

# **CICLOS COMBINADOS E DE COGERAÇÃO: APLICAÇÕES PARA O BRASIL A PARTIR DO GÁS NATURAL E BIOGÁS**

Gabriel Ishii Rodrigues – Gabriel.ishii98@gmail.com

Prof. Dr. José Pucci Caly (orientador) – jose.caly@mackenzie.br

## **RESUMO**

Os ciclos combinados são caracterizados pela recuperação do calor rejeitado por duas ou mais máquinas térmicas, para a geração de energia elétrica e/ou térmica, tal configuração apresenta-se como uma solução para aumentar a eficiência da geração de eletricidade, para cerca de 50%, o que traria uma considerável redução do consumo de combustíveis para uma mesma potência gerada. Com a possibilidade ainda de utilizar fontes de combustíveis renováveis, tal como o biogás, em substituição ao gás natural, este que corresponde a cerca 30% da matriz elétrica global. Novas tecnologias apresentam aplicações modernas também para o Ciclo de Rankine, tal como as células de combustível, na qual o rejeito térmico gerado na combustão do hidrogênio pode ser reaproveitado na geração de energia. Estas tecnologias podem diversificar a matriz elétrica brasileira, ao mesmo tempo que reduzem os impactos ambientais. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica para a formulação dos cenários matemáticos propostos, abordando tópicos de mecânica dos fluidos, termodinâmica, e sistemas térmicos. Foram elaborados cenários de operação a partir de características técnicas de equipamentos reais para a determinação de parâmetros médios de operação para sistemas a vapor. Nos resultados simulados, obteve-se um ganho de eficiência médio teórico de 7% para a microturbina a vapor; e uma pequena queda se comparada com o ciclo Brayton, que apresentou 33% de eficiência térmica. O ganho de eficiência no ciclo de Rankine proporcionou uma redução aproximada de 5,7% de consumo de combustível, a partir da energia não utilizada no sistema de potência a gás.

Palavras-chave: Recuperação de Energia; Ciclo de Rankine; Energias Alternativas.

## **COMBINED AND COGERATION CYCLES: APPLICATIONS FOR BRAZIL FROM NATURAL GAS AND BIOGAS**

### **ABSTRACT**

Combined cycles are characterized by the retrieval of the waste heat rejected by two or more thermal machines, for generation of electric energy; such configuration is presented as a solution to increase in 50% the efficiency of electricity's production, which would reduce the use of fuels for the same power generated. With the potential, in addition to using renewable sources, such as

biogas, replacing the natural gas, which is responsible for nearly 30% of the global power grid. New technologies present modern applications as well for the Rankine Cycle, such as fuel cells, in which the waste heat generated in the combustion of the hydrogen can be recycled in energy production. These technologies can diversify the Brazilian power grid, while simultaneously, and reduce the environmental impacts. Research was made to formulate the mathematical sceneries proposed, addressing topics as fluid mechanics, thermodynamic and thermal systems. Scenarios of operation were designed from technical characteristics of real equipment to determinate the standard intermediate parameters of operation of steam systems. In addition, a study was made to add a regenerator that uses flue gas of a gas microturbine, in a steamed power cycle. In the earnings, it achieved a gain of 7% average theoretical efficiency for a steam microturbine; and a small decrease if compared to the Brayton cycle, which performed 33% of its thermal efficiency. The gain of efficiency in the Rankine cycle provided an approximated 5.7% saving in fuel consumption, operating from the non-utilized in a gas power system.

Keywords: Energy recovery; Rankine Cycle; Alternative Energies.

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo B&W (2005, p. 2-24), um ciclo combinado consiste na união de um ou mais ciclos distintos para a geração elétrica, o mais comum consiste em uma turbina a vapor associada a uma turbina a gás. Estes ciclos apresentam aplicações modernas dos Ciclos de Rankine e de Brayton para sistemas térmicos, onde há a procura de melhor eficiência energética, redução na emissão de gases poluentes na atmosfera, e maior diversidade da matriz energética. Estes estudos abrangem, aproveitamento de resíduos térmicos e fontes combustíveis alternativas.

Utilizando como base o estudo de Serrano-Sanchez, Olmeda-Delgado e Petrakopoulou (2019, p. 6), a eficiência teórica de uma termelétrica a carvão mineral determinada foi de 35,8%, e de acordo com Boyce (2002, p. 138) turbinas a gás modernas possuem eficiência na ordem de 45% a 50%. Portanto há um enorme desperdício de energia, na ordem de 50% a 70%, e isto se apresenta como um grande problema global, visto que 69,2% da energia elétrica produzida no mundo provém de fontes fósseis, onde há o extenso uso das ineficientes termoelétricas, conforme descrito por International Energy Agency (2020, p. 30).

Neste contexto, estudos sobre os ciclos combinados e de cogeração estão crescendo consideravelmente, no trabalho de Serrano-Sanchez, Olmeda-Delgado e Petrakopoulou (2019), e de Fiaschi *et al.* (2020) foi estudado o ciclo de cogeração de uma usina solar e uma termelétrica.

Além dos ciclos combinados com fontes renováveis mais tradicionais, como a solar por exemplo, novas tecnologias em geração de eletricidade estão cada vez mais acessíveis, com destaque para as células de combustível. No trabalho de Dirzo e Casarín (2009), foi combinado uma célula de combustível SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*) com um ciclo a vapor para a geração de eletricidade.

No Brasil, apesar de sua matriz elétrica ser predominante hidráulica, há um grande potencial para os estudos sobre ciclos combinados e de cogeração, com destaque na produção de etanol a partir da cana de açúcar. O estudo de Guerra *et al.* (2018) mostra a utilização do bagaço de cana como combustível para caldeiras. O vapor proveniente da combustão é utilizado em múltiplos processos. É utilizado primeiro em uma turbina a vapor para geração de eletricidade, e posteriormente utilizado no processo de formação de suco, fermentação e destilação do etanol. Este processo é comumente utilizado em destilarias.

Há ainda a possibilidade de utilizar-se biodigestores para a obtenção de biogás a partir de matéria orgânica mostrado no estudo de Rasul, Ault e Sajjad (2015), e que pode ser utilizado como combustível para turbinas, uma vez que o Brasil é um grande produtor agropecuário, o que resulta em uma grande oferta de biomassa, conforme descrito por Kunz e Oliveira (2006, p. 28).

Assim, os ciclos combinados e de cogeração são de grande importância para a adaptação das termelétricas para uma matriz mais eficiente. Seus benefícios são, a redução na emissão de gases contribuintes ao efeito estufa, maior preservação do meio ambiente, e o desenvolvimento de novas tecnologias de geração de eletricidade.

O problema de pesquisa avalia como os ciclos combinados podem promover uma melhor eficiência, e maior diversificação da matriz energética no Brasil

O objetivo geral consiste em avaliar as tecnologias disponíveis na geração de eletricidade a partir de sistemas térmicos em aplicações modernas, sendo estas

Os objetivos específicos pretendem avaliar o potencial da geração de eletricidade a partir do gás natural, e biogás. Serão avaliadas também as condições de geração do biogás, e a quantidade obtida a partir do biodigestor de matéria orgânica necessária para a operação em equipamentos disponíveis no mercado. Cenários de operação com ciclos de potência a vapor serão estudados, com a função de determinar parâmetros de operação, tais como potência, vazão em massa, e temperaturas máximas e mínimas para o reaproveitamento de energia térmica. Será avaliado em um sistema combinado a gás e vapor, a economia resultante do aproveitamento da energia proveniente dos gases de exaustão da microturbina a gás em um regenerador, e determinar qual a potência recuperada, o ganho de eficiência, e a redução de consumo de combustível.

## 2 METODOLOGIA

Este trabalho irá utilizar-se de cenários de operação e de métodos matemáticos para o determinar-se o possível ganho de eficiência de uma única microturbina a gás, ao aproveitar-se dos gases de exaustão.

O modelo matemático adotado será baseado na análise de energia citada na seção de revisão de literatura. As condições de operação, e os dados de desempenho das máquinas, turbinas, bombas, e geradores, dos ciclos serão baseadas em cenários reais, a partir das especificações dos fabricantes, conforme Tabela 7 e Tabela 8.

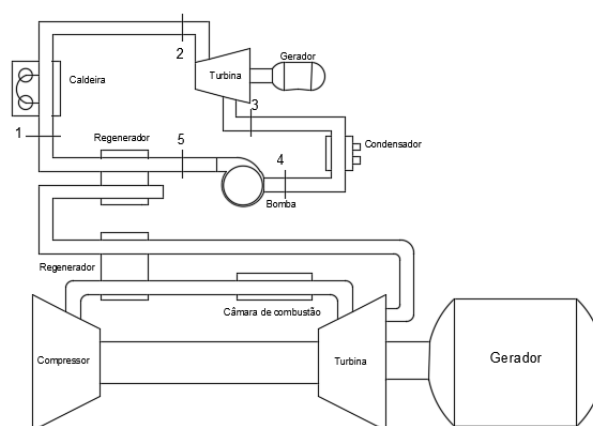
Para o equacionamento dos cenários, serão adotadas hipóteses simplificadoras. Serão desprezíveis variações de energia cinética e potencial no sistema, tais como as perdas de energia por atrito viscoso. Será considerada também o escoamento unidimensional, e operação em regime permanente, e os equipamentos adiabáticos.

Para a seleção da temperatura superior e inferior, e vazão em massa de vapor de operação do ciclo Rankine, serão testados diversos cenários onde as temperaturas do gerador de calor e da caldeira serão variáveis, tal como a vazão em massa de vapor.

Pesquisas bibliográficas serão a base para a fundamentação matemática e teórica, enquanto pesquisas documentais providenciarão os parâmetros de simulação do estudo.

O modelo de estudo deste trabalho será baseado em uma usina termoeletrica a gás. O cenário proposto conta com uma micro usina a gás combinada com um sistema de reaproveitamento dos gases de exaustão de alta temperatura, como mostrado Figura 1.

**Figura 1** – Ciclo combinado Rankine e Brayton proposto, desenho sem escala



**Fonte:** o autor

Serão utilizadas as microturbinas a gás da empresa *Capstone®*, e microturbinas a vapor da empresa *Solidia®*.

Serão considerados como fonte de dados, as tabelas das propriedades termodinâmicas, juntamente com dados reais de equipamentos, por meio de catálogos de fabricantes, e de trabalhos acadêmicos realizados anteriormente. Para a parte dos cálculos, será utilizado o software *Excel*® para a organização, cálculo, e criação de gráficos e tabelas.

Com os valores de produção elétrica por equipamento, pode-se calcular a potência útil necessária, onde é considerado o rendimento do gerador. A Equação 2, mostra o cálculo da potência líquida consumida em função da potência elétrica e do rendimento do gerador.

$$\dot{W}_{líquida} = \frac{\dot{W}_{elétrica}}{\eta_{gerador}} \quad (1)$$

Conhecidos os valores de potência líquida e do calor adicionado por meio da combustão, o cálculo da eficiência para o ciclo é dado pela Equação 2.

$$\eta_{ciclo} = \frac{w_{liq}}{q_{ent}} \quad (2)$$

Conhecida a quantidade de calor, esta fornecida pelo fabricante, proveniente da combustão pode-se determinar a energia total consumida com o tempo de operação pela Equação 3. O poder calorífico do combustível segundo (ÇENGEL, 2013, p. 781) “[...] é definido como a quantidade de calor liberada quando um combustível é queimado completamente em um processo em regime permanente e quando os produtos voltam ao estado dos reagentes.”. Ainda em conformidade com (ÇENGEL, 2013, p. 781) o poder calorífico depende da fase da água resultante do processo de combustão. Se a água estiver em estado líquido é denominado poder calorífico superior (PCS). Caso esteja na fase gasosa, é denominado poder calorífico inferior (PCI).

Com o poder calorífico superior (PCS) para o biogás, calculado através do ajuste do PCS do metano pela Equação 4, pode-se calcular o volume de biogás necessário para um dia de operação ininterrupta, a partir do, a partir da Equação 5. A previsão da quantidade de matéria orgânica calculada pela Equação 6, este processo foi desenvolvido por Hirano (2015, p. 59). (ÇENGEL, 2013, p. 781)

$$E_{consumido} = \dot{Q}_{combustível} \times t_{operação} \quad (3)$$

$$PCS_{biogás} = \%_{CH_4} \times PCS_{CH_4} \quad (4)$$

$$V_{biogás} = \frac{E_{consumido}}{PCS_{biogás}} \quad (5)$$

$$Q = \frac{V_{biogás}}{P_c} \quad (6)$$

Onde  $Q$  é a quantidade necessária de dejetos de animais em quilogramas, e  $P_c$ , o potencial de conversão da matéria orgânica em biogás em metros cúbicos de biogás por quilograma de esterco, conforme descrito por Hirano (2015, p. 59).

Para o ciclo a vapor, o dimensionamento deve ser iniciado a partir da seção 5, mostrada na Figura 1. De acordo com os dados do fabricante *Wabtec*®, a temperatura máxima de saída do regenerador é de 95 graus celsius, e, portanto, esta temperatura será utilizada para o cálculo da quantidade de calor reaproveitada.

A partir das temperaturas pré-determinadas, e utilizando-se uma tabela de propriedades termodinâmicas, a partir do livro de Çengel (2007), todos os valores de entalpia específica serão determinados em suas respectivas etapas do ciclo.

Aplicando a equação de conservação de energia para a caldeira, resulta no balanço energético descrito pela Equação 7, utilizando operação em regime permanente, caldeira adiabática, e desprezíveis variações de energia potencial gravitacional e cinética. Como as vazões em massa de entrada e saída são iguais, foi utilizado o termo  $\dot{m}$  para simplificar a equação.

$$\dot{Q}_{caldeira} = \dot{m}(h_1 - h_2) \quad (7)$$

Aplicando a equação de conservação de energia para a turbina, resulta no balanço energético descrito pela Equação 8, com as mesmas hipóteses simplificadoras da Equação 7.

$$\dot{W}_T = \dot{m}(h_2 - h_{3r}) \quad (8)$$

A partir do rendimento isentrópico da turbina, é possível determinar o valor da entalpia específica real, a partir da Equação 9. Com este valor, a potência produzida pela turbina será conhecida.

$$h_{3r} = h_2 - \eta_T(h_2 - h_{3s}) \quad (9)$$

A potência consumida pela bomba é descrita na Equação 10. A entalpia específica real pode ser calculada através da Equação 11.

$$\dot{W}_{bomba} = \frac{v(P_2 - P_1)}{\eta_B} \times \dot{m} \quad (10)$$

$$h_{5r} = \frac{h_{5s} - h_4}{\eta_B} + h_{4s} \quad (11)$$

O cálculo do calor aproveitado no regenerador é dado pela Equação 12:

$$\dot{Q}_{regenerador} = \dot{m}(h_{5r} - h_1) \quad (12)$$

O cálculo da potência líquida é dado pela Equação 13, e o rendimento do ciclo será calculado pela Equação 14.

$$w_{liq} = w_T - w_B \quad (13)$$

$$\eta_{Rankine} = \frac{w_{liq}}{q_{cal}} \quad (14)$$

Para o termo de calor deve-se considerar a energia proveniente do combustível utilizado para o ciclo de Rankine. Este fator é função do poder calorífico inferior (PCI) do combustível, e da vazão em massa utilizada para a geração de calor, como demonstrada na Equação 15.

$$\dot{Q}_{combustivel} = \dot{m} \times PCI_{combustivel} \quad (15)$$

A eficiência do ciclo Rankine é definida, portanto, pela Equação 16.

$$\eta_{Rankine} = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{Q}_{combustivel}} \quad (16)$$

A eficiência do ciclo ao se adicionar um sistema de reaproveitamento do calor não utilizado pelo ciclo de potência a vapor é dada pela Equação 17, considerando as potências líquidas calculadas para os dois ciclos, e o calor adicionado no sistema no combustor da microturbina.

$$\eta_{Total} = \frac{\dot{W}_{Brayton\ líquido} + \dot{W}_{Rankine\ líquido}}{\dot{Q}_{total}} \quad (17)$$

### 3 REVISÃO DA LITERATURA

O modelo matemático contemplado utilizará o método dos balanços de energia, e de massa, aplicáveis a um volume de controle. Serão estudados o ciclo como um todo, e os respectivos equipamentos de cada ciclo. Com o volume de controle determinado, e suas fronteiras delimitadas, a análise de suas propriedades tais como massa e energia, poderá ser realizada pelo princípio geral

das equações de conservação. Por convenção, grandezas inseridas no volume receberão o sinal positivo, e grandezas retiradas terão o sinal negativo adotado.

Conforme relatado por Rosen (2012, p. 253), proposto em 1851 pelo físico William John Macquorn Rankine (1820-1872), o Ciclo de Rankine propunha um método para determinar a eficiência energética teórica de qualquer motor a vapor utilizando suas temperaturas de operação. “O desenvolvimento começa por se considerar, novamente, os quatro principais componentes: turbina, condensador, bomba e caldeira.” (MORAN, 2018, p. 358).

Nomeado em homenagem a George Brayton (1830-1892), e caracterizado por (ÇENGEL, 2013, p. 507), o Ciclo Brayton para turbinas a gás é amplamente utilizado para em sistemas de potência termoelétricos e termomecânicos. Diferentemente do Ciclo de Rankine, o Ciclo Brayton utiliza gases de combustão como fonte de energia. Sua arquitetura básica é composta de um compressor, um combustor, e uma turbina.

Para turbinas e motores a combustão interna, operantes do ciclo Brayton, utilizam-se combustíveis líquidos e gasosos para o seu funcionamento, comumente associados ao gás natural, derivados de petróleo, com destaque para gasolina e diesel, e combustíveis renováveis com o biogás e etanol. De acordo com a International Energy Agency (2020, p. 30), cerca de 23% da energia elétrica mundial provém de fontes relacionadas ao gás natural, e cerca de 3% proveniente de derivados de petróleo. Segundo a Empresa de pesquisa energética (2020, p. 16), cerca de 9% da energia elétrica gerada no Brasil provém de fontes relacionadas ao gás natural, e cerca de 2%, referentes a derivados de petróleo.

Com o enfoque na análise do gás natural, segundo a Empresa de pesquisa energética (2020, p. 20), trinta e sete por cento da demanda brasileira de gás natural é utilizada na produção de energia elétrica, e vinte e cinco por cento é consumido diretamente no setor industrial, dados estes mostrados nos gráficos 3 e 4 para os anos de 2018 e 2019, respectivamente.

Com uma gradativa mudança em políticas ambientais, com o objetivo de reduzir impactos ao meio ambiente, a substituição de fontes combustíveis fósseis por fontes renováveis já é uma realidade global. Uma das alternativas ao uso do gás natural, é o uso do biogás.

O biogás é obtido a partir da biodigestão anaeróbica de matéria orgânica, é comumente utilizado dejetos de animais para o processo de degradação anaeróbica. O processo ocorre em múltiplas etapas a partir de um conjunto de microrganismos. O biogás resultante possui majoritariamente de 50% a 70% de gás metano em sua composição volumétrica, e gás carbônico para o restante, como descrito por Kunz e Oliveira (2006, p. 29).

Ambos os ciclos apresentam ineficiências, no caso de Rankine, não há um aproveitamento completo do vapor em altas temperaturas em função das propriedades termodinâmicas da água. No caso de Brayton há um despejo de energia térmica pelos gases de exaustão não aproveitados pela



turbina. A solução para lidar com estas limitações foi a criação dos Ciclos Combinados Termodinâmicos.

Aproveitando os gases de exaustão de uma turbina a gás em um gerador de vapor associado com uma turbina a vapor, incrementa em média 15% ao rendimento termoelétrico se comparados ao Ciclo Brayton, individualmente. O resultado é um aproveitamento total de cerca de 50% de acordo com B&W (2005, p. 2-24).

Serrano-Sanchez, Olmeda-Delgado e Petrakopoulou (2019) apresentaram uma proposta de usina híbrida, termelétrica e solar, para a diminuição da necessidade de consumo de carvão mineral como fonte de calor. Em sua simulação foram utilizados parâmetros reais baseados na usina solar de Gemasolar, tais como localização geográfica, estações do ano, e horários de captação de luz solar variados. Durante o dia, a usina opera de em um ciclo de cogeração, enquanto à noite é utilizado somente combustível fóssil. Após simulações realizadas em *software* houve um rendimento global de 35,8%, sem levar em consideração a fonte solar. Houve ainda uma queda de 4,6% no consumo de carvão mineral, e uma redução de 325.273 toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas na atmosfera. O custo de produção, porém, foi maior devido aos custos superiores de aquisição e implantação da tecnologia solar, onde o custo de produção a partir de carvão mineral foi de 0,12 (U\$/kWh), ante 0,19 (U\$/kWh) do ciclo combinado. Portanto, houve um ganho de eficiência, uma redução no consumo de combustível, e na emissão de poluentes, porém, este modelo de produção de energia ainda apresenta um custo elevado, o que influencia negativamente em sua implantação.

Nos trabalhos de Dirzo e Casarín (2009), e Sordi *et al.* (2006), há a associação de planta de produção de hidrogênio à uma turbina a vapor. O processo aproveita os gases resultantes, hidrogênio e oxigênio, do processo químico, com temperaturas aproximadas de 815 a 1000 graus celsius, conforme descrito por Boyce (2002, p. 19). Uma das maneiras para se aproveitar destes gases, é utilizá-los em como fonte de calor para aquecer a água, substituindo os combustíveis fósseis na obtenção de calor. Dirzo e Casarín (2009) propuseram duas possibilidades, a primeira utiliza um trocador de calor entre os gases e a água do circuito, e na segunda opção, os gases hidrogênio e oxigênio são associados e o produto resultante é a água, esta será em um processo denominado combustão submersa.

Dirzo e Casarín (2009) determinam uma eficiência global teórica para este sistema de 50%, superior à média de 34% de rendimento em plantas termelétricas em operação. Foi constatado também que a o processo de combustão do hidrogênio, Equação 18, libera de duas a três vezes mais energia do que qualquer outro combustível a base de hidrocarbonetos.



O custo de produção do hidrogênio é mais caro se comparado à outras fontes combustíveis. Porém, para uma mesma capacidade produzida de energia elétrica, necessita-se de menos combustível, e há ainda a possibilidade de reciclagem da água. Pode-se concluir que este processo é bastante vantajoso pois substitui completamente a utilização de combustíveis fósseis, por uma fonte renovável e que não polui o meio ambiente.

Almejando o reaproveitamento de calor do processo de produção de cimento, Paredes-Sánchez *et al.* (2015), apresentaram um estudo sobre a cogeração a partir do reaproveitamento do calor perdido no forno de calcificação do cimento. Foi utilizada uma planta de produção de cimento com capacidade de produção de 1.7 Mkg/dia com a temperatura de operação do forno de 1450°C. O ciclo de cogeração aproveita os gases do pré-aquecedor, que se encontram na temperatura de 330°C, em um sistema de recuperação de calor, onde ocorre a troca térmica para o circuito complementar, onde a temperatura de operação é de 250°C. Por fim, um trocador de calor permite a transferência de energia para o fluido operante no ciclo de Rankine. O calor não aproveitado na produção de energia elétrica será coletado através do condensador, e utilizado em outros processos na planta de produção. Este ciclo possibilita a produção de 5,5 GWh/ano de energia elétrica e 23,7 GWh/ano de energia térmica, resultando em um menor consumo de carvão mineral, na ordem de 3.000 toneladas por ano, e uma diminuição de emissão de dióxido de carbono na atmosfera, na ordem de 8.000 toneladas por ano. Com um custo de implantação estimado em 3.000.000 de dólares, e uma economia anual de 700.000 dólares em combustível e energia, o investimento seria pago em 4,2 anos. Este estudo demonstra que a implantação de ciclos de cogeração pode trazer benefícios à curto prazo.

Guerra *et al.* (2018) utilizaram o conceito de cogeração em uma destilaria, além da geração de energia elétrica, foram estudadas o potencial do bagaço de cana como combustível para caldeiras, e o aproveitamento do vapor proveniente da turbina na utilização de processos de produção do etanol. Neste trabalho, usado o conceito de exergia, que consistem no máximo trabalho teórico que pode ser obtido através de matéria, em um equilíbrio termodinâmico com o meio em que se encontra. Dez diferentes situações foram realizadas em função das diferentes pressões de operação de vapor, e do volume disponível de bagaço de cana para a combustão em caldeiras. A análise termodinâmica revelou um incremento de 37% da eficiência da exergia, além de um aumento de 63% na produção elétrica aumentando-se a pressão do vapor de 2,0 MPa para 10 MPa.

Rasul, Ault e Sajjad (2015) estudaram o biogás como combustível para microturbinas a gás, comparando a capacidade destas de geração energia, com motores a combustão interna para uso em geradores em áreas remotas. A obtenção do biogás é dada a partir da decomposição de matéria orgânica em biodigestores anaeróbicos. Segundo Rasul, Ault e Sajjad (2015, p. 1065), o produto da

digestão consiste em uma mistura de gases, sendo ela composta de 60% a 70% metano, e 30% a 40% de dióxido de carbono, e cerca de 1% de sulfeto de hidrogênio. O ciclo de geração proposto conta diversos componentes, são eles, duas turbinas a gás, uma para o compressor, e a outra para o gerador, sistema termo solar, e os biodigestores. O biogás proveniente é queimado no combustor e enviado para a primeira turbina a gás. Logo em seguida, os gases remanescentes são enviados à turbina de potência, para a geração de energia elétrica, nesta fase, os gases são reaquecidos por meio da adição de vapor aquecido pelo sistema de captação solar. Para uma temperatura de 1.227°C, e pressão de 500 kPa, com uma adição de aproximadamente 15% de vapor aquecido, a eficiência térmica foi de aproximadamente 65%. Foi concluído que este tipo de sistema de geração de eletricidade é mais eficiente se comparado aos tradicionais geradores de motores a combustão interna. Foi constatado também, que para a geração de biogás, é necessário um volume relativamente pequeno de biomassa, de acordo com Rasul, Ault e Sajjad (2015, p. 1071), de 4 a 5 bovinos produziram a quantidade necessária de matéria orgânica para a produção de biogás, portanto, pequenos produtores pecuários seriam beneficiados com esta tecnologia.

Com possibilidades de aplicação em diversos setores, esta tecnologia apresenta um grande potencial para o Brasil, país que possui amplas áreas de aplicações demonstradas nos estudos anteriores.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a estimativa da quantidade de matéria orgânica para a geração de biogás, foi considerado a operação de 1 hora das turbinas, a quantidade de calor utilizada foi de acordo com cada equipamento, de acordo com a Tabela 1. Foi considerado um volume de 60% de metano gerado na composição do biogás, resultando em um poder calorífico superior (PCS) para o biogás de 23.924,4 (kJ/Nm<sup>3</sup>), utilizando os dados disponíveis no trabalho de Hirano (2015).

**Tabela 1** – especificações de consumo de combustível para as turbinas Capstone

<b>Equipamento</b>	<b>Potência elétrica (kW)</b>	<b>Calor de combustão através do PCS (MJ/hr)</b>
<b>Microturbina a gás C1000S</b>	1.000	12.000
<b>Microturbina a gás C800S</b>	800	9.600
<b>Microturbina a gás C600S</b>	600	7.200
<b>Microturbina a gás C200S</b>	200	2.400
<b>Microturbina a gás C65</b>	65	888

**Fonte:** Capstone (2021)

Na Tabela 3, estão todos os resultados calculados realizados determinando o volume de biogás previsto, e a quantidade média de dejetos necessário para a obtenção de tal volume. Os valores de  $P_c$  estão descritos na Tabela 2, de acordo com Hirano (2015, p. 37).

**Tabela 2** – Potencial de produção de biogás a partir de dejetos animais

**TABELA 2.5 - Potencial de produção de biogás a partir de dejetos animais**

Espécie	m <sup>3</sup> de biogás/kg esterco
Caprino/ovino	0,040 - 0,061
Bovino de leite	0,040 - 0,049
Bovino de corte	0,040
Suínos	0,075 - 0,089
Frangos de corte	0,090
Poedeiras	0,100
Codornas	0,049

Fonte: Hirano (2015, p. 37)

**Tabela 3** – Volume de biogás e quantidade de rejeito necessárias calculadas para suínos

Equipamento	Energia Consumida (MJ) <sup>1</sup>	Volume de Biogás necessário (m <sup>3</sup> ) <sup>3</sup>	Pc (m <sup>3</sup> biogás/kg esterco) <sup>2</sup>	Quantidade de rejeito necessária (kg) <sup>3</sup>
Microturbina a gás C1000S	12.000	501,58	0,080	6.269,75
Microturbina a gás C800S	9.600	401,26	0,080	5.015,80
Microturbina a gás C600S	7.200	300,95	0,080	3.761,85
Microturbina a gás C200S	2.400	100,32	0,080	1.253,95
Microturbina a gás C65	888	37,12	0,080	463,96

Fonte: Capstone (2021)<sup>1</sup>, Hirano (2015, p. 37)<sup>2</sup>, e o autor<sup>3</sup>

**Tabela 4** – Volume de biogás e quantidade de rejeito necessárias calculadas para bovinos de corte

Equipamento	Energia Consumida (MJ) <sup>1</sup>	Volume de Biogás necessário (m <sup>3</sup> ) <sup>3</sup>	Pc (m <sup>3</sup> biogás/kg esterco) <sup>2</sup>	Quantidade de rejeito necessária (kg) <sup>3</sup>
Microturbina a gás C1000S	12.000	501,58	0,040	12.539,5
Microturbina a gás C800S	9.600	401,26	0,040	10.031,6
Microturbina a gás C600S	7.200	300,95	0,040	7.523,7
Microturbina a gás C200S	2.400	100,32	0,040	2.507,9
Microturbina a gás C65	888	37,12	0,040	927,92

Fonte: Capstone (2021)<sup>1</sup>, Hirano (2015, p. 37)<sup>2</sup>, e o autor<sup>3</sup>

Foram considerados apenas as criações de suínos e de bovinos de corte, em função da grande disponibilidade de produtores no país.

Para a simulação de cenários, as temperaturas pré-determinadas usadas estão mostradas nas Tabelas 5 e 6. A Tabela 5 relaciona apenas as temperaturas inferiores alvo após a passagem pela turbina. A Tabela 6 apresenta a temperatura padrão máxima para o aquecimento d'água para o aproveitamento da energia do fluido. Para todas as análises energéticas, foram utilizados os valores de temperatura mínima do circuito variáveis de 20 a 60 °C. Adicionalmente, cada ensaio em cada equipamento contou com vazões em massa pré-determinada, descrita também na Tabela 6.

**Tabela 5** – especificações de temperaturas no condensador para todas as simulações

<b>Temperatura de gases de exaustão (°C)</b>	<b>Temperatura mínima do ciclo (°C)</b>
<b>280</b>	20
<b>280</b>	30
<b>280</b>	40
<b>280</b>	50
<b>280</b>	60

**Fonte:** Capstone (2021)

**Tabela 6** – especificações de temperaturas e das vazões em massa, para seus respectivos cenários

<b>Ensaio</b>	<b>Temperatura máxima do ciclo (°C)</b>	<b>Ensaio</b>	<b>Vazão em massa (kg/s)</b>
<b>1</b>	100	1	0,5
<b>2</b>	110	2	1,0
<b>3</b>	120	3	1,5
<b>4</b>	130	4	2,0
<b>5</b>	140	5	2,5
		6	3,0

**Fonte:** o autor

Para a primeira fase do estudo, foram consideradas as próprias especificações do fabricante, neste trabalho foram utilizados equipamentos do fabricante *Capstone®*, devido a referência em fabricação de microturbinas a gás, sendo esta classe de máquina fundamental para este trabalho, em

função da natureza do projeto abordar pequenas capacidades de produção elétrica, contemplando até 1000 kW.

Além das turbinas, para cada equipamento do ciclo de potência a vapor, lhe foi conferido um rendimento, conforme Tabela 7.

**Tabela 7** – rendimentos para equipamentos do ciclo de potência a vapor

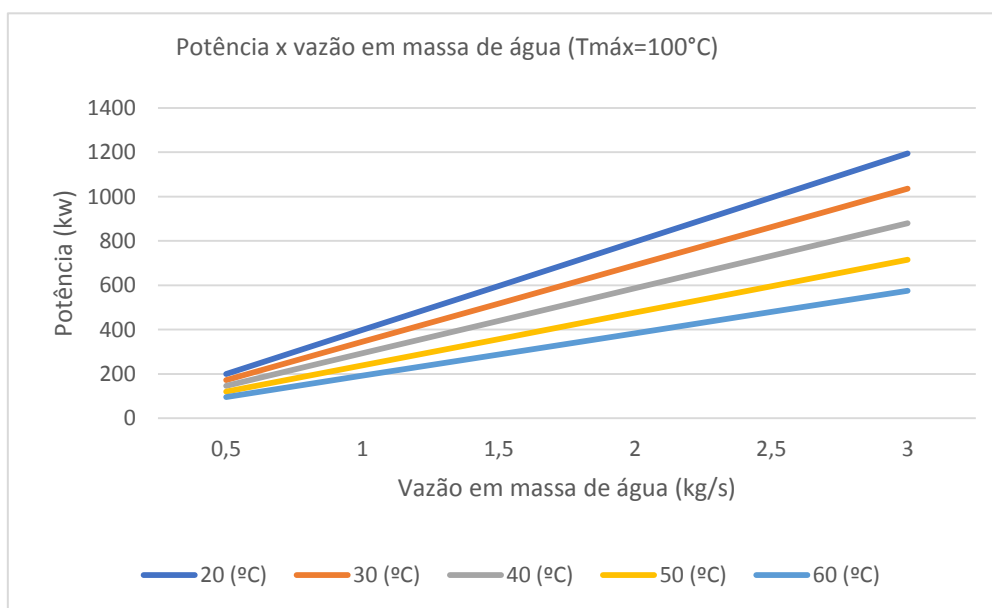
Equipamento	Rendimento, $\eta$ (%)
Gerador de vapor	90
Turbina a vapor	75
Condensador	99
Bomba hidráulica	75

**Fonte:** Carlão (2010, p. 39)

Os valores calculados, foram os valores de potência obtida necessária em função das temperaturas máximas e mínimas do sistema, e da vazão em massa empregada, foi utilizado um valor médio para o rendimento do gerador, conforme Tabela 7.

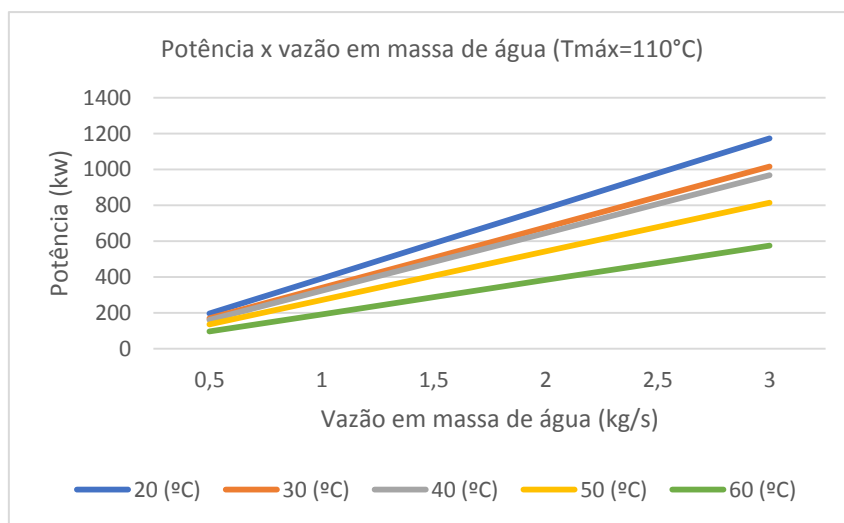
A Figura 1, Figura 2, Figura 3, Figura 4, e Figura 5, relacionam o efeito da temperatura mínima do sistema e da vazão em massa aplicada na potência final da turbina.

**Figura 2** – potências obtidas para temperatura de operação mínima igual a cem graus



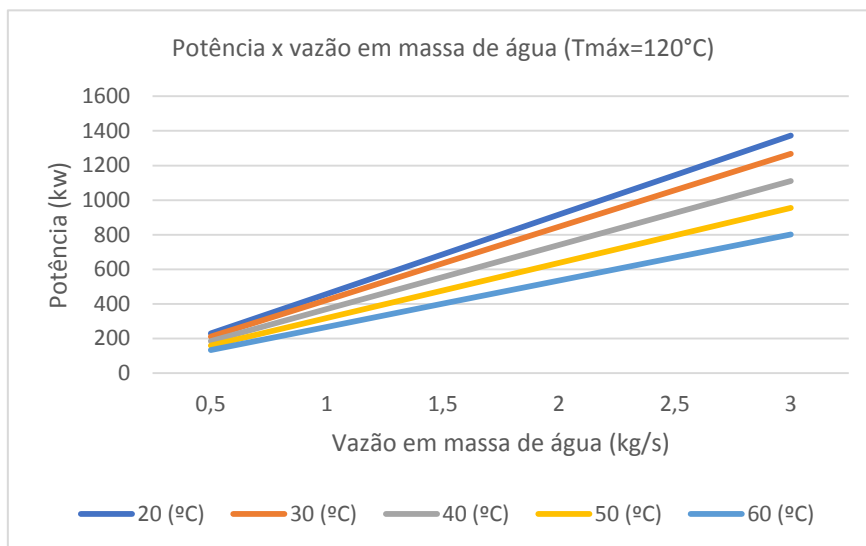
**Fonte:** o autor

**Figura 3** – potências obtidas para temperatura de operação mínima igual a cento e dez graus



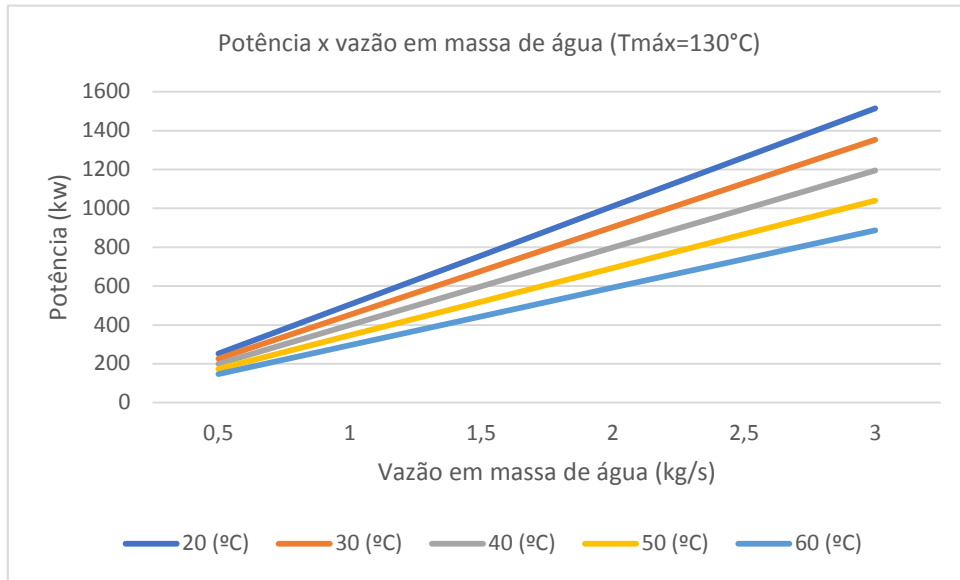
**Fonte:** o autor

**Figura 4** – potências obtidas para temperatura de operação mínima igual a cento e vinte graus



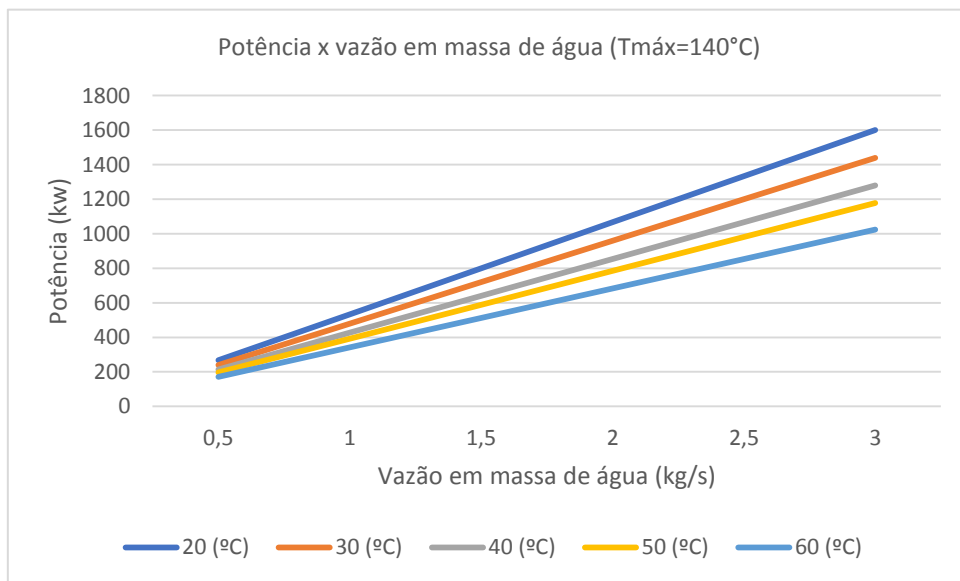
**Fonte:** o autor

**Figura 5** – potências obtidas para temperatura de operação mínima igual a cento e trinta graus



**Fonte:** o autor

**Figura 6** – potências obtidas para temperatura de operação mínima igual a cento e quarenta graus



**Fonte:** o autor



Em resultados gerais, o melhor desempenho foi observado na faixa mínima de operação de vinte graus celsius, dada a condição termodinâmica, onde o menor valor de energia para esta temperatura indica um maior aproveitamento do potencial energético do fluido. Esta temperatura indica um cenário mais bem otimizado de operação, porém, em circunstâncias reais, o condensador necessita empenhar um maior troca térmica para atingir o valor utilizado.

Por outro lado, a faixa de temperatura de sessenta graus apresentou o desempenho inferior. Em função do menor resfriamento, o fluido apresenta entalpia superior, que poderia ser mais bem aproveitada, se a faixa de temperatura fosse inferior. Portanto, este caso demonstra o pior cenário de operação dentre as temperaturas estudadas.

Para os cenários de operação do ciclo combinado foram utilizadas as microturbinas a vapor ST 500 e ST 1500 da fabricante *Solidida*®, e a microturbina C1000S da fabricante *Capstone*®. Os dados utilizados nos cálculos estão disponíveis na tabela 8. Foram contempladas 3 pressões de operação, sendo elas 1,6 MPa, 2,0 MPa, e 4,0 MPa. A temperatura mínima do sistema foi considerada constante, e igual a 50 °C. A temperatura de saída do regenerador utilizada foi de 95 °C. As microturbinas contam ainda com superaquecedores.

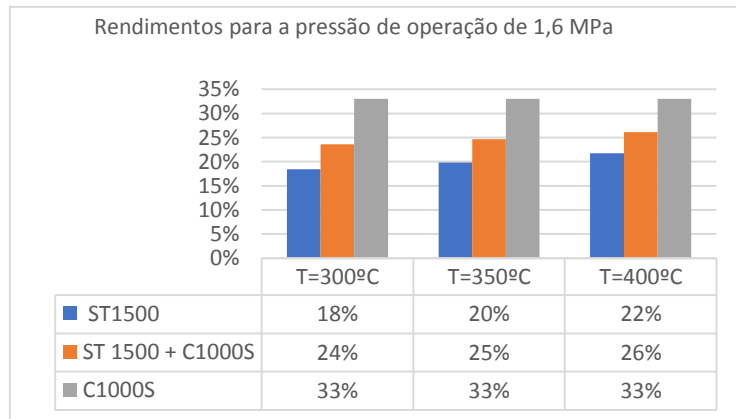
**Tabela 8** – especificações gerais para as turbinas utilizadas

<b>Equipamento</b>	<b>Potência elétrica (kW)</b>	<b>Fluxo de ar na exaustão (kg/s)</b>	<b>Temperatura dos gases de exaustão (°C)</b>	<b>Fluxo de água no sistema (kg/s)</b>
<b>Microturbina a vapor ST 1500<sup>2</sup></b>	1.500	-	-	2,5
<b>Microturbina a gás C1000S<sup>1</sup></b>	1.000	6,7	280	-
<b>Microturbina a vapor ST 500<sup>2</sup></b>	500	-	-	0,83

**Fonte:** <sup>1</sup>Capstone (2021) e <sup>2</sup>Solidida (2021)

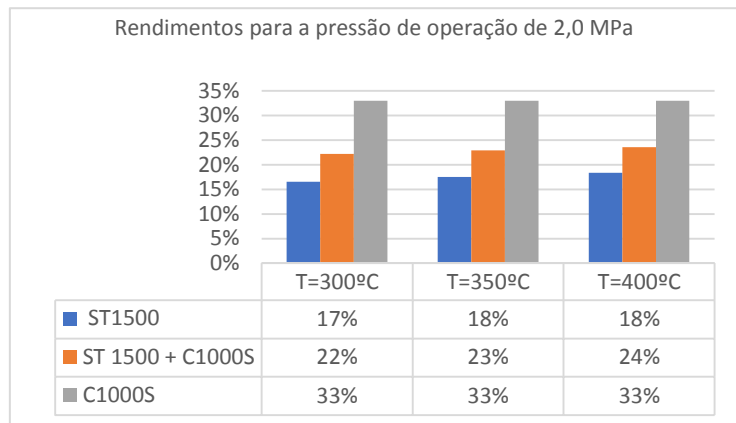
A Figura 7, Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11, e Figura 12, mostram os resultados obtidos para os rendimentos para os cenários simulados, que contemplam, os equipamentos em operação individual, e a combinação dos ciclos.

**Figura 7** – rendimentos obtidos para a pressão de operação de 1,6 MPa



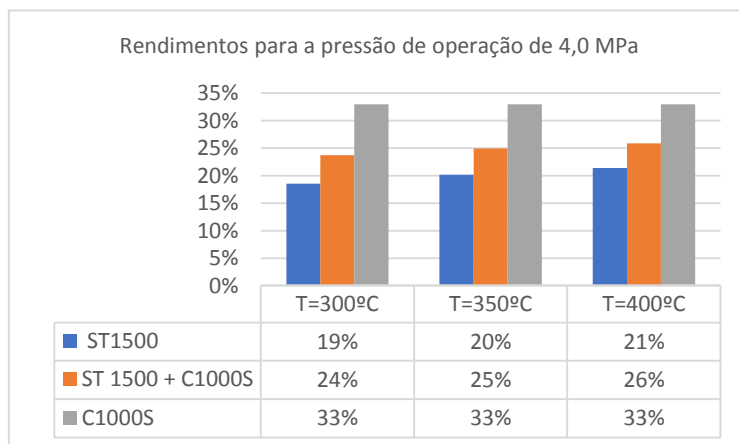
**Fonte:** o autor

**Figura 8** – rendimentos obtidos para a pressão de operação de 2,0 MPa



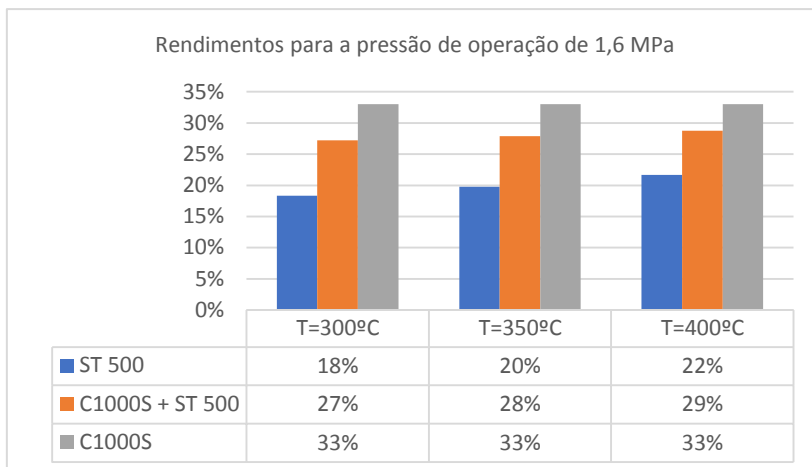
**Fonte:** o autor

**Figura 9** – rendimentos obtidos para a pressão de operação de 4,0 MPa



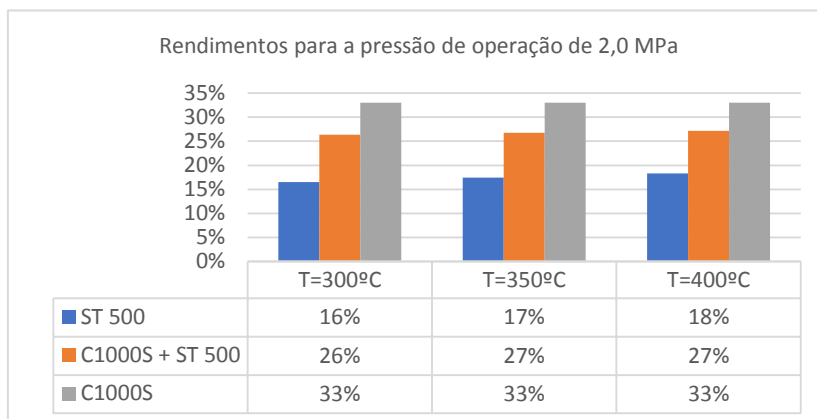
**Fonte:** o autor

**Figura 10** – rendimentos obtidos para a pressão de operação de 1,6 MPa



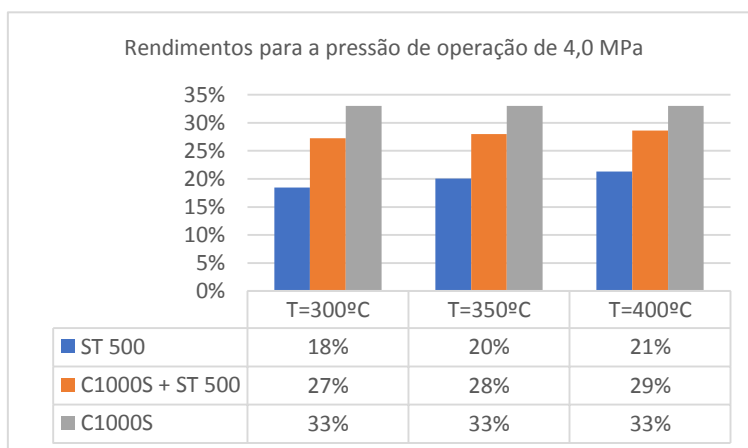
**Fonte:** o autor

**Figura 11** – rendimentos obtidos para a pressão de operação de 2,0 MPa



**Fonte:** o autor

**Figura 12** – rendimentos obtidos para a pressão de operação de 4,0 MPa



**Fonte:** o autor

De uma maneira geral, o rendimento do ciclo combinado foi inferior se comparado a microturbina a gás, e superior se comparado a microturbina a vapor. O calor recuperado em cada ciclo está descrito na Tabela 9.

**Tabela 9** – calor recuperado dos gases de exaustão da microturbina a gás

<b>Equipamento</b>	<b>Potência recuperada para o aquecimento no regenerador (kW)</b>	<b>Fluxo de água no sistema (kg/s)</b>	<b>Redução de consumo de combustível (%)</b>
<b>Ciclo combinado C1000S + ST 1500</b>	471,88	2,5	5,63
<b>Ciclo combinado C1000S + ST 500</b>	156,66	0,83	5,64

**Fonte:** o autor

Por fim, os resultados deste trabalho apresentam resultados teóricos em função de algumas simplificações nos modelos matemáticos. Na prática, estes valores irão se apresentar menores em função das perdas não utilizadas em pleno potencial.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Conclui-se neste trabalho que os ciclos combinados podem se apresentar como uma solução para um aumento da eficiência energética, utilizando-se de soluções simples que podem proporcionar um razoável menor consumo de combustível.

Em função do alto valor do calor específico da água, não foi possível obter um maior aproveitamento dos gases de exaustão da microturbina. Uma das possíveis soluções, seria a utilização de um Ciclo de Rankine orgânico, onde a água é substituída por um fluido orgânico, que possui propriedades térmicas mais apropriadas para a troca térmica, onde sua evaporação pode ser atingida com uma menor quantidade de calor.

O Ciclo Brayton não recebeu alterações adicionais neste trabalho, em função de sua configuração de fábrica impedir modificações significantes. Para o Ciclo de Rankine, apenas foi adicionado um regenerador, posicionado anteriormente à caldeira, o restante do conjunto está de acordo com as configurações de fábrica. Tal configuração possibilita a fácil instalação e manutenção dos equipamentos.

Para o Ciclo Rankine, pode ser explorada a adição de mais equipamentos para o melhor aproveitamento do calor fornecido pelo combustível, tais como turbinas de múltiplos estágios, e circuitos com mais regeneradores. Há ainda a possibilidade do uso de outras fontes térmicas presentes em novas tecnologias, tais como as usinas de fissão e fusão nucleares, as células de

combustível, e os processos industriais que envolvem uma grande quantidade de energia térmica não aproveitada.

Em relação a utilização de gás natural para a geração de eletricidade, o que corresponde a 30% da capacidade instalada nacional, o ganho de energia pode ser razoável para os equipamentos que não possuam sistema de recuperação de calor, uma vez que se utilize turbinas a gás, para a recuperação do calor proveniente dos gases de combustão.

Adicionalmente, com a possibilidade de utilizar o biogás como combustível em substituição ao gás natural, resulta em um menor impacto ambiental, maior diversificação da matriz elétrica, maior desenvolvimento regional e tecnológico, e maior oferta de energia elétrica.

## REFERÊNCIAS

B&W - THE BABCOCK & WILCOX COMPANY (Barberton). **Steam It's generation and use**. 41. ed. Barberton: [s. n.], 2005.

BOYCE, Meherwan P. **Handbook for cogeneration and combined cycle power plants**. 1. ed. New York: Amer Society of Mechanical, 2002. 557 p. ISBN 978-0791801697.

CAPSTONE TURBINE CORPORATION. Acesso em 20 de março de 2021, disponível em <<http://www.capstoneturbine.com>>

CARLÃO, Rui Luís Lopes. **Projecto de um ciclo de Rankine orgânico para produção de 200 kW**. Orientador: Carlos Manuel Coutinho Tavares Pinho. 2010. 68 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, [S. l.], 2010

CENGEL, Yunus A. **Termodinâmica**. 7. Porto Alegre Bookman 2013 1 recurso online ISBN 9788580552010.

DIRZO, Rafael Sánchez; CASARÍN, Rodolfo Silva. Combustible hidrógeno para el ciclo Rankine. **Educación Química**, [s. l.], v. 20, p. 176-181, 2009. DOI [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30024-7](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30024-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0187893X18300247>. Acesso em: 5 nov. 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2020**: Ano base 2019. Rio de Janeiro: [s. n.], 2020.

FIASCHI, Daniele *et al.* Exergo-Economic and Environmental Analysis of a Solar Integrated Thermo-Electric Storage. **Energies**, [s. l.], v. 13, 2020. DOI [doi:10.3390/en13133484](https://doi.org/10.3390/en13133484). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/13/3484>. Acesso em: 5 nov. 2020.

GUERRA, João Paulo *et al.* Thermodynamic and Environmental Analysis of Scaling up Cogeneration Units Driven by Sugarcane Biomass to Enhance Power Exports. **Energies**, [s. l.], v. 11, 2018. DOI <https://doi.org/10.3390/en11010073>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/1/73>. Acesso em: 5 nov. 2020.

HIRANO, Marcio Yukio. **Geração de energia por microturbina alimentada à biogás em uma propriedade rural**: Estudo de caso. Orientador: Celso Luiz da Silva. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2015

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (França). **Data and statistics**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics?country=BRAZIL&fuel=Energy%20supply&indicator=ElecGenByFuel>. Acesso em: 12 nov. 2020.

KUNZ, Airton; OLIVEIRA, P.A.V. Aproveitamento de dejetos de animais para geração de biogás. **Revista da política agrícola**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 28-35, 2006.

MORAN, Michael J. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 8. Rio de Janeiro LTC 2018 1 recurso online ISBN 9788521634904.

OLIVEIRA, P. A. V.. Projeto de biodigestor e estimativa da produção de biogás em sistemas de produção. **Comunicado Técnico**, Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 416, 1-6, 2005.

PAREDES-SÁNCHEZ, José Pablo *et al.* Using waste energy from the Organic Rankine Cycle cogeneration in the Portland cement industry. **DYNA**, [s. l.], 2015. DOI <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n194.44028>. Disponível em: <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/44028>. Acesso em: 5 nov. 2020.

RASUL, M.G.; AULT, C.; SAJJAD, M. Bio-gas Mixed Fuel Micro Gas Turbine Co-Generation for Meeting Power Demand in Australian Remote Areas. **Energy Procedia**, [s. l.], v. 75, p. 1065-1071, 2015. DOI <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.476>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215012448>. Acesso em: 12 nov. 2020.

ROSEN, William. **The Most Powerful Idea in the World**: A Story of Steam, Industry, and Invention. [S. l.]: University of Chicago Press, 2012. 370 p.

SERRANO-SANCHEZ, Cristina; OLMEDA-DELGADO, Marina; PETRAKOPOULOU, Fontina. Exergy and Economic Evaluation of a Hybrid Power Plant Coupling Coal with Solar Energy. **Applied Sciences**, [s. l.], 2019. DOI <https://doi.org/10.3390/app9050850>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/5/850/htm>. Acesso em: 5 nov. 2020.

SORDI, Alexandre *et al.* Análise termodinâmica de um ciclo de potência com célula a combustível sofc e turbina a vapor. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, v. 28, n. 1, p. 65-71, 2006.

SOLIDDA ENERGIA. Acesso em 20 de março de 2021, disponível em < <http://www.solidda.com.br/> >

WABTEC CORPORATION. Acesso em 20 de março de 2021, disponível em < <https://www.wabteccorp.com/> >