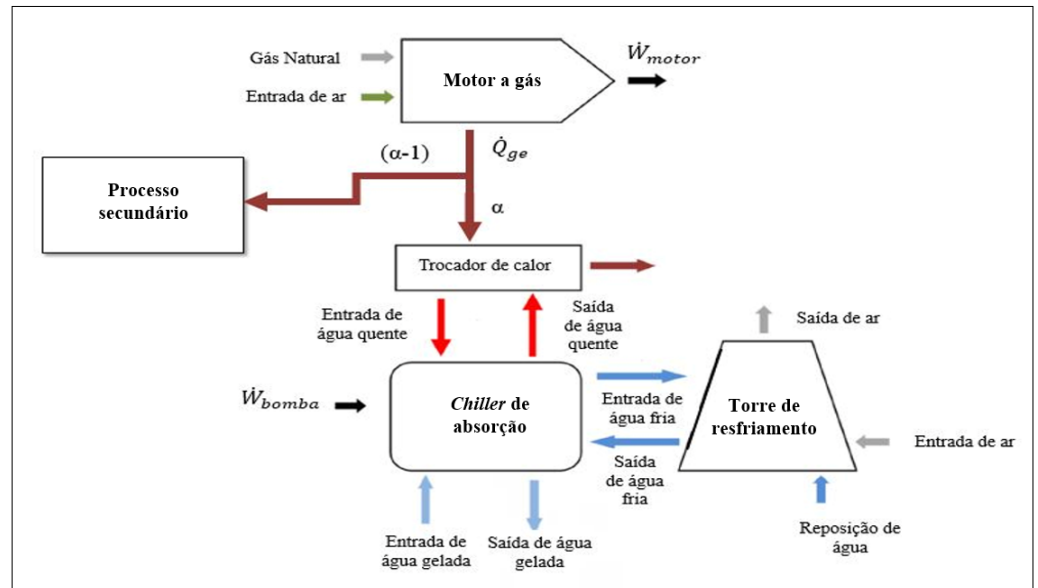
2 Metodologia

O sistema é composto por um motor de combustão interna operando com gás natural (Santos, 2005), um *chiller* de absorção de simples efeito com capacidade de resfriamento de 35,16 kW, fabricado pela Yazaki (Yazaki Energy System, 2003), um trocador de calor compacto, uma bomba de circulação e uma torre de resfriamento (Figura 1). O objetivo principal desse sistema de cogeração é produzir energia elétrica a partir da combustão de gás natural e, em seguida, utilizar os gases de exaustão reciclados no trocador de calor compacto para gerar água gelada através de um *chiller* de absorção.

Figura 1 ▶

Sistema de cogeração utilizando um motor a gás para acionamento primário.

Fonte: adaptado de Ochoa et al. (2014)

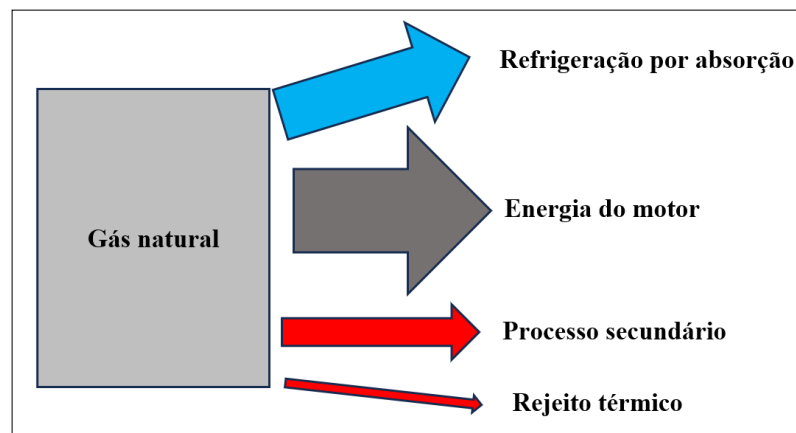


O processo de cogeração tem início com a queima da mistura de ar e gás natural no motor, gerando potência mecânica (\dot{W}_{motor}). Os gases de exaustão resultantes da combustão podem seguir dois caminhos: o primeiro direciona os gases para o acionamento de um sistema de refrigeração por absorção, que utiliza o par LiBr/H₂O; o segundo, caso haja excesso de produtos de combustão, destina-se a um processo secundário (Figura 2).

Figura 2 ▶

Diagrama de Sankey do sistema de cogeração.

Fonte: elaborado pelos autores



O acionamento do *chiller* de absorção ocorre por meio do aproveitamento dos gases de combustão em um trocador de calor contracorrente, onde a energia contida nos gases é transferida para aquecer água. Essa água quente entra no *chiller* de absorção através do gerador, onde aquece a solução de LiBr/H₂O, promovendo a dessorção do refrigerante (água) e gerando vapor. Após a dessorção, o vapor de água é liquefeito no condensador, passando posteriormente por uma válvula de expansão, que diminui a pressão e a temperatura do refrigerante.

O refrigerante a baixa temperatura troca calor com o ambiente a ser resfriado e segue para o absorvedor, onde se mistura com a solução rica em brometo de lítio proveniente do gerador, liberando calor. O resfriamento interno do sistema de refrigeração é realizado por uma torre de resfriamento, que remove o calor no absorvedor e no condensador por meio de um processo evaporativo.

2.1 Modelagem termodinâmica do motor

Tabela 1 ▼

Dados do conjunto moto-gerador fornecidos pelo fabricante.

Fonte: Leon Heimer apud Santos (2005)

Para realizar a modelagem do motor, foram utilizados os dados fornecidos pelo fabricante do conjunto moto-gerador, Leon Heimer® (Tabela 1), com o objetivo de determinar equações paramétricas que relacionam a potência do motor (\dot{W}_{motor}), a temperatura dos gases de exaustão (T_{ge}) e a vazão de combustível (\dot{m}_{gn}) com a carga do motor (representada pela demanda, ou em percentual, que o grupo gerador encontra durante sua operação).

Carga (%)	Vazão de gás natural (10^{-3} kg/s)	Temperatura dos gases de exaustão ($^{\circ}$ C)	Potência elétrica do motor (kW)	Velocidade de operação (rpm)
37,64	4,740	583,8	74,10	1204
43,86	5,610	602,9	86,90	1403
50,11	6,373	619,6	98,40	1603
56,33	7,274	630,7	109,00	1802
62,61	8,036	656,0	120,70	2003
68,83	8,763	667,6	131,30	2202
75,09	9,317	678,8	140,90	2402
81,28	9,941	695,4	150,00	2600
87,59	10,560	712,5	157,20	2802
93,81	11,360	715,1	163,50	3001
100,00	11,600	733,5	167,20	3199

As três equações obtidas estão apresentadas na Tabela 2, juntamente com seus respectivos coeficientes de correlação (R^2). Essas relações foram escolhidas em virtude de a carga do motor ser um parâmetro-chave no funcionamento do sistema de cogeração.

Tabela 2 ►

Ajuste de curvas a partir dos dados fornecidos pelo fabricante do motor a gás.

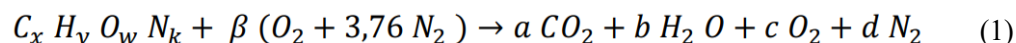
Fonte: dados da pesquisa

Relações	Equações paramétricas	R^2
Potência do motor versus carga do motor	$\dot{W}_{motor} = -0,0001 \times \text{carga}^3 + 0,0197 \times \text{carga}^2 + 1,0052 \times \text{carga} + 16,598$	0,9999
Temperatura dos gases de exaustão versus carga do motor	$T_{ge} = 2,371 \times \text{carga} + 499,99$	0,9912
Vazão de combustível versus carga do motor	$\dot{m}_{gn} = 0,1114 \times 10^{-3} \times \text{carga} + 0,8378 \times 10^{-3}$	0,9924

Os coeficientes de correlação das três equações apresentaram valores próximos de 1 (0,9999, 0,9912 e 0,9924, respectivamente). No caso da potência elétrica do motor, foi necessário o uso de um polinômio de terceiro grau para melhorar a correlação.

A energia térmica dos gases de combustão foi calculada com base na Lei da Conservação das Espécies, considerando a quantidade de cada hidrocarboneto presente no gás. A Equação 1 descreve a reação de combustão do gás natural, permitindo

o balanceamento estequiométrico para determinar o combustível equivalente e os coeficientes dos produtos da reação.



A Tabela 3 apresenta a composição molar do gás natural utilizada neste trabalho, fornecida pela Copergás e extraída do trabalho de Ochoa *et al.* (2014).

Tabela 3 ▶

Composição molar do gás natural.
Fonte: Ochoa *et al.* (2014)

Substância	Fórmula química	Porcentagem (%)
Metano	CH ₄	83,22
Etano	C ₂ H ₆	11,11
Propano	C ₃ H ₈	0,53
Dióxido de carbono	CO ₂	3,03
Nitrogênio	N ₂	2,11

Para a análise energética, é necessário quantificar a energia contida no combustível (Equação 2) e a energia dos gases de exaustão do motor, que serão utilizados para acionar termicamente o sistema de refrigeração por absorção (Equação 3).

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{m}_{gn} \times PCI \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{ge} = \dot{m}_{ge} \times cp_{ge} \times (T_{ge} - T_0) \quad (3)$$

O cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI) do gás natural (Equação 4) requer o conhecimento da fração mássica (y_i) e do poder calorífico de cada hidrocarboneto (PCI_i). A fração mássica é determinada pela composição do combustível, enquanto o PCI_i é um valor tabelado que depende do elemento analisado.

$$PCI = \sum_i y_i PCI_i \quad (4)$$

O calor específico a pressão constante dos gases de exaustão (cp_{ge}) é determinado pelo somatório do produto entre os calores específicos dos elementos que compõem os gases de exaustão e suas respectivas frações mássicas (Equação 5).

$$cp_{ge} = \sum_i y_i cp_i \quad (5)$$

A eficiência do motor é calculada pela razão entre a energia produzida (potência mecânica) e a energia consumida, conforme descrito na Equação 6.

$$\eta_{\text{motor}} = \frac{\dot{W}_{\text{motor}}}{\dot{Q}_{\text{comb}}} \quad (6)$$

O trocador de calor compacto utilizado para recuperar a energia dos gases de exaustão foi desenvolvido e validado por Correia (2009). Os dados do trocador de calor foram inseridos no modelo para calcular a vazão dos gases de exaustão necessária ao acionamento do *chiller*.

A unidade de refrigeração analisada neste estudo baseia-se em um sistema de refrigeração por absorção do tipo WFC-SC10, que utiliza o par LiBr/H₂O. A análise energética do sistema foi realizada através do software EES, aplicando as equações da Primeira Lei da Termodinâmica (Equação 7), do balanço de massa (Equação 8) e da conservação das espécies (Equação 9), considerando o regime permanente. Para simplificar a análise, foi adotado um volume de controle em cada componente do sistema.

$$\dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{v_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{v_s^2}{2} + gz_s \right) = 0 \quad (7)$$

$$\sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s = 0 \quad (8)$$

$$\sum \dot{m}_e x_e - \sum \dot{m}_s x_s = 0 \quad (9)$$

Na análise termodinâmica do *chiller* de absorção, foram adotadas as seguintes simplificações: a bomba da solução foi considerada isentrópica; as variações de energia cinética e potencial foram desprezadas; as perdas de calor para o ambiente e as perdas de carga nas tubulações foram desconsideradas; apenas o refrigerante passa pelo condensador e evaporador; as válvulas de expansão são adiabáticas; o refrigerante na saída do condensador e do evaporador é saturado; a solução de brometo de lítio está em equilíbrio nas saídas do absorvedor e do gerador de vapor; os volumes de controle de cada equipamento envolvem apenas os fluidos de entrada e saída; e os coeficientes globais de transferência de calor foram considerados constantes ao longo do processo.

A análise dos trocadores de calor que compõem o sistema foi realizada utilizando o modelo baseado no produto UA (Equação 10). De acordo com Herold, Radamacher e Klein (2016), o produto entre o coeficiente global de transferência de calor e a área do permutador é uma maneira conveniente de especificar o tamanho e o desempenho de um trocador de calor em um único parâmetro.

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{lm} \quad (10)$$

Uma análise detalhada do *chiller* de absorção do tipo WFC-SC10 pode ser encontrada em Ochoa (2010). Conforme Herold, Radamacher e Klein (2016, p. 8), o coeficiente de performance (COP) de um sistema de refrigeração por absorção é definido pela razão entre o calor removido pelo evaporador (saída desejada) e o somatório do calor fornecido ao gerador e do trabalho realizado pela bomba (entrada necessária), conforme a Equação 11.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{ger} + \dot{W}_{bomba}} \quad (11)$$

A validação do programa utilizado para a análise do sistema de refrigeração foi realizada. A Tabela 4 apresenta os erros encontrados ao se comparar os fluxos energéticos fornecidos pelo fabricante com os valores simulados. Os resultados confirmam a precisão do programa, com um erro máximo de 6,36% na troca de calor no evaporador. As discrepâncias observadas decorrem das condições simplificadoras adotadas, como a desconsideração das perdas de calor para o ambiente.

Tabela 4 ►

Comparação entre os valores da análise energética simulada e os fornecidos pelo fabricante.

Fonte: dados da pesquisa

Dados	Componente	Erro (%)
Fluxo de calor (kW)	Gerador	0,42
	Condensador	1,12
	Absorvedor	4,36
	Evaporador	6,36
COP	–	1,05

A análise da torre de resfriamento utilizada no sistema foi desenvolvida por Ochoa (2010) e integrada ao modelo para o cálculo da temperatura da água de resfriamento no condensador e no absorvedor.

A eficiência do sistema de cogeração é definida pela razão entre a soma da energia mecânica gerada pelo motor e a potência de refrigeração do sistema, dividida pela energia do combustível consumido, conforme expressa na Equação 12.

$$\eta_{cogeração} = \frac{\dot{W}_{motor} + \dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{comb}} \quad (12)$$

3 Resultados e discussão

As propriedades termodinâmicas do sistema de cogeração foram determinadas a partir da aplicação da metodologia previamente descrita, a qual modela os componentes do sistema de cogeração. Um código computacional desenvolvido no software EES foi utilizado para fornecer as propriedades termodinâmicas dos fluxos envolvidos no sistema e resolver o conjunto de equações baseadas na Primeira Lei da Termodinâmica.

Com o objetivo de exemplificar a simulação, alguns parâmetros foram fixados, conforme apresentado na Tabela 5. No entanto, esses valores podem ser ajustados

conforme a necessidade da simulação. Assim, em determinados momentos, são apresentados resultados provenientes da variação das condições de operação do sistema.

Tabela 5 ►

Parâmetros de entrada para o modelo computacional do sistema proposto.
Fonte: dados da pesquisa

	Dados de entrada	Valores
	Temperatura ambiente	27 °C
Motor	Porcentagem de ar teórico	115%
	Carga do motor	75%

3.1 Análise do motor

A operação do motor assegura a geração de potência e de gases de exaustão. A potência é convertida em energia elétrica por meio de um gerador, enquanto os gases de exaustão alimentam o sistema de refrigeração por absorção, aproveitando-se a energia residual contida nesses gases.

A Tabela 6 apresenta os resultados da análise do motor considerando a condição fixa especificada na Tabela 5.

Tabela 6 ►

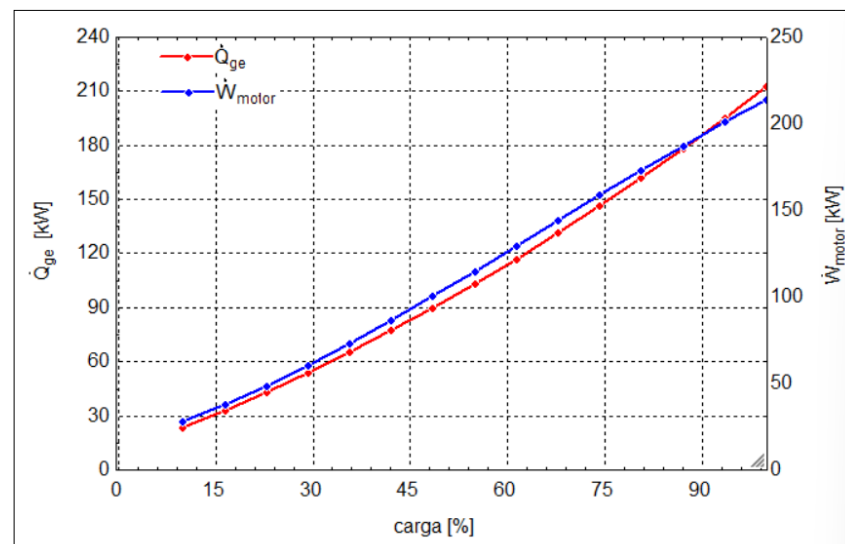
Resultado da análise do motor.
Fonte: dados da pesquisa

Potência do motor	160,6 kW
Temperatura dos gases de exaustão	677,9 °C
Vazão de combustível	0,009193 kgs ⁻¹
Vazão dos gases de exaustão	0,1697 kgs ⁻¹
Energia térmica dos gases de exaustão	148,4 kW
Eficiência do motor	39,37%

Como esperado, os valores apresentados na Tabela 6 variam em função das condições de operação do motor. A Figura 3 ilustra que, com o aumento da carga do motor, tanto a potência gerada quanto a energia dos gases de exaustão aumentam. Além disso, observa-se que o motor a gás empregado apresenta valores próximos de potencial térmico e elétrico.

Figura 3 ►

Relação entre a carga do motor, o calor dos gases de exaustão e a potência do motor.
Fonte: dados da pesquisa

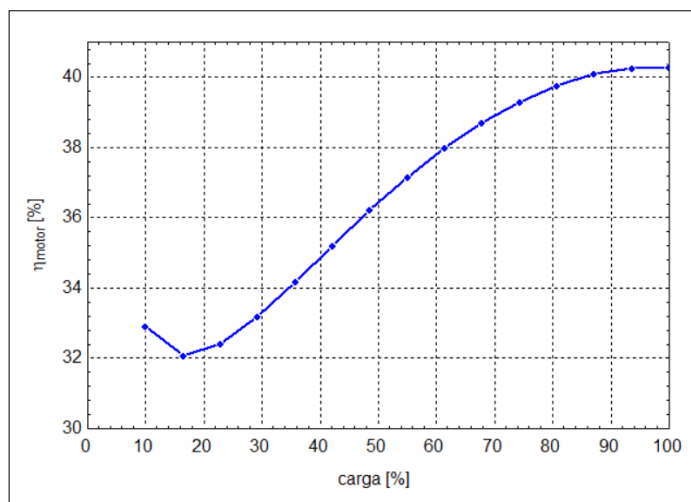


A eficiência do motor foi analisada considerando-se que a energia térmica é dissipada para o ambiente. Observa-se que a eficiência também é afetada pela variação da carga do motor, conforme demonstrado na Figura 4. Nesse gráfico, verifica-se que, à medida que o motor opera próximo à carga máxima, sua eficiência torna-se constante, em torno de 39%. No cálculo da eficiência, é considerada como energia útil apenas a potência mecânica gerada pelo motor, o que justifica o baixo valor de eficiência, uma vez que a energia térmica contida nos gases de exaustão é desconsiderada.

Figura 4 ►

Eficiência do motor versus carga do motor.

Fonte: dados da pesquisa



3.2 Análise do sistema de refrigeração por absorção

Tabela 7 ▼

Parâmetros de entrada para o modelo computacional do sistema de absorção.

Fonte: dados da pesquisa

De acordo com os catálogos do fabricante do *chiller* WFC-SC10, Yazaki Energy System (2003), o refrigerador opera de forma eficiente quando a água quente que entra no gerador está na faixa de 70 °C a 95 °C. Para a presente análise do sistema de absorção, a temperatura foi fixada em 85 °C. Os demais dados de entrada utilizados na simulação estão apresentados na Tabela 7 e foram baseados no estudo de Ochoa (2010).

	Absorvedor	7,5202
	Gerador	15,2731
Produto UA dos trocadores de calor (kW.K-1)	Condensador	10,8153
	Evaporador	7,0616
	Efetividade do trocador de calor de solução	72%
Pressão absoluta dos fluxos externos (kPa)	–	186,1
Temperaturas externas (°C)	Entrada de água fria no absorvedor	31
	Entrada de água gelada no evaporador	12,5
	Bomba de solução	0,22
Vazões mássicas (kg.s-1)	Entrada de água quente no gerador	2,39
	Entrada de água fria no absorvedor	5,08
	Entrada de água gelada no evaporador	1,52

Os resultados da análise energética e do fluxo de energia para cada componente do sistema são mostrados na Tabela 8, considerando os valores previamente definidos.

Tabela 8 ▶

Resultados da análise energética do ciclo de refrigeração por absorção de simples efeito.

Fonte: dados da pesquisa

Componente	Valor
Gerador [kW]	50,41
Condensador [kW]	39,54
Absorvedor [kW]	48,32
Bomba [kW]	0,0007931
Evaporador [kW]	37,44
Desempenho	
COP [-]	0,7427

3.3 Análise energética do sistema de cogeração

Conforme mencionado anteriormente, de acordo com o fabricante, o refrigerador opera quando a água quente na entrada do gerador está na faixa de 70 °C a 95 °C. Diferentemente do valor fixo adotado na subseção 3.2 para a análise do sistema de refrigeração, essa temperatura apresenta variações, pois depende diretamente do motor, mais precisamente de sua carga, uma vez que o acionamento do sistema ocorre pelos gases de exaustão do motor.

Ao analisar a unidade de cogeração, constatou-se que, para o sistema de refrigeração operar entre as temperaturas de 70 °C e 95 °C, conforme indicado pelo fabricante, o motor deve funcionar com uma carga entre aproximadamente 24% e 52%. Ou seja, a carga mínima necessária para gerar gases de combustão com temperatura e vazão suficientes para manter a temperatura mínima no gerador é de 24%. Por outro lado, para manter o gerador operando na temperatura máxima permitida pelo fabricante, o motor deve alcançar uma carga de 52%. A partir desse ponto, propôs-se a divisão dos gases de exaustão em dois fluxos: o primeiro seria direcionado ao trocador de calor para acionar o sistema de refrigeração, enquanto o segundo poderia ser destinado a outros processos, como a produção de água quente, o acionamento de equipamentos que gerem energia mecânica ou o suprimento de outro *chiller* de absorção para geração de frio.

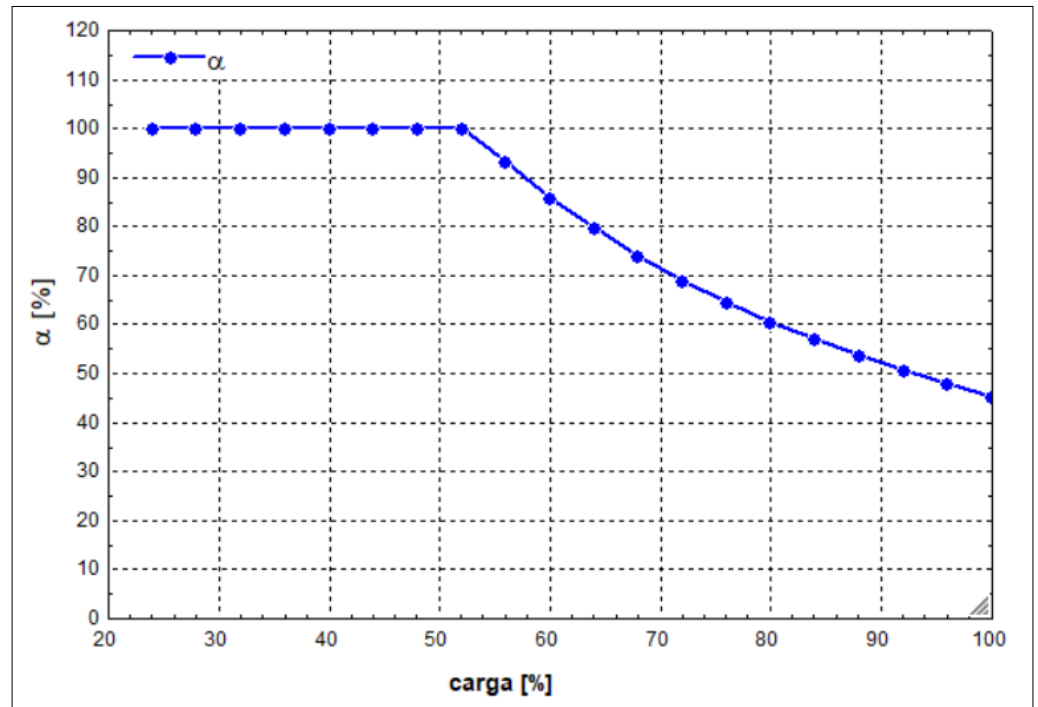
Para os valores de entrada padrão apresentados na Tabela 5 e uma temperatura de entrada da água quente no gerador fixada em 85 °C, verificou-se que o motor produz energia térmica suficiente para abastecer o *chiller* e, simultaneamente, atender a outro processo. Nesse caso, apenas 42% dos gases de exaustão liberados pelo motor a gás seriam necessários para o acionamento do sistema de absorção.

Ao variar a carga do motor e manter a temperatura da água quente na faixa indicada pelo fabricante (70 °C a 95 °C), observa-se que a porcentagem dos gases de exaustão destinada ao *chiller* também varia. A Figura 5 apresenta a relação entre a carga do motor e a porcentagem dos gases de exaustão destinados ao *chiller* (α). Constatou-se que a divisão dos gases, para manter o funcionamento do *chiller* dentro das recomendações do fabricante, torna-se necessária apenas em cargas superiores a aproximadamente 52%.

Figura 5 ►

Relação entre a porcentagem da vazão dos gases de exaustão necessária para acionar o sistema de refrigeração e a carga do motor a gás.

Fonte: dados da pesquisa

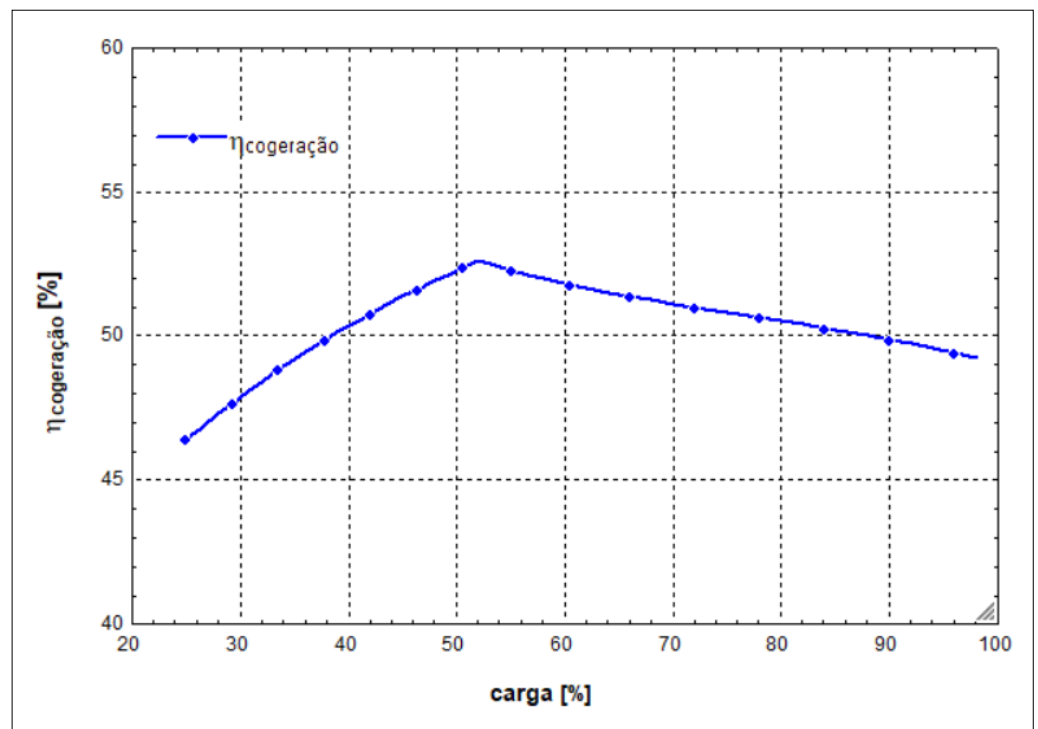


É relevante destacar que a modelagem do processo secundário não está no escopo deste trabalho. Por fim, ao analisar a eficiência do sistema de cogeração, foi possível relacioná-la à carga do motor. Observou-se um pequeno aumento na eficiência com o aumento da carga do motor, até o limite de 52% (Figura 6). Nesse ponto, os gases de exaustão gerados pelo motor não podem ser completamente direcionados ao sistema de refrigeração, pois este já estará operando em sua capacidade máxima, com a maior temperatura de geração permitida, 95 °C.

Figura 6 ►

Relação entre a eficiência energética do sistema de cogeração e a carga do motor a gás.

Fonte: dados da pesquisa



A partir desse momento, os gases de exaustão passam a ser divididos (Figura 5), o que resulta em uma queda na eficiência do sistema de cogeração, devido ao não aproveitamento do excesso de gás. Ainda assim, a eficiência da planta de cogeração permanece superior à eficiência do motor funcionando isoladamente, caso a energia térmica dos gases de exaustão fosse completamente desperdiçada. A Tabela 9 apresenta essa diferença de eficiência, considerando os valores de entrada padronizados na Tabela 5.

Tabela 9 ▶

Comparação entre as eficiências do motor e do sistema de cogeração.

Fonte: dados da pesquisa

Eficiência do motor a gás	Eficiência do sistema de cogeração	Diferença
39,37%	50,82%	11,45%

A cogeração representa uma das opções mais eficientes para a geração de energia, o que é evidente ao se analisar o ganho de eficiência de 11,45% obtido quando o motor a gás foi utilizado para produzir energia mecânica e térmica simultaneamente. Esse ganho poderia ser ainda maior, caso o processo secundário, que recebe os gases de exaustão não aproveitados pelo *chiller* de absorção, fosse modelado, e a energia gerada por ele, seja em forma de calor ou trabalho, fosse contabilizada no cálculo da eficiência do sistema de cogeração.

4 Conclusão

A análise de sensibilidade realizada neste estudo permitiu avaliar o desempenho do sistema de cogeração em diferentes cenários de operação do grupo gerador (motor), identificando as condições ideais de funcionamento tanto do sistema de cogeração quanto de seus dispositivos componentes. Assim, verificou-se que o *chiller* de absorção demanda aproximadamente 42% da vazão dos gases de exaustão do grupo gerador para operar plenamente. Dessa forma, constatou-se que o sistema de cogeração analisado apresenta condições energeticamente compatíveis com a maioria das aplicações práticas, uma vez que é possível destinar mais de 50% do rejeito térmico do motor para um processo secundário.

Adicionalmente, observou-se que, mesmo nas condições de funcionamento analisadas, foi alcançado um COP de 0,7427 para o *chiller* de absorção, desempenho compatível tanto com as especificações apresentadas pelo fabricante em seu manual quanto com as abordagens descritas na literatura técnica.

Com base nos resultados obtidos, propõe-se o desenvolvimento de novas configurações para o sistema de cogeração, como, por exemplo, o dimensionamento de um processo secundário que maximize o aproveitamento dos gases de combustão, contribuindo para o aumento da eficiência global do sistema. Por fim, conforme já era esperado, a análise evidenciou que o sistema de cogeração apresentou uma eficiência superior, em torno de 51%, quando comparada à eficiência de seus componentes isolados.

Financiamento

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro concedido ao primeiro autor por meio de bolsa de mestrado, essencial para o desenvolvimento deste trabalho. O segundo autor agradece ao CNPq pela bolsa de produtividade nº 3303417/2022-6.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Nota

Este artigo é derivado de dissertação do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/33816>.

Contribuições ao artigo

ALCANTARA, S. C. S.; OCHOA, A. A. V.: concepção ou desenho do estudo/pesquisa; análise e/ou interpretação dos dados; revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. **COSTA, J. A. P.; CÉZAR, K. L.:** revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

ABBAS, T.; ISSA, M.; ILINCA, A. Biomass cogeneration technologies: a review. **Journal of Sustainable Bioenergy Systems**, v. 10, n. 1, p. 1-15, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4236/jsbs.2020.101001>.

ALCANTARA, S. C. S.; OCHOA, A. A. V.; COSTA, J. A. P.; MICHIMA, P. S. A.; SILVA, H. C. N. Natural gas based trigeneration system proposal to an ice cream factory: an energetic and economic assessment. **Energy Conversion and Management**, v. 197, 111860, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111860>.

ARABI, M.; DEHGHANI, M. R. Measurement of solubility and density of water + lithium bromide + lithium chloride and water + lithium bromide + sodium formate systems. **International Journal of Refrigeration**, v. 56, p. 99-104, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.04.002>.

ARAÚJO, L. R.; MORAWSKI, A. P.; BARONE, M. A.; DONATELLI, J. L. M.; SANTOS, J. J. C. S. On the effects of thermodynamic assumptions and thermoeconomic approaches for optimization and cost allocation in a gas turbine cogeneration system. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 42, 323, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02402-6>.

ATANASOAE, P. Technical and economic assessment of micro-cogeneration systems for residential applications. **Sustainability**, v. 12, n. 3, 1074, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12031074>.

BADAMI, M.; GERBONI, R.; PORTORARO, A. Determination and assessment of indices for the energy performance of district heating with cogeneration plants. **Energy**, v. 127, p. 697-703, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.136>.

CALDAS, A. M. A.; CALDAS, A. G. A.; SANTOS, C. A. C.; OCHOA, A. A. V.; CÉZAR, K. L.; MICHIMA, P. S. A. Design, development and construction of Hall effect-based turbine meter type to measure flow in low-cost lithium bromide salt: proposed flowmeter and first results. **International Journal of Refrigeration**, v. 112, p. 240-250, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.01.002>.

CAVALCANTI, E. J. C.; CARVALHO, M.; OCHOA, A. A. V. Exergoeconomic and exergoenvironmental comparison of diesel-biodiesel blends in a direct injection engine at variable loads. **Energy Conversion and Management**, v. 183, p. 450-461, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.113>.

CÉZAR, K. L.; CALDAS, A. G. A.; CALDAS, A. M. A.; CORDEIRO, M. C. L.; SANTOS, C. A. C.; CÉZAR, K. L.; OCHOA, A. A. V.; MICHIMA, P. S. A. Development of a novel flow control system with arduino microcontroller embedded in double effect absorption chillers using the LiBr/H₂O pair. **International Journal of Refrigeration**, v. 111, p. 124-135, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.11.014>.

CHUN, A.; DONATELLI, J. L. M.; SANTOS, J. J. C. S.; ZABEU, C. B.; CARVALHO, M. Superstructure optimization of absorption chillers integrated with a large internal combustion engine for waste heat recovery and repowering applications: thermodynamic and economic assessments. **Energy**, v. 263, Part E, 125970, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125970>.

CORREIA, R. C. **Estudo e desenvolvimento de trocadores de calor compactos para microgeração**: contribuição para o desenvolvimento da microgeração com o uso do gás natural no Brasil. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

DADPOUR, D.; DEYMI-DASHTEBAYAZ, M.; HOSEINI-MODAGHEGH, A.; ABBASZADEH-BAJGIRAN, M.; SOLTANIYAN, S.; TAYYEBAN, E. Proposing a new method for waste heat recovery from the internal combustion engine for the double-effect direct-fired absorption chiller. **Applied Thermal Engineering**, v. 216, 119114, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119114>.

FREIRE, R. M. M.; SANTOS, A. Á. B.; ALMEIDA, A. G. S. Thermo-economic evaluation of three proposals for the energy cogeneration unit powered by natural gas, biogas, or syngas. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 42, 440, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02526-9>.

FRENKEL, M.; VILK, A.; LEGCHENKOVA, I.; SHOVAL, S.; BORMASHENKO, E. Mini-generator of electrical power exploiting the marangoni flow inspired self-propulsion. **ACS Omega**, v. 4, n. 12, p. 15265-15268, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02257>.

GARIMELLA, S.; PONKALA, M. J.; GOYAL, A.; STAEDTER, M. A. Waste-heat driven ammonia-water absorption *chiller* for severe ambient operation. **Applied Thermal Engineering**, v. 154, p. 442-449, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.098>.

HEROLD, K. E.; RADAMACHER, R.; KLEIN, S. A. **Absorption chillers and heat pumps**. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2016.

KABEYI, M. J. B.; OLANREWAJU, O. A. Cogeneration potential of an operating diesel engine power plant. **Energy Reports**, v. 8, supl. 16, p. 744-754, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.447>.

KALLIO, S.; SIROUX, M. Hybrid renewable energy systems based on micro-cogeneration. **Energy Reports**, v. 8, supl. 1, p. 762-769, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.158>.

KASAEIAN, A.; BELLOS, E.; SHAMAEIZADEH, A.; TZIVANIDIS, C. Solar-driven polygeneration systems: recent progress and outlook. **Applied Energy**, v. 264, 114764, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114764>.

LIMA, A. A. S.; LEITE, G. N. P.; OCHOA, A. A. V.; SANTOS, C. A. C.; COSTA, J. A. P.; MICHIMA, P. S. A.; CALDAS, A. M. A. Absorption refrigeration systems based on ammonia as refrigerant using different absorbents: review and applications. **Energies**, v. 14, n. 1, 48, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14010048>.

LIRA, R. B.; FERREIRA-NETO, M.; DIAS, N. S.; MEDEIROS, J. F.; BRITO, R. F.; LEMOS, M.; FERNANDES, C. S.; SÁ, F. V. S. Biomass, grain yield, ethanol production, and energy cogeneration of sweet sorghum irrigated with domestic sewage effluent. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, p. 9131-9140, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01894-z>.

MARION, M.; LOUAHLIA, H.; GUALOUS, H. Performances of a CHP Stirling system fuelled with glycerol. **Renewable Energy**, v. 86, p. 182-191, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.012>.

MARQUES, A. S.; CARVALHO, M.; OCHOA, A. A. V.; ABRAHÃO, R.; SANTOS, C. A. C. Life cycle assessment and comparative exergoenvironmental evaluation of a micro-trigeneration system. **Energy**, v. 216, 119310, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119310>.

MATELLI, J. A. Conceptual design of biomass-fired cogeneration plant through a knowledge-based system. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 38, p. 535-549, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s40430-015-0326-4>.

MURUGAN, S.; HORÁK, B. A review of micro combined heat and power systems for residential applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 64, p. 144-162, 2016a. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.064>.

MURUGAN, S.; HORÁK, B. Tri and polygeneration systems: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 1032-1051, 2016b. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.127>.

NIKBAKHTI, R.; WANG, X.; HUSSEIN, A. K.; IRANMANESH, A. Absorption cooling systems: review of various techniques for energy performance enhancement. **Alexandria Engineering Journal**, v. 59, n. 2, p. 707-738, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.036>.

OCHOA, A. A. V. **Análise exergoeconômica de um chiller de absorção de 10TR integrado a um sistema de microgeração com microturbina a gás de 30 kW**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade

Federal de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/4905>. Acesso em: 6 set. 2023.

OCHOA, A. A. V.; DUTRA, J. C. C.; HENRÍQUEZ, J. R. G.; ROHATGI, J. Energetic and exergetic study of a 10RT absorption chiller integrated into a microgeneration system. **Energy Conversion and Management**, v. 88, p. 545-553, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.08.064>.

OLIVEIRA, L. A. J.; BURIN, E. K.; BAZZO, E. Exergy, economic and environmental assessment of a hybrid solar-biomass cogeneration plant applied to the corn ethanol industry. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 45, 433, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04337-0>.

QASEM, N. A. A.; LAWAL, D. U.; ALJUNDI, I. H.; ABDALLAH, A. M.; PANCHAL, H. Novel integration of a parallel-multistage direct contact membrane distillation plant with a double-effect absorption refrigeration system. **Applied Energy**, v. 323, 119572, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119572>.

QIN, Y.; ZHANG, H.; ZHANG, X. Integrating high-temperature proton exchange membrane fuel cell with duplex thermoelectric cooler for electricity and cooling cogeneration. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 47, n. 91, p. 38703-38720, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.041>.

SANTOS, C. M. S. **Análise exergoeconômica de uma unidade de cogeração a gás natural com refrigeração por absorção**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2005.

SCHNEIDER, T.; MÜLLER, D.; KARL, J. A review of thermochemical biomass conversion combined with Stirling engines for the small-scale cogeneration of heat and power. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 134, 110288, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110288>.

SCHREIBER, J. G. **Status of the NASA Stirling Radioisotope Project**. Cleveland: NASA, 2007. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20070022839>. Acesso em: 5 set. 2023.

SZABÓ, G. L. Exergetic optimization of absorption chillers: a case study. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 28, 101634, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101634>.

UNITED NATIONS. **Global Issues: Population**. [S.l.]: UN, 2024. Disponível em: <https://www.un.org/en/global-issues/population>. Acesso em: 7 fev. 2022.

VALENTI, G.; SILVA, P.; FERGNANI, N.; DI MARCOBERARDINO, G.; CAMPANARI, S.; MACCHI, E. Experimental and numerical study of a micro-cogeneration Stirling engine for residential applications. **Energy Procedia**, v. 45, p. 1235-1244, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.129>.

WANG, W.; FAN, L. W.; ZHOU, P. Evolution of global fossil fuel trade dependencies. **Energy**, v. 238, Part C, 121924, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121924>.

XU, A.; XU, M.; XIE, N.; LIANG, J.; ZENG, K.; KOU, G.; LIU, Z.; YANG, S. Performance analysis of a cascade lithium bromide absorption refrigeration/dehumidification process driven by low-grade waste heat for hot summer and cold winter climate area in China. **Energy Conversion and Management**, v. 228, 113664, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113664>.

YAZAKI ENERGY SYSTEM. **WFC-SC(H) chiller & chiller-heater**. 2. Installation. WFC-SC(H)10, 20, 30 & 50. Version 11-1. 2003. Disponível em: https://yazaki-nordic.se/onewebmedia/WFC-SC10-20-30-50_Installation_en.pdf. Acesso em: 10 out. 2023.

YUE, C.; HAN, D.; PU, W.; HE, W. Energetic analysis of a novel vehicle power and cooling/heating cogeneration energy system using cascade cycles. **Energy**, v. 82, p. 242-255, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.035>.