

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, ^[3] kleber@ufpi.edu.br. Universidade Federal de Piauí (UFPI), Brasil

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

* autor correspondente

Resumo

Os sistemas de cogeração de energia apresentam o potencial necessário à exploração racional dos recursos energéticos, vantagens econômicas e ambientais, segundo vários níveis de complexidade. Este artigo mostra a análise energética de um sistema de cogeração de energia composto por um grupo gerador, acionado por gás natural, um *chiller* de absorção de simples efeito operando com LiBr/H₂O, um trocador de calor e uma torre de resfriamento. A modelagem termodinâmica foi desenvolvida na plataforma computacional Engineering Equation Solver®, EES-32 da F-Chart, e teve como propósito avaliar a influência dos principais parâmetros operacionais do sistema de cogeração. Embasando-se em dados fornecidos pelos fabricantes dos componentes do sistema e na primeira lei da termodinâmica, foi possível analisar o efeito de parâmetros como a carga do motor na divisão dos gases de exaustão entre o acionamento do *chiller* de absorção e um processo secundário. Para valores padrões adotados, o *Coefficient Of Performance* (COP) encontrado foi de 0,7427, sendo necessário apenas 50% dos gases rejeitados pelo motor para o acionamento do *chiller*, a eficiência energética do sistema de cogeração ficou em torno de 45,5%, potencial que pode ser aumentado se 100% dos gases de exaustão do motor fossem aproveitados.

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

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

Abstract

Energy cogeneration systems present the necessary potential for the rational exploitation of energy resources, economic and environmental advantages, according to various levels of complexity. This paper shows an energetic analysis of a cogeneration system composed of a group generator powered by natural gas, a simple effect absorption chiller operating with LiBr/H₂O, a heat exchanger and a cooling tower. The thermodynamic modeling was developed on the Engineering Equation Solver®, EES-32 computational platform from F-Chart, to evaluate the influence of the main operational parameters of the cogeneration system. Based on data provided by the manufacturers of the system components and the first law of thermodynamics, it was possible to analyze the parameters effect such as the engine load on the division of the exhaust gases between the drive of the absorption chiller and a secondary process. For adopted standard values, COP was 0.7427, requiring only 50% of the gases rejected by the engine to operate the chiller, energy efficiency of the cogeneration system was around 45.5%, and the potential could be increased if 100% of the engine exhaust gases were used.

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

Nomenclatura

Abreviações	Descrição
COP	Coefficiente de 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]
cp	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_{lm}	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 humanidade já ultrapassou o marco de 8 bilhões de habitantes segundo as Nações Unidas (UNITED NATIONS, 2022), e um nível de desenvolvimento econômico, científico e tecnológico, perceptivelmente, incompatível com os meios tradicionais de conversão energética e a disponibilidade de recursos naturais. Logo, os sistemas que possuam a finalidade de obter o máximo de eficiência energética têm sido o roteiro mais lógico e seguro para a tentativa de atenuar esta conjuntura, bem como garantir o progresso da humanidade. Dentro desse conceito, surgem como alternativa os sistemas de cogeração, principalmente por tornarem possível a redução de desperdícios energéticos a partir da exploração de uma única fonte, além de serem versáteis e confiáveis.

A cogeração, ou produção combinada de calor e energia elétrica, consiste no emprego de um conjunto de componentes interligados no sentido de proporcionar, simultaneamente, a produção de mais de uma forma útil de energia, geralmente, eletricidade e calor de processo (Abbas; Issa; Ilinca, 2020; Kabeyi; Olanrewaju, 2022; Matelli, 2016). Essa estratégia, além de reduzir a dependência das indústrias com combustíveis fósseis, viabiliza a redução de seus custos operacionais e mitigação da dependência das concessionárias de energia elétrica, mostrando-se uma melhor opção sob o ponto de vista da Segunda Lei da Termodinâmica. Caso seja possível a substituição dos combustíveis fósseis por renováveis, tais como biogás e biomassa, torna-se uma forte aliada para o combate ao aquecimento global (Cavalcanti; Carvalho; Ochoa 2019; Freire; Santos; Almeida, 2020; Ochoa *et al.*, 2014).

Segundo Wang, Fan e Zhou (2022), a demanda por energia aumentará em mais de 300% até o término do século XXI. E, que há uma apreciável desigualdade mundial na distribuição dos recursos energéticos, exigindo estratégias complexas de abastecimento, por parte das nações, para garantir a segurança energética. Esse cenário tem provocado um maior interesse na produção de energia descentralizada, no que diz respeito à micro e minigeração (Frenkel *et al.*, 2019). Esse nível de provimento energético é perfeitamente compatível com os sistemas de cogeração, onde a produção simultânea e descentralizada de calor e eletricidade têm protagonizado os esforços da União Europeia para redução de uso de fontes primárias e emissões de poluentes, através dos chamados sistemas de micro cogeração (Atanasoae, 2020; Kallio; Siroux, 2022; Murugan; Horák, 2016a; Schneider; Müller; Karl, 2020).

De acordo com os níveis de aproveitamento da fonte primária de energia, os sistemas de cogeração podem ser classificados como sistemas de trigeração e de poligeração. No primeiro, há geralmente fornecimento combinado de aquecimento, frio e eletricidade. No segundo existe a possibilidade de múltiplas aplicações a partir do calor, tais como: refrigeração, secagem, ventilação, dessalinização, preaquecimento, entre outras (Kasaeian *et al.*, 2020; Murugan; Horák, 2016b).

A literatura está repleta de contribuições visando o aperfeiçoamento contínuo dos sistemas de cogeração de energia. Uma análise energética foi conduzida com sucesso por Yue *et al.* (2015), para sistemas de trigeração inovadores em veículos automotivos, utilizando o calor residual dos gases de exaustão e do sistema de arrefecimento como fonte primária. Marion, Lquahlia e Gualous (2016) avaliaram o desempenho de sistemas de cogeração para configurações distintas de um motor Stirling (α , β e γ) acionados por glicerol, determinando a configuração que permitiu alcançar o mínimo consumo específico e o maior trabalho mecânico. Por sua vez, Valenti *et al.*, (2014) validaram experimentalmente um modelo numérico de uma unidade micro-cogeração com motor Stirling comercial de 1 kW de capacidade elétrica. 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, estes dispositivos mostraram mais atraentes para aplicações de cogeração de energia.

Em maior escala, Badami, Gerboni e Portoraro (2017) conduziram uma análise energética para avaliar e determinar os índices de desempenho reais de um sistema de cogeração destinado ao aquecimento distrital em Turin, Itália. Recentemente, Qin, Zhang e Zhang (2022) determinaram, via análises energéticas e exergéticas, o limite teórico assim como a viabilidade de um sistema de cogeração híbrido, envolvendo uma célula para combustão de hidrogênio e um sistema de refrigeração termoeletrônico duplex, sendo esse último composto por um gerador termelétrico acionado pelo rejeito térmico da célula combustível, e 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 confrontados por Araújo *et al.* (2020) que conseguiram, via análises termoeconômicas e de alocação de custos, determinar quais os melhores cenários e suas implicações para a otimização de um sistema de cogeração envolvendo uma turbina a gás. Oportunamente, Alcântara *et al.* (2019) analisaram a proposta de diferentes cenários de trigeração para uma planta de fabricação de sorvetes, a partir de uma avaliação termoeconômica e dos indicadores econômicos: valor presente líquido, taxa interna de retorno e *payback*. Os resultados alcançados não somente se mostraram úteis para o entendimento e aperfeiçoamento destes sistemas, como também nortearam os investimentos financeiros vindouros da fábrica estudada.

Uma análise de desempenho termodinâmico, econômico e ambiental para uma usina de produção de etanol foi realizada por Oliveira, Burin e Bazzo (2023), objetivando investigar a proposta de um acionamento híbrido (energia solar térmica e biomassa) da planta de produção sob os aspectos energéticos e exergéticos, somados a um estudo de viabilidade econômica e ambiental. Nessa abordagem, provou-se não somente a viabilidade do sistema de cogeração, como também foi possível comprovar uma redução nas emissões de CO₂ de 143.332 t/ano, para duas localizações e condições ambientais distintas. Do mesmo modo, Lira *et al.* (2023) conduziram um exitoso estudo experimental para avaliar o potencial energético de uma planta de cogeração para produção de etanol, tendo os briquetes de sorgo sacaroso como fonte primária de energia, avaliando a biomassa, produção de etanol

e a cogeração de energia, encontrando os melhores valores para condições de irrigação com efluentes de esgoto doméstico.

O uso da tecnologia de cogeração está fortemente ligado aos sistemas de refrigeração por absorção, que usam energia térmica para produzir resfriamento (Arabi; Dehghani, 2015). Essas unidades são acionadas por fontes térmicas de energia e, ao integrarem sistemas de cogeração, podem incluir rejeitos térmicos no seu acionamento, a níveis tais 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). Logo, esses importantes componentes dos sistemas de cogeração têm sido, igualmente, alvo de constantes contribuições, uma vez que se mostraram fortes aliados à preservação ambiental, em razão de utilizarem fluidos de trabalho que não colaboram com o aquecimento global (Caldas *et al.* 2020; C ezar *et al.* 2020; Lima *et al.* 2021).

Visando contribuir com os avanços tecnológicos em refrigeradores por absor o, Szabó (2021) estabeleceu novos indicadores qualitativos, os quais somados aos já consolidados indicadores quantitativos, permitiu traçar, de forma clara e prática, os procedimentos necessários ao alcance da otimiza o exergética em *chillers* de absor o. Ao passo que Chun *et al.* (2023), por meio de modelagens termodinâmicas e termoeconômicas complexas e disruptivas, determinaram o melhor *chiller* de absor o o qual atendia as condi oes de otimiza o energética de uma superestrutura. Já Marques *et al.* (2021) evidenciaram os benefícios econ micos, técnicos e ambientais de um sistema de micro cogera o composto por um motor de combustão interna movido a gás e um refrigerador de absor o am nia-água de 5 TR.

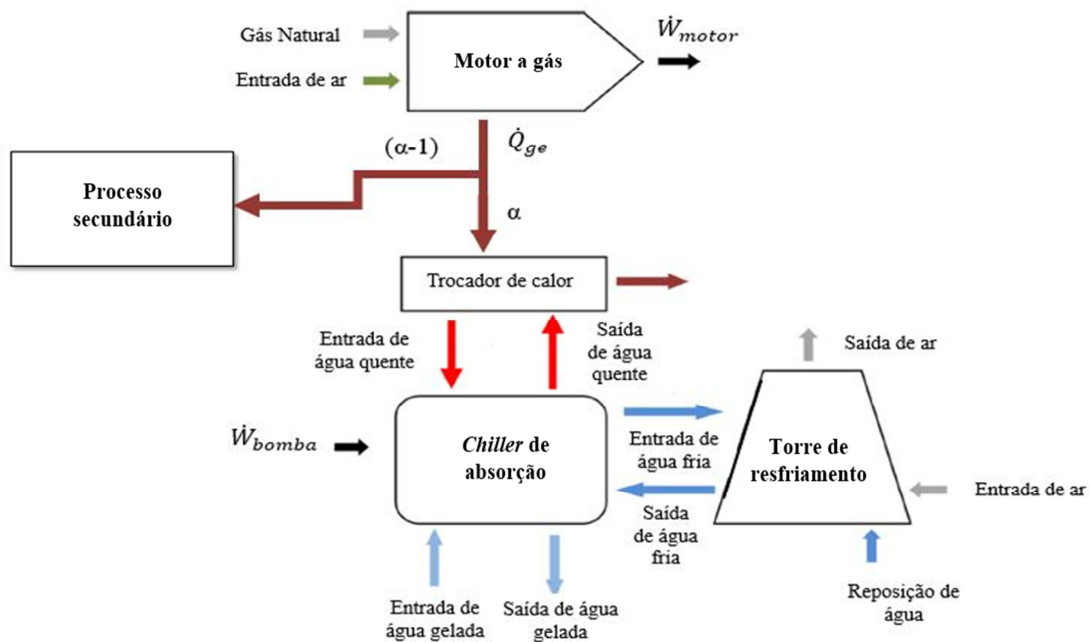
Diante do exposto, a presente abordagem propõe-se a analisar energeticamente uma unidade de cogera o de energia, composto por um grupo gerador utilizando gás natural como combustível, um sistema de refrigera o por absor o com capacidade de 35,16 kW e um fornecimento de calor para um processo secundário. Dentre das principais contribui es tem-se que: i) desenvolvimento de um modelo termodinâmico computacional de cogera o de energia utilizando o gás natural como combustível de acionamento; ii) análise de sensibilidade dos principais parâmetros de opera o do grupo gerador considerando cargas parciais.

O restante do artigo foi estruturado da seguinte forma: a se o 2 descreve a modelagem energética do sistema de cogera o, a se o 3 mostra a discussão e interpreta o dos resultados obtidos com o modelo, e a se o 4 mostra as conclusões mais importantes sobre o estudo apresentado de cogera o.

2 Metodologia

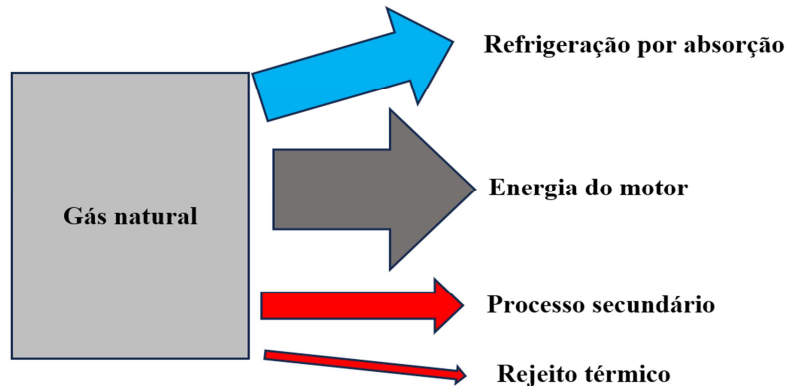
O sistema consiste basicamente em um motor de combustão interna operando com gás natural (Santos, 2005), um *chiller* de absor o de simples efeito com uma capacidade de resfriamento de 35,16 kW da fabricante Yazaki (Yazaki Energy System, 2003), um trocador de calor compacto, uma bomba de circula o e uma torre de resfriamento (Figura 1). O objetivo elementar desse sistema de cogera o   obter, a partir da combustão do gás natural, energia elétrica e posteriormente com a reciclagem dos gases de exaustão (que ocorre no trocador de calor compacto), obter água gelada através de um *chiller* de absor o. A cogera o se inicia com a queima da mistura de ar e gás natural no motor gerando potência mecânica, W_{motor} . Os gases de exaustão provenientes da combustão podem seguir dois caminhos, o primeiro destina-se ao acionamento de um sistema de refrigera o por absor o, o qual opera com o par LiBr/H₂O e caso haja excesso de produtos de combustão, esses irão para um processo secundário, Figura 2. O acionamento do *chiller* de absor o   realizado a partir do aproveitamento dos gases de combustão por intermédio de um trocador de calor contracorrente, assim a energia contida nos gases de combustão   aproveitada para aquecer água quente. Esse circuito de água quente entra no *chiller* de absor o através do gerador, aquece a mistura de LiBr/H₂O e gera vapor de  gua. Logo após a dessor o do refrigerante ( gua) no gerador, o vapor de água   liquefeito no condensador, passando em seguida 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 em dire o ao absorvedor, onde se mistura com a soluço rica em brometo de lítio vinda do gerador, liberando calor. O resfriamento interno do sistema de refrigera o   realizado por uma torre de resfriamento pelo processo evaporativo removendo calor no absorvedor e no condensador.

Figura 1 – Sistema de cogeração utilizando um motor a gás para acionamento primário



Fonte: adaptado de Ochoa *et al.* (2014)

Figura 2 – Diagrama de Sankey do sistema de cogeração



Fonte: elaborado pelos autores

2.1 Modelagem termodinâmica do motor

Com a finalidade de realizar a modelagem do motor, os dados do fornecedor do conjunto moto-gerador (Tabela 1), Leon Heimer[®], foram utilizados para encontrar equações paramétricas relacionando 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 (representado pela demanda (ou percentual) que o grupo gerador encontra durante sua operação.).

Tabela 1 – Dados do conjunto moto-gerador fornecidos pelo fabricante

Carga (%)	Vazão de gás natural (10^{-3} kg/s)	Temperatura dos gases de exaustão (°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

Fonte: Leon Heimer *apud* Santos (2005).

As três equações são apresentadas na Tabela 2, assim como seus respectivos coeficientes de correlação, R^2 . Essas relações foram escolhidas devido à carga do motor ser um parâmetro chave para o funcionamento do sistema de cogeração.

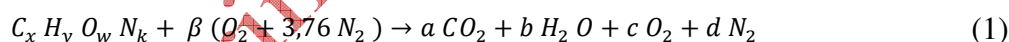
Tabela 2 – Ajuste de curvas a partir dos dados fornecidos pelo fabricante do motor a gás

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

Fonte: elaborado pelos próprios autores.

Para as três equações foram obtidos coeficientes de correlação próximos de 1 (0,9924, 0,9912 e 0,9999 respectivamente), e somente para a potência elétrica do motor foi necessário utilizar um polinômio de terceiro grau para obter uma melhor correlação.

A energia térmica dos gases de combustão foi determinada tendo como base a Lei da Conservação das Espécies, levando em consideração a quantidade de cada hidrocarboneto presente no gás. A Equação 1 apresenta a reação de combustão do gás natural, permitindo realizar o balanceamento estequiométrico, determinando o combustível equivalente bem como os coeficientes dos produtos da reação.



A Tabela 3 mostra a composição do gás natural utilizada nesse trabalho, fornecida pela COPERGÁS, retirada do trabalho de Ochoa *et al.* (2014).

Tabela 3 – Composição molar do gás natural

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

Fonte: Ochoa *et al.* (2014)

Para a análise energética deve-se quantificar a energia contida no combustível, Equação 2, e a energia dos gases de exaustão do motor, que irão acionar termicamente o sistema de refrigeração por absorção, Equação 3.

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

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

Para o cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI) do gás natural (Equação 4), é necessário conhecer a fração mássica e o poder calorífico de cada hidrocarboneto, y_i e PCI_i respectivamente. A fração mássica é determinada pela composição do combustível e o PCI_i é um valor pré-determinado (tabelado), que depende do elemento analisado.

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

O calor específico à pressão constante dos gases de exaustão, cp_{ge} , é obtido pelo somatório do produto dos calores específicos dos elementos que compõem os gases de exaustão e a fração mássica de cada um dos elementos que compõe os gases de exaustão, Equação 5.

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

A eficiência do motor é determinada pela razão entre a energia produzida, ou seja, a potência mecânica, e a energia consumida, fornecida pela Equação 6.

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

2.2 Trocador de calor

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 para acionar o *chiller*.

2.3 Sistema de refrigeração por absorção

A unidade de refrigeração simulada nesta análise tem como base o sistema de refrigeração por absorção que utiliza o par LiBr/H₂O, do tipo WFC-SC10. A análise energética desse sistema foi realizada através do software EES, utilizando a equação da primeira lei da termodinâmica, aplicando o balanço de energia (Equação 7), o balanço de massa (Equação 8) e a conservação das espécies (Equação 9), para regime permanente. Foi considerado um volume de controle em cada componente do sistema, facilitando assim a análise do mesmo.

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

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

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

Para realizar a análise termodinâmica do *chiller* de absorção foram adotadas as seguintes condições simplificadoras: a bomba da solução é isentrópica; as variações de energia cinética e potencial são desprezíveis; as perdas de calor para o meio e as perdas de carga na tubulação são desprezíveis; Somente refrigerante passa pelo condensador e evaporador; as válvulas de expansão são adiabáticas; o refrigerante na saída do condensador e evaporador é saturado; a solução de brometo de

lítio tem condição de equilíbrio nas saídas do absorvedor e do gerador de vapor; o volume de controle de cada equipamento envolve apenas os fluidos de trabalho de entrada e saída; os coeficientes globais de transferência de calor são considerados constantes ao longo do processo.

Na análise dos trocadores de calor que compõe do sistema utilizou-se a modelagem através do produto UA (Equação 10). Segundo Herold, Radamacher e Sanford (2016, p. 309), o produto entre o coeficiente global de transferência de calor, e a área do permutador de calor, é uma maneira conveniente de especificar o tamanho e o desempenho de um trocador de calor em um único parâmetro.

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

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

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

2.3.1 Validação

Foi realizada a validação do programa utilizado para a análise do sistema de refrigeração. A Tabela 4 mostra o erro encontrado quando comparados os fluxos energéticos fornecidos pelo fabricante e os simulados, os valores confirmam os bons resultados alcançados pelo programa, apresentando um erro máximo de 6,36 % para a troca de calor no evaporador. Esses erros acontecem devido as condições simplificadoras adotadas, como por exemplo, desprezar a perda de calor dos componentes para o ambiente.

Tabela 4 – Comparação entre os valores da análise energética simulada e os fornecidos pelo fabricante

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

Fonte: dados da pesquisa

2.4 Torre de resfriamento

A análise da torre de resfriamento utilizada no sistema foi desenvolvida por Ochoa (2010) e inserida no modelo para calcular a temperatura da água de resfriamento no condensador e no absorvedor.

2.5 Eficiência do sistema de cogeração

Essa eficiência pode ser definida como a razão entre a soma da energia mecânica gerada no motor e da potência de refrigeração do refrigerador pela energia do combustível queimado:

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

3 Resultados e discussão

As propriedades termodinâmicas do sistema de cogeração foram obtidas através da aplicação da metodologia descrita anteriormente, a qual modela os componentes do sistema de cogeração. Um código computacional utilizando o software EES foi desenvolvido com o objetivo de fornecer as propriedades termodinâmicas dos fluxos envolvidos no sistema e resolver todo seu equacionamento baseando-se na primeira lei da termodinâmica

Com a finalidade de se obter um caso exemplo da simulação, alguns parâmetros foram fixados como pode ser verificado na Tabela 5. Todavia, estes valores podem ser modificados conforme a necessidade da simulação. Desta forma em alguns momentos são apresentados resultados oriundos da variação das condições de operação do sistema.

Tabela 5 – Parâmetros de entrada para o modelo computacional do sistema proposto

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

Fonte: dados da pesquisa

3.1 Análise do motor

A operação do motor garante a produção de potência e de gases de exaustão. A primeira gera energia elétrica num gerador, enquanto o último aciona o sistema de refrigeração por absorção por meio da reciclagem da energia dos gases.

A Tabela 6 apresenta os resultados da análise do motor para a condição fixa estabelecida na Tabela 3.

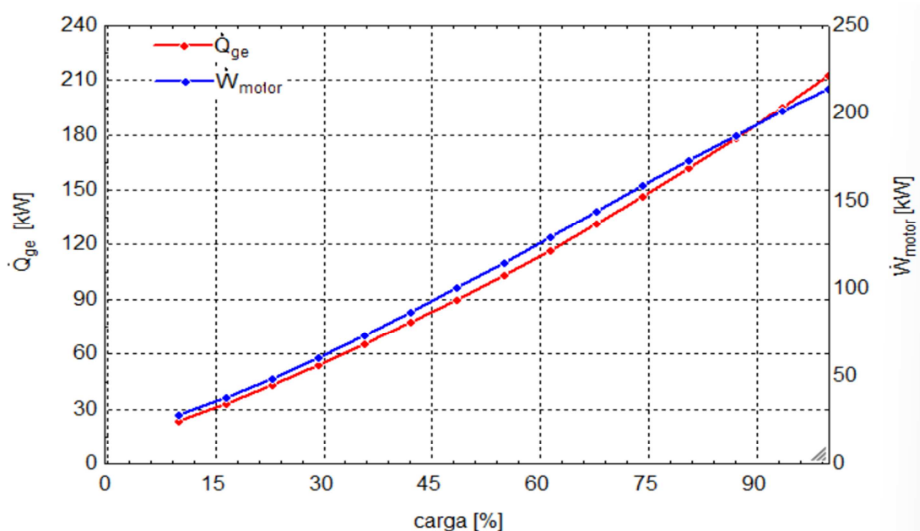
Tabela 6 – Resultado da análise do motor

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 %

Fonte: dados da pesquisa

É de se esperar que os valores mostrados na Tabela 6 variem com as condições de operação do motor. A Figura 3 mostra que com o aumento da carga do motor, tanto a potência do motor como a energia dos gases de exaustão aumentam, além disso, é perceptível que o motor a gás utilizado possui valores bem próximos de potencial térmico e elétrico.

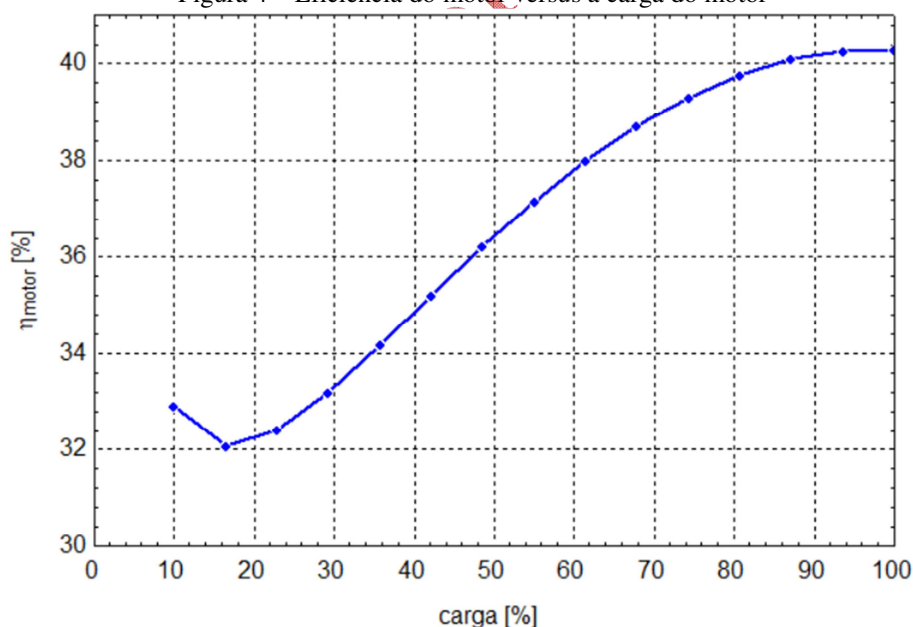
Figura 3 – Relação entre a carga do motor, o calor dos gases de exaustão e a potência do motor



Fonte: dados da pesquisa

Para a análise da eficiência do motor, considera-se que a energia térmica é desperdiçada no ambiente. É notável que a mesma também sofre interferência quando a carga do motor é alterada, a resposta a essa variação pode ser visualizada na Figura 4. Nesse gráfico, constata-se que quando o motor se aproxima da sua carga máxima, a eficiência do mesmo se torna constante e aproximadamente 39 %. Para o cálculo dessa eficiência somente é considerado como energia útil a potência mecânica gerada pelo motor, por isso tem-se um baixo valor de eficiência, já que a energia térmica contida nos gases de exaustão é desconsiderada.

Figura 4 – Eficiência do motor versus a carga do motor



Fonte: dados da pesquisa

3.2 Análise do sistema de refrigeração por absorção

A partir dos catálogos do fabricante do *chiller* WFC-SC10, Yazaki Energy System (2003), foi estabelecido que o refrigerador funcionaria quando a água quente que entra no gerador estivesse na faixa de 70 a 95 °C, para a análise do sistema de absorção a temperatura foi fixada em 85 °C. Os demais dados de entrada utilizados na simulação estão dispostos na Tabela 7 e foram baseados no trabalho de Ochoa (2010).

Tabela 7 – Parâmetros de entrada para o modelo computacional do sistema de absorção

Produto UA dos trocadores de calor (kW.K⁻¹)	Absorvedor	7,5202
	Gerador	15,2731
	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
Vazões mássicas (kg.s⁻¹)	Bomba de solução	0,22
	Entrada de água quente no gerador	2,39
	Entrada de água fria no absorvedor	5,08
	Entrada de água gelada no evaporador	1,52

Fonte: dados da pesquisa

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

Tabela 8 – Resultados da análise energética do ciclo refrigeração por absorção de simples efeito

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

Fonte: dados da pesquisa

3.3 Análise energética do sistema de cogeração

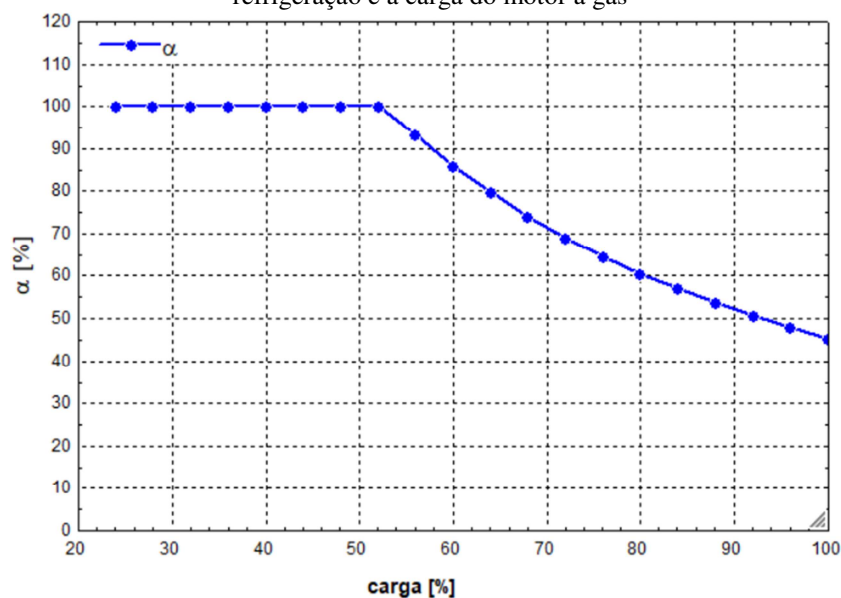
Como dito anteriormente, segundo o fabricante, o refrigerador funciona quando a água quente na entrada do gerador está na faixa de 70 a 95 °C, diferentemente do valor fixo adotado para a análise do sistema de refrigeração no tópico anterior, o valor dessa temperatura varia e depende diretamente do motor, mais precisamente da carga do motor, uma vez que o acionamento do sistema é feito pelos gases de exaustão do mesmo.

Analisando a unidade de cogeração, verificou-se que para o sistema de refrigeração operar entre as temperaturas de 70 e 95 °C, indicada pelo fabricante, é necessário que o motor opere com uma carga entre 24 e 52 % (aproximadamente), ou seja, a carga mínima para gerar gases de combustão com uma temperatura e vazão suficiente para manter a temperatura no gerador mínima é 24 %, e para manter o gerador trabalhando com a máxima temperatura permitida pelo fabricante é necessário que o motor opere com uma carga de 52 %. Após este valor, foi proposta a divisão dos gases de exaustão em dois caminhos, o primeiro continuaria ser levado ao trocador de calor, com a finalidade de acionar o sistema de refrigeração, e o segundo abasteceria outro processo, podendo posteriormente ser utilizado para produzir água quente, ser utilizado em outro equipamento que gere energia mecânica, ou até ser destinado a outro *chiller* de absorção para a geração de frio.

Para os valores de entrada padrão, adotados na Tabela 5 e a temperatura de entrada da água quente no gerador igual a 85 °C, o motor produz energia térmica suficiente tanto para o abastecimento do *chiller* quanto para outro processo, sendo necessário somente 42 % dos gases de exaustão, liberados pelo motor a gás, para o acionamento do sistema de absorção.

Variando a carga do motor, e mantendo a temperatura de entrada da água quente no *chiller* na faixa indicada pelo fabricante (70-95 °C), a porcentagem na divisão dos gases de exaustão varia. A Figura 5 relaciona a carga do motor com a porcentagem de gases de exaustão que é destinado ao *chiller*, α . Verifica-se que a divisão dos gases, para manter o *chiller* funcionando seguindo as recomendações do fabricante, só são necessárias com cargas superiores a aproximadamente 52%.

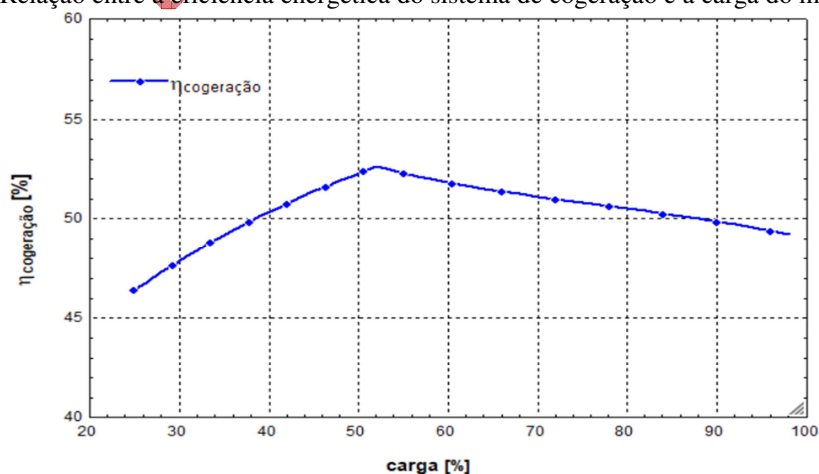
Figura 5 – Relação entre a porcentagem da vazão dos gases de exaustão necessária para acionar o sistema de refrigeração e a carga do motor a gás



Fonte: dados da pesquisa

É importante salientar que a modelagem do processo secundário não compreende o objetivo desse trabalho. Por fim, analisando a eficiência do sistema de cogeração, é possível relacionar a mesma com a carga do motor, nota-se que há um pequeno ganho de eficiência quando aumenta a carga do motor, até o limite da carga de 52% (Figura 6). A partir desse momento os gases produzidos pelo motor não podem ir em sua totalidade para o sistema de refrigeração, pois esse já estará em sua capacidade máxima, trabalhando com a maior temperatura de geração, 95°.

Figura 6 – Relação entre a eficiência energética do sistema de cogeração e a carga do motor a gás



Fonte: dados da pesquisa

Após este momento, os gases de exaustão são divididos (Figura 5) e há uma queda na eficiência de cogeração pelo não aproveitamento desse excesso de gás. Mesmo com a queda, a planta a eficiência da planta de cogeração ainda é maior do que a eficiência do motor, se este trabalhasse sozinho e a

energia térmica proveniente dos gases de exaustão fosse totalmente desperdiçada, a Tabela 9 mostra essa diferença entre as eficiências para os valores de entrada padronizados na Tabela 5.

Tabela 9 – Comparação entre as eficiências do motor e do sistema de cogeração.

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

Fonte: dados da pesquisa

A cogeração é uma das melhores opções para a geração de energia eficiente, isto fica claro ao se analisar o ganho de eficiência (11,45%) que se obteve quando o motor a gás foi utilizado para a geração de energia mecânica e energia térmica. Esse ganho de eficiência poderia ser ainda maior, se o processo secundário, que recebe os gases de exaustão não aproveitados pelo *chiller* de absorção, fosse modelado e a energia gerada pelo mesmo, seja em forma de trabalho ou calor, viesse a ser contabilizada no cálculo da eficiência do sistema de cogeração.

4 Conclusão/Considerações

A análise de sensibilidade conduzida neste trabalho permitiu avaliar o desempenho do sistema de cogeração para distintos cenários de operação do grupo gerador (motor), evidenciando as condições ideais de operação para sistema de cogeração e para seus dispositivos componentes. Dessa forma, tornou-se possível evidenciar que o *chiller* de absorção requer em torno de 42 % da vazão dos gases de exaustão do grupo gerador para o seu pleno funcionamento. Logo, o sistema de cogeração analisado apresenta condições energeticamente compatíveis com a maioria das aplicações práticas, em razão de que é possível disponibilizar mais de 50 % do seu rejeito térmico do motor para um processo secundário.

Constatou-se também que, mesmo diante das condições de funcionamento expostas, foi possível alcançar um COP de 0,7427 para o *chiller* de absorção, desempenho este compatível com o informado pelo fabricante em seu manual e com as abordagens presentes na literatura.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, é possível propor novas configurações para o sistema de cogeração, a exemplo do dimensionamento de um processo secundário que aproveite o máximo dos gases de combustão, possibilitando assim aumentar ainda mais a eficiência do sistema de cogeração. Por fim, conforme já era aguardado, a análise realizada constatou que o sistema de cogeração apresentou uma eficiência superior (em torno de 51 %) a eficiência dos seus elementos integrantes isolados.

Financiamento

O primeiro autor agradece à CAPES pelo apoio financeiro (através da bolsa de mestrado) 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.

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>.

ALCÂNTARA, 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.; 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 micro-cogeração**: contribuição para o desenvolvimento da microcogeração 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. Thermoeconomic 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**, 2019. 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.; SANFORD, A. K. **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, Supplement 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, Supplement 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**. 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**. 2007. n. May 2007, p. 1-18. 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>.

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. 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>.

UNITED NATIONS. **Global Issues.** Population. Disponível em: <https://www.un.org/en/global-issues/population>. Acesso em: 07 fev. 2024.

Revista Principia - Early View