

ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UM SISTEMA DE POLIGERAÇÃO DE ALTO DESEMPENHO

José Luciano Batista Moreira, lucianomoreirab7@gmail.com¹

Carlos Marlon Silva Santos, carlos.marlon@unilins.edu.br²

Adriano da Silva Marques, adriano@cear.ufpb.br³

¹Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho - UACSA, Rua Cento e Sessenta e Três, 300, Garapu. Cabo de Santo Agostinho- PE, 54518-430.

²Fundação Paulista de Tecnologia de Educação - FPTE, Centro Universitário de Lins – Unlins. Av. Nicolau Zarvos, 1925 – Jardim Aeroporto – Lins - SP, 16401-371.

³Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Centro de Energias Alternativas e Renováveis - CEAR, Cidade Universitária, João Pessoa – PB, 58051-970.

Resumo: Sistemas de poligeração de energia são utilizados com o intuito de suprir demandas relacionadas à energia elétrica, resfriamento e calor para processo. Este tipo de sistema apresenta eficiência energética global superior aos sistemas utilizados em plantas industriais onde a produção de energia acontece de forma centralizada. O aumento da eficiência energética atingido em sistemas de poligeração contribui para o desenvolvimento sustentável, seguindo objetivos da COP26. Neste contexto, o presente trabalho tem o objetivo de dimensionar uma planta industrial de poligeração de alto desempenho composta por um motor de combustão interna, que utiliza biogás como combustível, conectado a um gerador de energia elétrica, um sistema de refrigeração por absorção (usando amônia e água como fluidos de trabalho) e um sistema de armazenamento de energia térmica que utilizam calor residual proveniente dos gases de exaustão do motor. Ainda faz parte desta planta industrial, painéis fotovoltaicos equipados com um trocador de calor que utiliza água como fluido de resfriamento. A água aquecida pelos painéis, além de aumentar a eficiência da conversão de energia solar para elétrica, também fornece energia térmica ao sistema para armazenamento de água quente. De posse da configuração dos equipamentos e dos dados de entrada, foi feita a análise termodinâmica do sistema, considerando regime permanente de operação. Foram apresentados os resultados dos fluxos energéticos e exergéticos para cada um dos pontos de entrada e saída em cada volume de controle. A partir da execução dos balanços de energia e massa, foram obtidos resultados relacionados a capacidade de produção de energia elétrica, frio e calor da planta, além do valor da eficiência energética da unidade. Como principal resultado o estudo sugere uma planta de poligeração com eficiência energética de 65,51 %, que apresenta valores de produção de energia elétrica, calor e frio equivalente a 536,4 (kW), 322,9 (kW) e 31,7 (kW), respectivamente. A eficiência energética alcançada e os insumos utilizados contribui para uma operação econômica e ecologicamente sustentável.

Palavras-chave: alto desempenho, biogás, eficiência energética, energia solar, poligeração.

1. INTRODUÇÃO

A energia é fundamental para o desenvolvimento da sociedade e nas últimas décadas a necessidade do desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono surgiu, com o objetivo de reduzir impactos ambientais e melhorar os aspectos de sustentabilidade (Marques De Lima *et al.*, 2020). A crescente demanda por energia criou um interesse pela eficiência e otimização dos equipamentos com alto potencial de desperdício de energia (Kumar, 2017). Nesse contexto, os sistemas combinados de refrigeração, aquecimento e fornecimento de energia elétrica, são alternativas que apresentam alta eficiência energética (Yamano *et al.*, 2021).

Os sistemas de poligeração são interessantes para o fornecimento de diferentes serviços em bairros urbanos e em grandes edifícios (Lozano *et al.*, 2010), associados ao uso de insumos ecologicamente corretos contribuem para o desenvolvimento econômico (Li *et al.*, 2021) e sustentável (Qian *et al.*, 2021).

Unidades de poligeração frequentemente utilizam motores de combustão interna (Onishi *et al.*, 2019), esse tipo de equipamento além de fornecer trabalho útil é uma fonte de calor residual, utilizando energia dos gases de exaustão (Johar *et al.*, 2017) e do fluido de arrefecimento do motor (Le Brun *et al.*, 2020). Associado ao aproveitamento da energia residual de máquinas térmicas, o uso de insumos ecologicamente sustentáveis diminui os danos ambientais causados pela

operação da planta (Kofler; Clausen, 2021), podendo destacar o uso da biomassa (Ji-Chao; Sobhani, 2021; Yan *et al.*, 2021) biogás (Leonzio, 2018; Tang *et al.*, 2021), biodiesel (Chen *et al.*, 2017), entre outros biocombustíveis.

Além do aproveitamento de energia residual de máquinas térmicas pode-se integrar uma fonte de energia limpa aumentando a capacidade produtiva e eficiência desses sistemas (Cioccolanti *et al.*, 2018), pode-se destacar o uso da energia solar através de painéis fotovoltaicos (Qian *et al.*, 2021b) além dos sistemas que utilizam coletores do tipo Fresnel (Sebastián *et al.*, 2021).

Diante do exposto este estudo propõem e avalia uma planta de poligeração de alto desempenho, utilizando como fontes de energia biogás e energia solar. O estudo quantifica as principais propriedades termodinâmicas em cada um dos volumes de controle da unidade, possibilitando obter valores relacionadas a capacidade de produção de energia elétrica, calor e frio. Além da demanda que a unidade é capaz de suprir o estudo indica a eficiência energética e a quantidade de insumos requeridos para a operação da planta de poligeração.

2. METODOLOGIA

2.1. Objeto de Estudo

A configuração apresentada na Fig. 1 trata-se de uma proposta teórica de um sistema de poligeração que pode ser empregada em condomínios, *shopping centers*, prédios, entre outras instalações que dispõem de matéria orgânica que pode ser convertida em biogás e utilizada como combustível. Os equipamentos modelados na planta, foram avaliados em outros trabalhos, de maneira separada ou em artigos que estudam outros sistemas de poligeração. A unidade é constituída por um MCI (motor de combustão interna) com ignição por centelha, conectado a um gerador de energia elétrica. Além de fornecer trabalho útil ao gerador o MCI tem os gases de exaustão recuperados para um sistema de refrigeração por absorção. Outro constituinte da planta é um conjunto de painéis fotovoltaicos equipados com uma unidade de refrigeração, os painéis fornecem energia elétrica que pode ser utilizada de maneira simultânea ao processo de produção, ou armazenada através de baterias. O último componente da planta é um tanque para armazenamento de água quente que pode ser utilizada para aplicações domésticas ou industriais, o reservatório térmico absorve energia da unidade de refrigeração dos painéis solares, dos gases de exaustão e do fluido de arrefecimento do MCI.

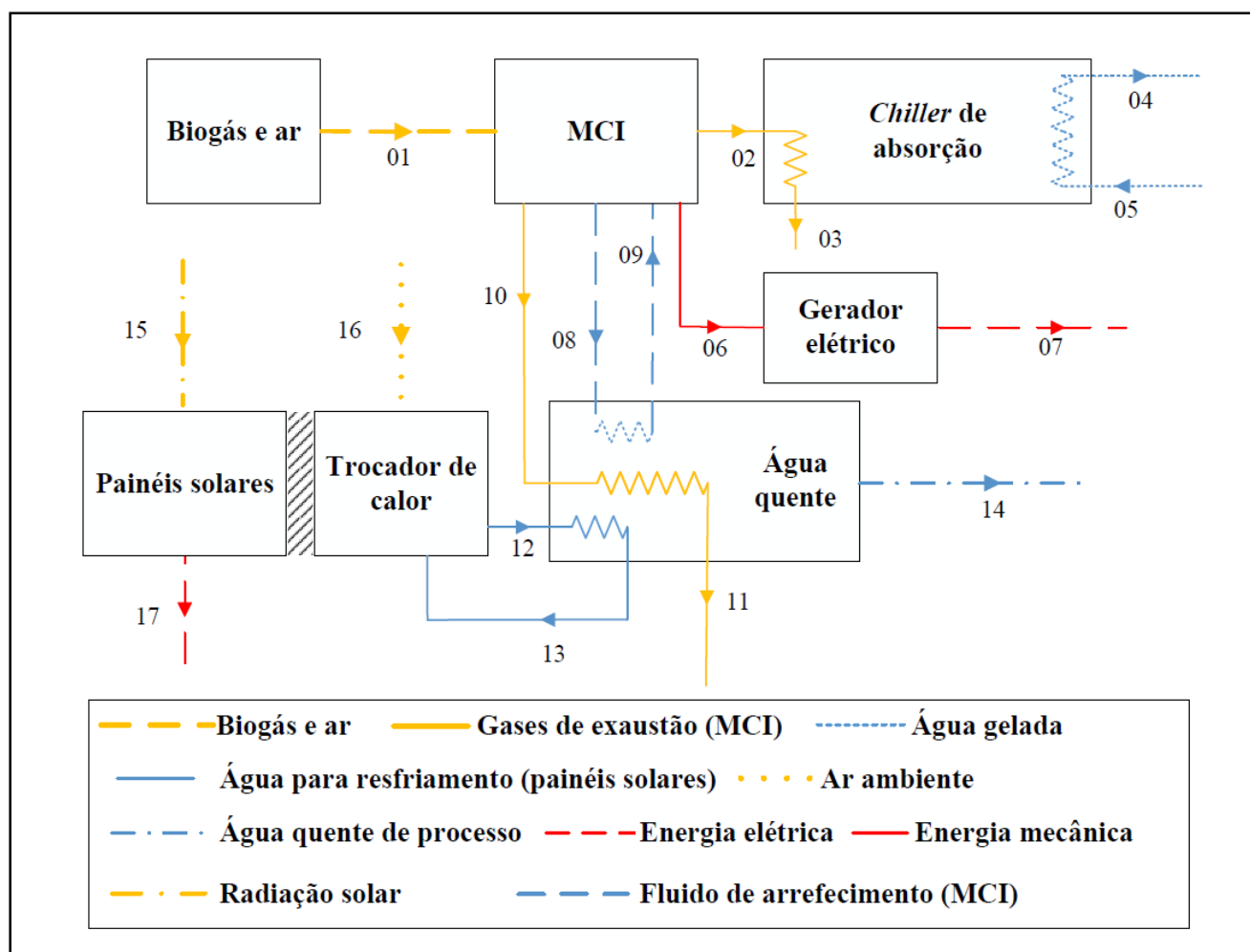


Figura 1. Unidade de poligeração.

2.2. Modelagem termodinâmica

A modelagem termodinâmica foi feita utilizando dados de entrada relacionados a cada um dos equipamentos. Inicialmente listando os pontos com ao menos duas propriedades termodinâmicas conhecidas. A partir desses valores foram avaliados balanços de massa, de energia e de exergia, através do *software* EES (*engineering equation solver*). A avaliação termodinâmica seguiu as seguintes hipóteses simplificadoras:

- A operação da planta acontece em regime permanente;
- As variações de energia cinética e potencial são desprezíveis;
- As quedas de pressão e dissipação de calor através das tubulações são desprezíveis;
- A combustão do motor ocorre de maneira completa.

2.2.1. Motor a Combustão Interna

O motor utilizado está presente no estudo de (Yağlı *et al.*, 2016), utiliza como combustível biogás que após a passagem pelos filtros de tratamento (dessulfurizador e desumidificador), apresenta constituição de 55% de CH₄ e 45% de CO₂. O motor é conectado a um gerador de energia elétrica e é equipado com sistemas de aproveitamento do calor dos gases de exaustão e do fluido de arrefecimento. As especificações da máquina térmica estão apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1. Parâmetros do motor a combustão interna.

Parâmetro	Valor	Unidade de medida
Eficiência mecânica	40,6	%
Vazão do biogás	0,061	kg/s
Temperatura do fluido de arrefecimento	90	°C
Temperatura dos gases de exaustão	450	°C
Fluxo de massa dos gases de exaustão	0,83	kg/s

Fonte: Adaptado de (Yağlı *et al.*, 2016).

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

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

onde: $\dot{Q}_b$ (kW) é a taxa de calor liberado pelo o combustível, $\dot{m}_b$ (kg/s) é o fluxo de massa do biogás, P_{ci} (kJ/kg) é o poder calorífico inferior do combustível.

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

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

onde: $\dot{W}_m$ (kW) é a quantidade de energia elétrica convertida e η (adimensional) é a eficiência da conversão.

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

$$\dot{Q}_e = h_e \cdot \dot{m}_e \quad (3)$$

$$\dot{Q}_a = h_a \cdot \dot{m}_a \quad (4)$$

onde: $\dot{Q}_e$ (kW) é o fluxo de calor, h_e (kJ/kg) a entalpia, $\dot{m}_e$ (kg/s) é o fluxo de massa, ambos relacionados aos gases de exaustão. $\dot{Q}_a$ (kW) é o fluxo de calor, h_a (kJ/kg) a entalpia e $\dot{m}_a$ (kg/s) o fluxo de massa sendo os três últimos parâmetros relacionados ao fluido do sistema de arrefecimento do motor a combustão interna.

2.2.2. Sistema de Refrigeração por Absorção

O sistema de refrigeração avaliado faz parte do trabalho de (Marques *et al.*, 2020), o equipamento utiliza como fluido refrigerante uma mistura de água e amônia. O calor fornecido ao sistema de refrigeração é resultante dos gases de exaustão de um motor a combustão interna com ignição por centelha, no entanto o trabalho de (Marques *et al.*, 2020) utiliza gás natural como combustível. Foram utilizados dois *chillers* de refrigeração, a utilização de dois equipamentos ao invés de

um com maior potência de refrigeração, foi feita com base na manutenção que pode acontecer de maneira separada. As especificações técnicas do equipamento estão disponíveis na Tab. 2.

Tabela 2. Especificações do sistema de refrigeração.

Parâmetro	Valor	Unidade de medida
Capacidade de refrigeração	17,58	kW
Energia absorvida (gerador de vapor)	29,81	kW
Energia absorvida (trocador de calor absorvente)	28,22	kW
Temperatura de saída da água no <i>chiller</i>	7	°C
Temperatura de entrada da água no <i>chiller</i>	12	°C

Fonte: Adaptado de (Marques *et al.*, 2020).

A partir dos dados indicados na Tab. 2, obtém-se a quantidade de calor requerida para o funcionamento do sistema de refrigeração por absorção, a Eq. (5) descreve o fluxo de massa dos gases de exaustão necessários para fornecer calor aos equipamentos que absorvem energia, gerador de vapor e trocador de calor absorvente.

$$\dot{m}_r = \dot{Q}_r / h_e \quad (5)$$

onde: $\dot{m}_r$ (kg/s) é o fluxo de massa dos gases de exaustão do MCI destinados ao sistema de refrigeração e $\dot{Q}_r$ (kW) a taxa de calor absorvido. A quantidade de energia requerida foi calculada levando em conta o valor da eficiência do trocador de calor equivalente a 80 % conforme é indicado por (Marques *et al.*, 2020).

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

$$\alpha = \dot{m}_r / \dot{m}_e \quad (6)$$

onde: α (adimensional) é a razão dos gases de exaustão que dissipam calor para o sistema de refrigeração.

2.2.3. Painéis Fotovoltaicos

O painel fotovoltaico empregados na planta de poligeração está presente no estudo de (Daghigh *et al.*, 2020), este painel é o do tipo célula monocristalina, suas especificações estão listadas na Tab. 3.

Tabela 3. Parâmetros dos painéis fotovoltaicos.

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

Fonte: Adaptado de (Daghigh; Oramipoor; Shahidian, 2020).

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

$$\dot{W}_s = \dot{W}_p \cdot A_p / t \quad (7)$$

onde: $\dot{W}_s$ (kW) é a quantidade de energia solar convertida em energia elétrica, $\dot{W}_p$ (kWh/m²) é a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos em função do tempo de operação e da área de captação da radiação solar, A_p (m²) é a área dos painéis e t (h) é o tempo de operação dos painéis fotovoltaicos.

Os painéis fotovoltaicos são equipados com um sistema de refrigeração, também avaliado no estudo de (Daghigh *et al.*, 2020), esse sistema conta com um trocador de calor posicionado na parte inferior das placas, fixado ao painel com adesivo de silicone, água é utilizada como fluido refrigerante escoando através dos dutos de aço. A Tab. 4 fornece informações desse sistema.

Tabela 4. Especificações do sistema de refrigeração dos painéis fotovoltaicos.

Parâmetro	Valor	Unidade de medida
Temperatura de entrada do fluido de resfriamento	35	°C
Temperatura de saída do fluido de resfriamento	58	°C

Taxa média de radiação solar	800	W/m ²
Fluxo de massa do fluido de resfriamento (painel com 0,52 m ² de área superficial)	0,012	kg/s

Fonte: Adaptado de (Daghigh *et al.*, 2020).

2.2.4. Tanque Para Armazenamento de Água Quente

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

$$\dot{Q}_{te} = (1 - \alpha) \cdot \dot{m}_e \cdot h_e \cdot \eta_q \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{ta} = \dot{m}_a \cdot h_a \cdot \eta_q \quad (9)$$

onde: η_q (adimensional) é a eficiência do trocador de calor utilizado, $\dot{Q}_{te}$ (kW) e $\dot{Q}_{ta}$ (kW) são os fluxos de calor dos gases de exaustão e do fluido de arrefecimento fornecidos ao tanque, respectivamente.

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

$$\dot{Q}_{ts} = \dot{m}_s \cdot h_s \cdot \eta_q \quad (10)$$

onde: $\dot{Q}_{ts}$ (kW) é o fluxo de calor dissipado, $\dot{m}_s$ (kg/s) é o fluxo de massa e h_s (kJ/kg) a entalpia, todos os parâmetros relacionados ao fluido de refrigeração dos painéis solares.

Para os trocadores de calor empregados nas tubulações dos gases de escape e do fluido de arrefecimento (painéis solares e MCI) foi considerado uma eficiência na transferência de energia de 80 % e 90 %, respectivamente.

2.2.5. Unidade de poligeração

A eficiência global da unidade de poligeração é calculada pela Eq. (11)

$$\eta_g = (\dot{W}_m + \dot{W}_s + \dot{Q}_r + \dot{Q}_{te} + \dot{Q}_{ta} + \dot{Q}_{ts}) / (\dot{Q}_b + \dot{W}_b) \quad (11)$$

Onde η_g (adimensional) é a eficiência global da unidade de poligeração que leva em conta os fluxos energéticos de todos os equipamentos e $\dot{W}_b$ (kW) é o trabalho das bombas para circulação dos fluidos da planta.

A exergia dos fluxos associados a cada um dos pontos da planta é obtida pela Eq. (12) em termos de (kJ/kg) e através da Eq. (13) em (kW).

$$e_x = (h - T_o \cdot s) - (h_o - T_o \cdot s_o) \quad (12)$$

$$\dot{E} = e_x \cdot \dot{m} \quad (13)$$

Onde: e_x é a exergia em (kJ/kg), h e s ambos em (kJ/kg) são a entalpia e entropia do estado avaliado, respectivamente, T_o (°C) é a temperatura ambiente, h_o (kJ/kg) e s_o (kJ/kg) é a entalpia e entropia do fluido submetido a temperatura e pressão ambiente, respectivamente e $\dot{E}$ é o valor da exergia em (kW).

2.3. Estudo de variação paramétrica

A partir do código no EES que calcula os fluxos de massa, energéticos e exegéticos, foram quantificados valores para as equações 01 à 13. Obtendo valores relacionados ao regime de operação permanente da planta em cada um dos equipamentos. Além do regime operacional com valores fixos de insumos e demandas, foram simulados estudos com variação de alguns parâmetros avaliando:

2.3.1. Sistema de refrigeração dos painéis solares

Essa simulação consiste em variar a quantidade de energia produzida em função do número de painéis solares utilizados. Dois cenários foram ensaiados, o primeiro considerando a utilização e o segundo a supressão da unidade de refrigeração, respectivamente.

2.3.2. Temperatura da água quente para processos

Foram investigados os efeitos da mudança da temperatura em função do fluxo de massa da água quente, fornecida pelo tanque de armazenamento de energia térmica. Esta avaliação permite quantificar o fornecimento da água quente a partir de uma temperatura arbitrária, escolhida de acordo com a demanda a ser suprida, doméstica ou industrial.

2.3.3. Quantidade de *chillers* utilizados na planta

Foi simulado a variação do número de unidades de refrigeração, a alteração dessa quantidade muda a dinâmica de alocação do calor dissipado pelos gases de exaustão. A avaliação indica o valor dos fluxos energéticos, de água gelada (evaporador) e dos gases de exaustão cedidos ao tanque de água quente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Avaliação termodinâmica

Foram quantificados os principais parâmetros correspondentes a cada um dos equipamentos, a Tab. 5 representa esses valores, os pontos listados na tabela estão relacionados aos pontos indicadas no objeto de estudo.

Tabela 5. Resultados dos parâmetros termodinâmicos da planta.

Ponto	T (°C)	$\dot{m}$ (kg/s)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg)	e_x (kJ/kg)	$\dot{E}$ (kW)
1 (Biogás)	30,1	0,061	4638,00	11,62	4046,40	246,83
1 (Ar)	25	0,754	298,60	5,69	0	0
2	450	0,369	465,44	5,85	385,90	142,40
3	70	0,369	72,40	0,91	116,30	42,91
4	7	1,514	29,51	0,11	93,52	141,59
5	12	1,514	50,46	0,18	112,60	170,48
8	90	0,625	377,00	1,19	413,80	258,63
9	30	0,625	125,80	0,44	181,50	113,44
10	450	0,446	465,44	5,85	385,90	172,11
11	70	0,446	72,40	0,91	116,30	51,87
12	58	0,480	242,90	0,81	289,40	138,91
13	35	0,480	146,70	0,51	200,70	96,34
14	90	0,857	377,00	1,19	413,80	354,63

Fonte: Preparado pelos autores (2022).

A partir de um consumo equivalente a 0,061 (kg/s) de biogás, o MCI dissipa calor através de 0,815 (kg/s) de gases de exaustão e 0,625 (kg/s) do fluido de arrefecimento. O calor liberado pelo fluido de arrefecimento é integralmente absorvido pelo sistema de armazenamento de energia térmica, enquanto o calor dissipado pelos gases de exaustão fornece energia para o sistema de refrigeração por absorção, que utiliza aproximadamente 45 % dos gases de escape, e para o tanque de água quente que absorve o calor restante, equivalente a 55 % dos gases de exaustão. Levando em conta valores de temperatura equivalentes a 70 (°C) e 30 (°C) para os gases de exaustão e o fluido de arrefecimento respectivamente, na saída dos trocadores de calor (ponto de menor temperatura), o tanque para armazenamento de energia térmica fornece água com temperatura de 90 (°C) a uma taxa de 0,857 (kg/s). Em termos de exergia, o maior valor em (kJ/kg) é referente ao insumo do MCI (biogás) valor equivalente a 59,9 %, enquanto o maior valor de exergia em (kW) é observado na água de saída do tanque para armazenamento de água quente, sendo responsável por aproximadamente 18,4 % do valor total.

A tabela 6 indica os valores relacionados aos fluxos de calor, de cada um dos equipamentos que compõe a unidade de poligeração.

Tabela 6. Fluxo energético dos equipamentos da unidade de poligeração.

Equipamento	Valor (kW)
Energia liberada pelo combustível	1359,00
Energia mecânica convertida em elétrica (MCI)	534,00
Energia dissipada pelo fluido de arrefecimento do MCI	141,30
Energia dissipada pelos gases de exaustão do MCI para o tanque	140,20
Calor absorvido pelo sistema de refrigeração	116,06
Calor liberado pelo sistema de refrigeração (evaporador)	31,71
Energia solar convertida em energia elétrica	2,35
Energia dissipada pelo sistema de refrigeração dos painéis solares	41,45

Fonte: Preparado pelos autores (2022).

O valor total de energia útil seja na forma de eletricidade, calor ou frio equivale a 891 kW, enquanto a energia consumida pela planta representa um valor de aproximadamente 1360 kW. A eficiência global da planta é de 65,51 %, este valor não leva em conta como insumo a energia solar, pois não representa custo na operação. Desconsiderando as contribuições dos painéis solares a eficiência global é reduzida para 62,33 %, mesmo nesse cenário onde a contribuição energética dos painéis solares é suprimida, a unidade apresenta um aumento percentual equivalente a 23,07 %, comparando-se com a operação do motor, convertendo exclusivamente energia térmica em energia elétrica.

3.2. Variação paramétrica

A figura 02 representa os valores da produção de energia elétrica da planta por mês em função da quantidade de painéis solares utilizados. O cenário 01 considera a utilização da unidade de refrigeração dos painéis fotovoltaicos, enquanto o cenário 02 simula a utilização de placas solares sem sistema de resfriamento.

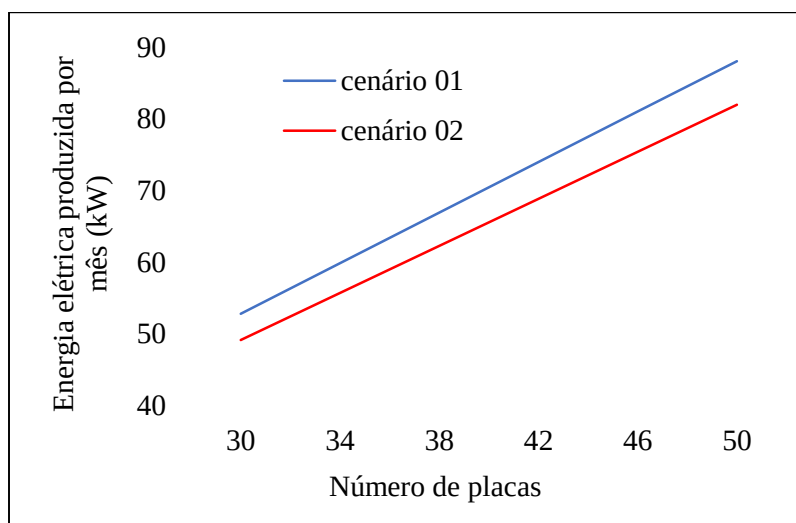


Figura 2. Variação da energia produzida em função do número de placas

A diferença de energia produzida subtraindo os valores observados no cenário 01 pelo cenário 02 é de aproximadamente 3,66 kW, 4,88 kW e 6,1 kW, utilizando 30, 40 e 50 placas solares, respectivamente. Esse comportamento indica que a utilização da unidade de refrigeração, aumenta a eficiência na produção da energia elétrica à medida que mais placas solares são utilizadas.

A figura 03 indica a variação do fluxo de massa do tanque de água quente para processos, em função da temperatura de saída do fluido.

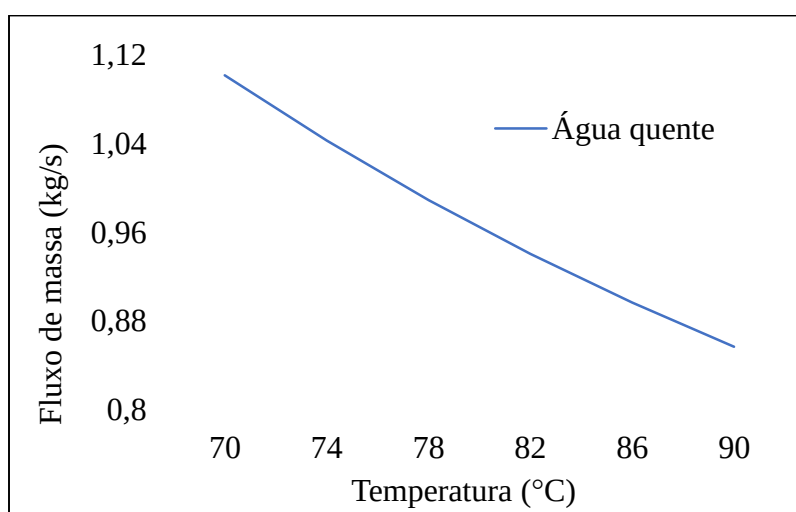


Figura 3. Variação do fluxo de massa de água quente em função da temperatura

O fluxo de massa observado é de aproximadamente 1,10 (kg/s), 0,96 (kg/s) e 0,86 (kg/s), para as temperaturas de saída equivalentes a 70 (°C), 80 (°C) e 90 (°C) respectivamente. O aumento da temperatura da água é acompanhado por uma redução da vazão do tanque de água quente, avaliando os pontos de máximo e mínimo do gráfico 1,10 (kg/s) e 0,86 (kg/s) respectivamente, observa-se uma redução de aproximadamente 22,23 %, na oferta de água aquecida.

A figura 04 representa os fluxos energéticos do evaporador e do trocador de calor dos gases de exaustão para o tanque de armazenamento de energia térmica. Foram simulados diferentes cenários onde a quantidade de *chillers* de refrigeração foi alterada.

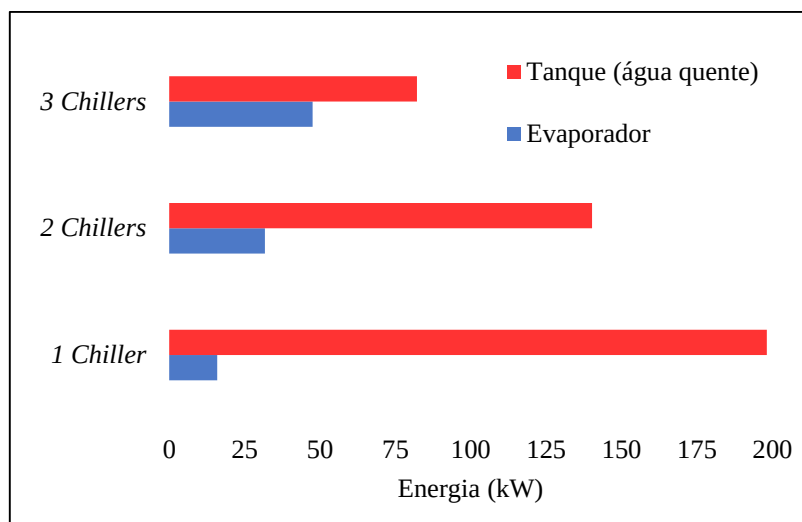


Figura 4. Variação do fluxo energético de equipamentos em função da quantidade de *chillers*.

A maior quantidade de equipamentos de refrigeração aumenta a produção de frio (energia do evaporador). A adição de *chillers* aumenta o consumo dos gases de exaustão pelo sistema de refrigeração, resultando na diminuição da energia fornecida pelos gases de escape para o tanque de água quente, redução de 58,55 %, comparando-se a utilização de 1 e de 3 equipamentos de refrigeração.

3.3. Comparação com outros estudos

Os resultados obtidos por esse estudo assemelham-se aos valores apresentados por (Alcântara *et al.*, 2019), que avaliou uma planta de trigeração composta por um MCI que utiliza gás natural como combustível, um *chiller* de absorção que utiliza brometo de lítio e água e um reservatório térmico. Este estudo apresenta eficiência global equivalente a 74 %, com produção média de eletricidade, refrigeração e aquecimento de 214,1 (kW), 35,7 (kW) e 162,1 (kW), respectivamente. Outro estudo que pode ser destacado é o de (Cao *et al.*, 2022), uma unidade de trigeração composta por um MCI, que utiliza diesel como combustível, um ciclo Rankine orgânico, e uma unidade de dessalinização de água, a planta proposta apresenta produção líquida de energia, resfriamento e água doce, com valores de 783,9 (kW), 959,8 (kW) e 98,1 metros cúbicos por dia, respectivamente. Atingindo valor de eficiência global equivalente a 58,4%.

4. CONCLUSÃO

Este estudo propôs e avaliou uma planta de poligeração de alto desempenho, cujo principal componente em termos de consumo energético trata-se de um MCI, que utiliza biogás como combustível. Enquanto a eficiência do motor operando de maneira separa é equivalente a 40,60 %, a eficiência global da planta de poligeração considerando a utilização dos painéis fotovoltaicos atingiu 65,51 %, um aumento de 357 (kW) na produção de energia útil, seja na forma de energia elétrica frio ou calor.

A partir de um consumo de 0,061 (kg/s) de biogás pelo MCI e uma instalação de 30 painéis solares com 20,9 (m²) de área exposta a radiação solar, a unidade de poligeração apresenta valores de produção de energia elétrica, calor e frio equivalente a 536,4 (kW), 322,9 (kW) e 31,7 (kW) respectivamente. Em termos de exergia o insumo do MCI (biogás) apresenta o maior valor comparando-se a todos os outros equipamentos da planta, equivalente a 65,9 % do valor total.

A unidade de poligeração proposta por este estudo pode ser instalada em locais que produzam biogás suficiente para o consumo do MCI, além disso o local de instalação da planta deve ter área disponível para alocação dos painéis fotovoltaicos.

O uso de biogás e radiação solar como fontes de energia, associados a um sistema para conversão de energia de alto desempenho, representa uma aplicação com eficiência superior, comparando-se a uma máquina térmica que descarta o calor residual. O que possibilita reduzir custos de operação, além de diminuir o impacto ambiental causado pelo uso de combustíveis fósseis.

Para trabalhos futuros recomenda-se a aplicação de métodos termoeconômicos e exergoambientais, com o intuito de avaliar a viabilidade da planta em termos do custo para produção de energia, e impacto ambiental causado pela unidade de poligeração. Além disso o estudo pode ser aplicado em outros regimes de operação, onde as características construtivas e os tipos de insumos permanecem os mesmos, mas a demanda de energia é modificada, com o intuito de suprir outras necessidades industriais ou domésticas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pela bolsa de Mestrado (nº IBPG-1294-3.00/21) e também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física (PPEngFis) da UFRPE por todo o suporte de sempre.

6. REFERÊNCIAS

- Alcântara, S. C. S. et al. 2019. Natural gas based trigeneration system proposal to an ice cream factory: An energetic and economic assessment. *Energy Conversion and Management*, v. 197.
- Cao, Y. et al. 2022. Examination and optimization of a novel auxiliary trigeneration system for a ship through waste-to-energy from its engine. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 31, p. 101860.
- Chen, X. P. et al. 2017. Dynamic programming for optimal operation of a biofuel micro CHP-HES system. *Applied Energy*, v. 208, p. 132–141.
- Cioccolanti, L. et al. 2018. Parametric analysis of a solar Organic Rankine Cycle trigeneration system for residential applications. *Energy Conversion and Management*, v. 163, p. 407–419.
- Daghighi, R.; Oramipoor, H.; Shahidian, R. 2020. Improving the performance and economic analysis of photovoltaic panel using copper tubular-rectangular ducted heat exchanger. *Renewable Energy*, v. 156, p. 1076–1088.
- Ji-Chao, Y.; Sobhani, B. 2021. Integration of biomass gasification with a supercritical CO₂ and Kalina cycles in a combined heating and power system: A thermodynamic and exergoeconomic analysis. *Energy*, v. 222.
- Johar, D. K. et al. 2017. Experimental investigation of thermal storage integrated micro trigeneration system. *Energy Conversion and Management*, v. 146, p. 87–95.
- Kofler, R.; Clausen, L. R. 2021. Wheat straw based polygeneration systems integrating the electricity, heating and transport sector. *Smart Energy*, v. 2, p. 100015.
- Kumar, R. 2017. A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4-E) analysis of thermal power plants *Engineering Science and Technology, an International Journal Elsevier*.
- Le Brun, N. et al. 2020. Techno-economic potential of low-temperature, jacket-water heat recovery from stationary internal combustion engines with organic Rankine cycles: A cross-sector food-retail study. *Applied Energy*, v. 274.
- Leonzio, G. 2018. An innovative trigeneration system using biogas as renewable energy. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, v. 26, n. 5, p. 1179–1191.
- Li, Y. et al. 2021. An improved two-stage robust optimization model for CCHP-P2G microgrid system considering multi-energy operation under wind power outputs uncertainties. *Energy*, v. 223.
- Lozano, M. A.; Ramos, J. C.; Serra, L. M. 2010. Cost optimization of the design of CHCP (combined heat, cooling and power) systems under legal constraints. *Energy*, v. 35, n. 2, p. 794–805.
- Mariani, A.; Minale, M.; Unich, A. 2021. Use of biogas containing CH₄, H₂ and CO₂ in controlled auto-ignition engines to reduce NO_x emissions. *Fuel*, v. 301.
- Marques, A. Da S. et al. 2020. Energy, exergy, and exergoeconomic evaluations of a micro-trigeneration system. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 42, n. 6.
- Marques De Lima, K.; Bandeira De Mello Delgado, D.; Carvalho, M. 2020. A Review on The Panorama of Combined Heating, Cooling, and Power in Brazil. *Energetics*.
- Onishi, V. C. et al. 2019. Stochastic optimization of trigeneration systems for decision-making under long-term uncertainty in energy demands and prices. *Energy*, v. 175, p. 781–797.
- Qian, J. et al. 2021. Comprehensive performance evaluation of Wind-Solar-CCHP system based on emergy analysis and multi-objective decision method. *Energy*, v. 230.
- Sebastián, A. et al. 2021. Modular micro-trigeneration system for a novel rotatory solar Fresnel collector: A design space analysis. *Energy Conversion and Management*, v. 227.
- Tang, Z. et al. 2021. Biofuel trigeneration with energy storage for heating, cooling and power on farms. *Energy Reports*, v. 7, p. 5394–5405.
- Yağlı, H. et al. 2016. Parametric optimization and exergetic analysis comparison of subcritical and supercritical organic Rankine cycle (ORC) for biogas fuelled combined heat and power (CHP) engine exhaust gas waste heat. *Energy*, v. 111, p. 923–932.
- Yağlı, H. et al. 2021. Optimisation of simple and regenerative organic Rankine cycles using jacket water of an internal combustion engine fuelled with biogas produced from agricultural waste. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 155, p. 17–31.
- Yamano, S. et al. 2021. Optimization modeling of mixed gas engine types with different maintenance spans and costs: Case study OF CCHP to evaluate optimal gas engine operations and combination of the types. *Energy*, v. 222.
- Yan, S. et al. 2021. A conceptual biomass liquefaction system with supercritical water for bio-oil, power and heating trigeneration: Thermodynamic and environmental analysis. *Energy Conversion and Management*, v. 244.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

THERMODYNAMIC ANALYSIS OF A HIGH-PERFORMANCE POLYGENERATION SYSTEM

José Luciano Batista Moreira, lucianomoreirab7@gmail.com¹

Carlos Marlon Silva Santos, carlos.marlon@unilins.edu.br²

Adriano da Silva Marques, adriano@cear.ufpb.br³

¹Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho - UACSA, Rua Cento e Sessenta e Três, 300, Garapu. Cabo de Santo Agostinho- PE, 54518-430.

²Fundação Paulista de Tecnologia de Educação - FPTE, Centro Universitário de Lins – Unilins. Av. Nicolau Zarvos, 1925 – Jardim Aeroporto – Lins - SP, 16401-371.

³ Universidade Federal da Paraíba – UFPB, Centro de Energias Alternativas e Renováveis - CEAR, Cidade Universitária, João Pessoa – PB, 58051-970.

Abstract: Polygeneration energy systems supply electrical energy, cooling, and heat demands for the process. This type of system has an overall energy efficiency superior to methods used in industrial plants where energy production takes place centrally. The increase in energy efficiency achieved in polygeneration systems contributes to sustainable development, following the objectives of COP26. In this context, the present work has the aim of dimensioning a high-performance industrial polygeneration plant composed of an internal combustion engine, which uses biogas as fuel, connected to an electric energy generator, an absorption refrigeration system (using ammonia and water as working fluids) and a thermal energy storage system that uses waste heat from the engine's exhaust gases. Photovoltaic panels equipped with a heat exchanger that uses water as a cooling fluid will also be part of this industrial plant. In addition to increasing the efficiency of converting solar energy to electrical energy, the water heated by the panels also supplies thermal energy to the system for storing hot water. With the equipment configuration and input data in hand, the thermodynamic analysis of the system will be carried out, considering a steady state of operation. The results of energetic and exergetic fluxes were presented for each of the entry and exit points in each selected control volume. From the execution of energy and mass balances, results were obtained related to the plant's capacity to produce electricity, cold, and heat and the value of the plant's energy efficiency. As the main result, the study suggests a polygeneration plant with an energy efficiency of 65.51%, which presents values of production of electricity, heat, and cold equivalent to 536.4 (kW), 322.9 (kW), and 31.7 (kW), respectively. The energy efficiency achieved and the inputs used to contribute to an economically and ecologically sustainable operation.

Keywords: Biogas, energy efficiency, high performance, polygeneration, solar energy.