



Análise exergetica de um ciclo Rankine Orgânico operando com a biomassa da casca do coco

Álvaro Barreto da Silva, Lucas Rodrigues Soares da Silva

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI Campus Teresina Central, Teresina, Piauí, Brasil.

RESUMO

Introdução. A biomassa é um recurso que pode ser utilizado para gerar energia por meio da queima. No presente trabalho é apresentada a casca do coco verde como fonte alternativa de biomassa para aplicação em um ciclo Rankine Convencional acoplado a um ciclo Rankine Orgânico. O coco verde possui uma área de colheita em território brasileiro de aproximadamente 190.000 hectares e uma produção de mais ou menos 1,8 bilhões de frutos por ano e um baixo índice de reaproveitamento da casca. **Objetivo.** Dessa forma, a pesquisa visa estudar a aplicação do bagaço da casca do coco verde para gerar energia a uma planta de cogeração. **Metodologia.** As análises foram realizadas utilizando a capacidade energética da casca do coco encontrada na literatura e três fluidos de trabalho foram aplicados ao ciclo Rankine Orgânico, sendo eles o R245fa, R134a e o R123. A comparação do ciclo com os três fluidos foi realizada no intuito de verificar qual fornece melhor eficiência exergetica para as condições de operação propostas. O software utilizado para o estudo foi o MATLAB e o Engineering Equation Solver (EES). **Resultados e discussão.** Ao examinar os resultados, constatou-se que o bagaço da casca do coco, com um Poder Calorífico Inferior (PCI) de 17.000 kJ/kg, apresenta bom aproveitamento energético, podendo ser utilizado para alimentar um ciclo Rankine. **Considerações finais.** Diante disso, o fluido R134a apresentou o melhor desempenho para a planta proposta, com eficiências energética e exergetica de 33,15% e 43%, respectivamente. Já os fluidos R123 e R245fa obtiveram eficiências exergeticas de 34,65% e 35,85%, respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: Biomassa. Coco. Biocombustível. Termodinâmica. Análise.

Exergy analysis of an Organic Rankine cycle operating with coconut husk biomass

ABSTRACT

Introduction. Biomass is a resource that can be used to generate energy through combustion. In the present work, the green coconut husk is presented as an alternative biomass source for application in a conventional Rankine cycle coupled to an Organic Rankine Cycle (ORC). In Brazil, green coconut cultivation covers an area of approximately 190,000 hectares, with a production of around 1.8 billion fruits per year, and its husk presents a low reuse rate. **Objective.** Thus, this research aims to study the application of green coconut husk bagasse to generate energy for a cogeneration plant. **Methodology.** The analyses were carried out using the energetic capacity of coconut husk reported in the literature, and three working fluids were applied to the ORC: R245fa, R134a, and R123. A comparison of the cycle

Correspondência dos Autores

^{1a}ORCID: [0009-0005-3529-0823](https://orcid.org/0009-0005-3529-0823). Email: alvarobarretosilva01@gmail.com

^{1b}ORCID: [0009-0009-9687-3204](https://orcid.org/0009-0009-9687-3204). Email: catce.2020111bemc0203@aluno.ifpi.edu.br (Autor correspondente)

Artigo submetido a sistemas de verificação de similaridade

Submetido 11/10/2024 – Aceito 10/09/2025 – Publicado 14/11/2025



with the three fluids was conducted in order to determine which one provides the best exergetic efficiency under the proposed operating conditions. The software used for the study was MATLAB and Engineering Equation Solver (EES). **Results and Discussion.** Upon examining the results, it was found that coconut husk bagasse, with a Lower Heating Value (LHV) of 17,000 kJ/kg, demonstrates good energy utilization and can be used to fuel a Rankine cycle. **Final Considerations.** In front of this. The fluid R134a showed the best performance for the proposed plant, with energy and exergy efficiencies of 33.15% and 43%, respectively. Meanwhile, fluids R123 and R245fa achieved exergetic efficiencies of 34.65% and 35.85%, respectively.

KEYWORDS: Biomass. Coconut. Biofuel. Thermodynamics. Analysis.

1 INTRODUÇÃO

De acordo Cavalcanti *et al.* (2020), a evolução da sociedade e das atividades econômicas ocasionam o aumento da demanda energética que sustenta os processos produtivos, principalmente industriais e de transporte. Observa ainda que tal demanda exige que o setor energético seja cada vez mais significativo e eficiente, o que aumenta sua dependência à extração de recursos naturais. Segundo a pesquisa feita pela instituição Semear (2023), cerca de 30% dos alimentos produzidos no Brasil são desperdiçados anualmente, resultando em perdas econômicas estimadas em R\$ 61,3 bilhões, além de impactos ambientais e sociais. O autor enfatiza que os resíduos de biomassa são mal aproveitados, apesar de seu potencial para reduzir custos de produção e poluição ambiental. De acordo com Vélez *et al.* (2012), pode-se aproveitar a biomassa por sua queima direta. Possamai (2023), realizou o estudo de ciclo Rankine operando com a biomassa do arroz e evidenciou que a usina só se tornou sustentável devido à grande disponibilidade de biomassa no local da instalação. Analogamente, Lima (2023) fez uma análise da instalação de um ciclo Rankine Orgânico na região do Amazonas, onde a produção do fruto do açaí é abundante, ela corrobora que a biomassa local é de súbita importância para abastecer o ciclo.

No Brasil, segundo a Embrapa (2021), foram produzidos 1,6 bilhões de frutos do coco verde. Cada fruto possui aproximadamente 1,8 kg cheio com um peso médio de casca tratada de 0,9 kg a 1 kg. Aproximadamente 80% da produção brasileira de coco se destina à indústria de copra e a maior parte da casca produzida no Brasil é incinerada nos locais onde se faz o descascamento dos frutos ou jogada no lixo. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), o Brasil teve uma área colhida de coco verde de 189.525 hectares, uma produção de 1,829 bilhões de frutos com um rendimento médio de 9.654 frutos por hectare (frutos/ha), o que pode ser observado na Figura 1. Com um crescimento de aproximadamente 500.000 frutos por ano desde 2010. Segundo Maria Simone (2021), na região Nordeste concentra-se 90% da área colhida de coco do país e 70% da produção, com um valor de 1,2 bilhões de frutos em 2021, sendo 7.658 frutos por hectare. Observa ainda que na Bahia, concentra-se uma das maiores produções do país com 322 milhões de frutos anuais, sendo 39.312 hectares e 8.198 frutos por hectare.

A definição de exergia teve sua introdução quando Sadi Carnot desenvolveu a primeira pesquisa que estabeleceu a base para as duas leis da termodinâmica através da ideia de trabalho máximo possível nas máquinas de vapor (Faria, 2014). Sendo assim, a exergia representa o potencial de trabalho útil que o sistema pode produzir sem violar os princípios da termodinâmica. A análise exergética é uma ferramenta indicada na avaliação e solução para uma melhor utilização da energia disponível, pois tem a capacidade de distinguir as perdas de energia para o ambiente e as irreversibilidades internas do processo.

Neste trabalho, realiza-se a configuração de um Ciclo Rankine Orgânico que opera com uma caldeira alimentada por resíduos de biomassa. Lima (2023) evidencia o ciclo Rankine Orgânico operando com a biomassa do açaí no Amazonas. Possamai (2023) utiliza a casca do arroz como resíduo para produção da biomassa no Rio Grande do Sul. Cesar (2021) corrobora o interesse de centrais térmicas na utilização de biomassas locais devido à preocupação ambiental, dessa forma, ele analisa a reutilização dos resíduos do café como fonte de energia para um ciclo de cogeração no Espírito Santo. A biomassa utilizada no presente estudo foi a casca do coco verde da região da Bahia, a partir dos dados de produção total anual que serão destinados à planta de cogeração analisada. Além da biomassa, um estudo a respeito do melhor fluido de trabalho foi realizado em MATLAB e Engineering Equation Solver (EES) através da análise exergética para avaliar as irreversibilidades do processo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

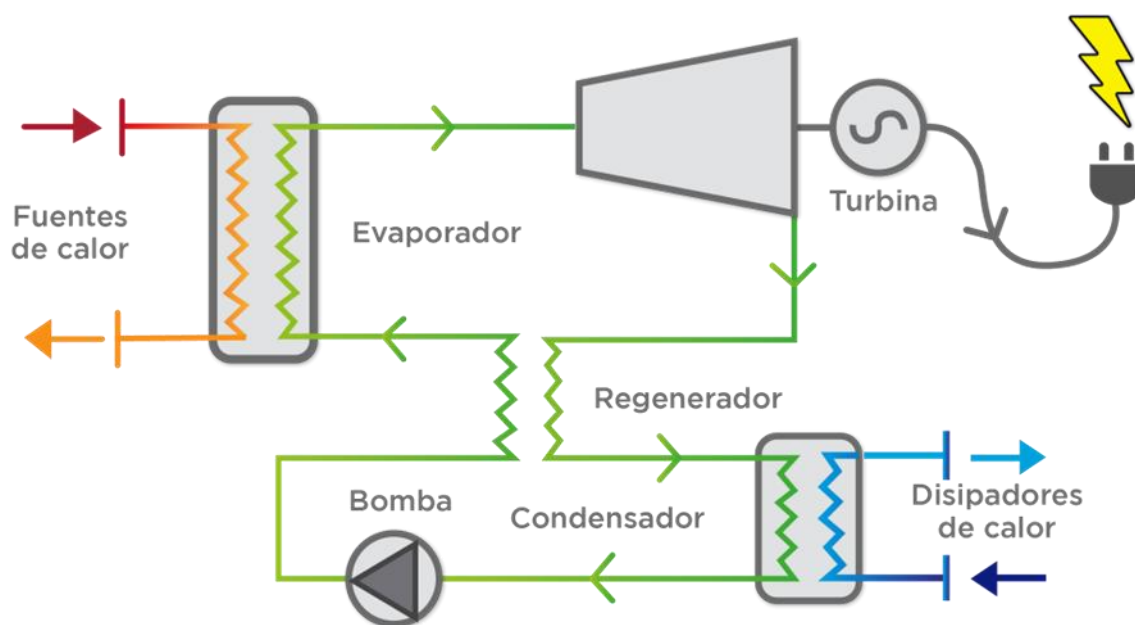
Neste tópico, é apresentada a fundamentação teórica obtida das principais literaturas a respeito do Ciclo Rankine Orgânico, sua modelagem termodinâmica e principais componentes do mesmo, os diferentes fluidos de trabalho Orgânicos, suas classificações e parâmetros importantes para a seleção do fluido, a caldeira e o processo de queima da biomassa e as propriedades da biomassa do coco.

2.1. Ciclo Rankine Orgânico (CRO)

O Ciclo Rankine Orgânico (CRO) tem se tornado uma área de intensa pesquisa e aparece como uma tecnologia promissora na conversão de calor em trabalho útil ou eletricidade. A fonte de calor pode ser de diversas origens: radiação solar, combustão de biomassa, geotérmica ou calor residual de fábricas. Diferente do ciclo Rankine Convencional, onde a água é o fluido de trabalho, o Ciclo Rankine Orgânico utiliza fluidos Orgânicos, como refrigerantes ou hidrocarbonetos. Em comparação com a água, os fluidos Orgânicos elevam a eficiência do ciclo em situações em que a máxima temperatura alcançada é baixa e/ou a planta é de pequeno porte (Tchanche *et al.*, 2009). Neste tipo de ciclo, fluidos Orgânicos são utilizados de forma a substituir a água.

A principal vantagem deste ciclo é a possibilidade de serem utilizados em fontes de baixa temperatura e pressão entre 100 °C e 300°C e de 2 a 30 bar, enquanto ciclos de potência a água operam com temperaturas entre 320-620 °C e pressão de 20-250 bar. Isso possibilita que a fonte de calor do CRO, seja energia geotérmica, energia solar, recuperação de calor residual ou biomassa (Lima, 2023). Consequentemente, o CRO se apresenta como uma fonte alternativa aos combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica. Segundo Pinto (2018), como se trata de uma tecnologia relativamente nova, necessita de mais estudos e investimentos para seu desenvolvimento a fim de se tornar uma opção competitiva e eficiente. Os componentes básicos de um ciclo Rankine Orgânico são os mesmos do ciclo Convencional e consistem em um evaporador, uma máquina de expansão, um condensador e uma bomba. Na Figura 1 está representado o funcionamento do ciclo Rankine Orgânico.

Figura 1: Ciclo de Rankine Orgânico.



Fonte: Electríz (2024).

Levando em consideração o ciclo representado e seus estados, as equações de cada volume de controle presente no ciclo foram obtidas a partir da literatura de Çengel e Boles (2013).

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho consiste em uma modelagem de um ciclo Rankine Orgânico em código computacional com o intuito de observar o comportamento do ciclo operando com a biomassa do coco e diferentes fluidos de trabalho. Os softwares computacionais utilizados foram os softwares MATLAB com auxílio da biblioteca COOLPROP e o Engineering Equation Solver (EES), que possui uma base de dados termodinâmicos para os fluidos de trabalho utilizados na análise. A metodologia empregada está dividida em:

- Seleção dos parâmetros de trabalho da caldeira
- Configuração do Ciclo Rankine Orgânico
- Seleção do fluido de trabalho
- Análise termodinâmica de primeira e segunda lei

3.1 Seleção dos parâmetros de trabalho da caldeira

Este tópico visa servir como base para um estudo mais aprofundado que ajude na escolha da caldeira ideal. Os critérios para o trabalho em relação aos parâmetros de trabalho da caldeira são:

- a) A caldeira trabalha com biomassa;
- b) A biomassa utilizada no estudo foi o coco verde produzido na Bahia, onde concentra-se uma das maiores produções do país com 322 milhões de frutos por ano, sendo 39.312 hectares e 8.198 frutos por hectare, com peso médio da casca de 0,9 kg. A partir dos dados de produção total

anual na Bahia e o desperdício de 70% dos resíduos, evidenciados por Gitel (2018), o valor utilizado para o presente estudo foi de 40.000 toneladas, na qual representa aproximadamente 19% da massa total das cascas dos cocos desperdiçados, que serão destinadas à planta de cogeração analisada. A análise foi feita em código computacional e modelagem no software MATLAB com o intuito de obter os valores de eficiência térmica e exergética, bem como realizar a análise termoeconômica do ciclo. Além da biomassa, um estudo a respeito do melhor fluido de trabalho foi realizado.

- c) Operar diariamente no mínimo 10 horas, sendo 3.650 horas por ano.
- d) Capacidade de suportar vapor a 400°C.

As hipóteses utilizadas neste trabalho vêm dos dados de entrada utilizados por Lidia (2023) e Cavalcante (2017).

3.2 Configuração do ciclo

O ciclo Rankine Orgânico é uma variação do ciclo Rankine Convencional. Neste tópico é apresentado as equações aplicadas na análise do ciclo, o critério de seleção do fluido de trabalho e a metodologia e dados de entrada considerados para o código em MATLAB. Os componentes básicos de um ciclo Rankine Orgânico, representado na figura 6, são os mesmos do ciclo Convencional.

3.2.1 Seleção do fluido de trabalho

Os critérios de seleção do fluido para este trabalho foram elaborados de maneira a atender as especificações iniciais de temperaturas desejadas para a operação do CRO seguindo o método aplicado por Lima (2023) e Quoilin *et al.* (2013), os fluidos Orgânicos comerciais utilizados para as análises foram o R245fa, R134a e o R123, pois constituem ótimas opções de fluidos Orgânicos e seguem os critérios abaixo:

- a) Temperatura crítica superior à temperatura máxima alcançada no ciclo ORC;
- b) Pressão crítica acima da pressão máxima do ciclo ORC;
- c) Tipo isentrópico;

Os critérios de inflamabilidade e toxicidade não foram admitidos para a análise realizada neste trabalho. É importante destacar que, ao selecionar um fluido de real funcionamento deve-se realizar uma seleção mais criteriosa em relação a estes fatores, principalmente devido aos riscos de manuseio e operação.

Os parâmetros dos fluidos de trabalho escolhidos para o estudo do ciclo, R245fa, R134a e o R123, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros de operação dos fluidos orgânicos de utilizados no trabalho.

Fluido	R245fa	R134a	R123
Temp. crítica °C	154	101,06	183,7
Pressão crítica MPa	3,66	3,66	4,06
T. Congelamento °C	< -160	< -96,7	< -107
Estabilidade	Estável	Estável	Estável
T. Vaporização °C	58,8	1,2	27,8

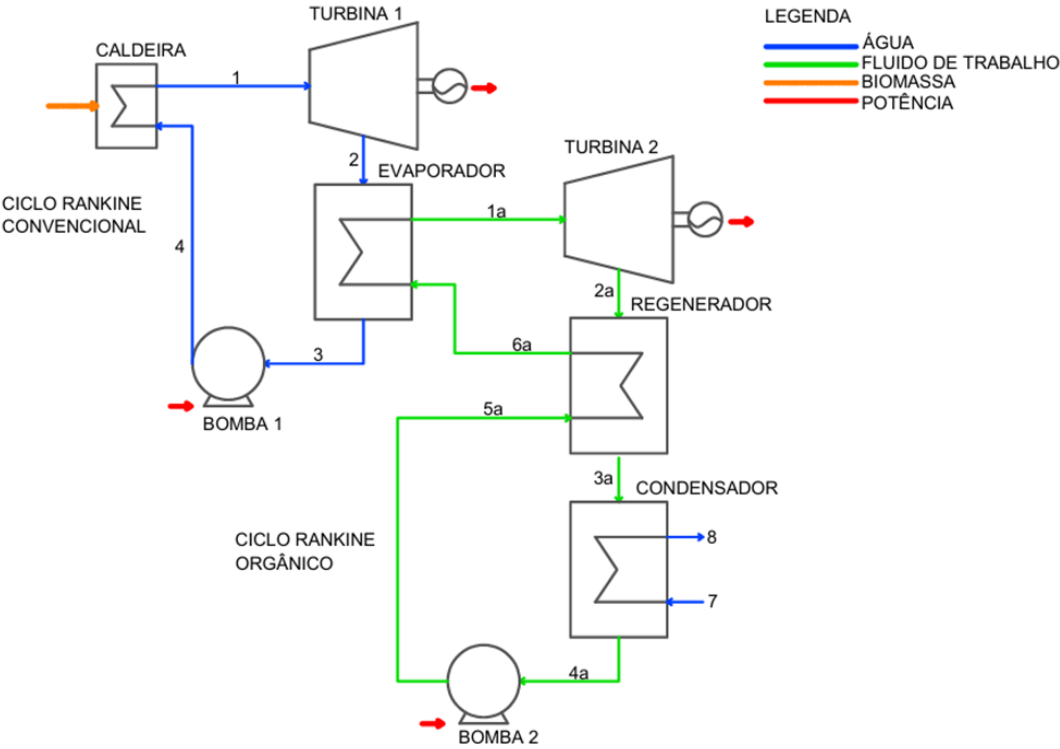
Densidade kg/m3	517	512	550
Disponibilidade	Alta	Alta	Alta
P. Vaporização kPa	123	164,11	15,8
Viscosidade uPa.s	407	202	456
M. molar g/mol	134,1	102	153

Fonte: Teixeira (2014).

3.3 Análise termodinâmica do ciclo

O ciclo termodinâmico utilizado neste trabalho consiste em uma caldeira, duas turbinas, duas bombas, um trocador de calor, um regenerador e um condensador. Para analisar a performance do ciclo Rankine Orgânico foi utilizado o método apresentado nos trabalhos de Lima (2023) e Tchanche *et al.* (2009). Neste método a primeira e segunda leis da termodinâmica são aplicadas a cada componente do ciclo de modo que as quantidades de calor adicionadas e rejeitadas, os trabalhos gerados e consumidos e as eficiências do sistema possam ser encontrados e a escolha do fluido seja analisada. A Figura 2 mostra o modelo do CRO que será analisado.

Figura 2: Ciclo Rankine Orgânico acoplado ao ciclo Rankine Convencional, utilizando a biomassa da casca do coco como fonte de calor primária.



Fonte: Dados da pesquisa (2025).

O sistema é composto por um ciclo Rankine Convencional interligado a um CRO a fim de se obter o aproveitamento do calor removido do ciclo Convencional. As considerações utilizadas para os cálculos foram:

Hipóteses:

$x_1 = 0$ (1)

$p_1 = p_4; p_{1a} = p_{5a} = p_{6a};$ (2)

$$p_2 = p_3; p_{2a} = p_{3a} = p_{4a}; \quad (3)$$

$$s_1 = s_{2s}; s_{1a} = s_{2as}; \quad (4)$$

Continuidade:

$$\Sigma m_{entra} = \Sigma m_{sai} \quad (5)$$

$$Q_{entra} + W_{entra} + m_{entra}h_{entra} = Q_{sai} + W_{sai} + m_{sai}h_{sai} \quad (6)$$

A equação utilizada para a bomba tem o intuito de retornar à potência consumida pela mesma W_{B1} e a elevação de temperatura na saída da bomba, h_2 . Partindo da hipótese de regime permanente, admitindo as variações de energia cinética e potencial, sendo a compressão isentrópica. Temos:

$$W_{B1}n_{B1} = m_a(h_4 - h_3) \quad (7)$$

$$W_{B1} = \frac{v_1}{n_{B1}}(p_4 - p_3) \quad (8)$$

Nesse sentido, W_{B1} representa a quantidade de trabalho consumido pelo motor da bomba durante o processo, o n_{B1} representa a eficiência da bomba, ou seja, as perdas do motor ao transformar a energia elétrica em trabalho mecânico, já o m_a representa a vazão mássica de água.

O regenerador é responsável por pré-aquecer o fluido de trabalho proveniente da bomba 2, o fluido frio ao passar pelo regenerador realiza uma troca térmica com o fluido quente que sai da turbina.

$$(h_{2a} - h_{3a}) = (h_{5a} - h_{6a}) \quad (9)$$

O evaporador tem como função evaporar o fluido de trabalho Orgânico que passa pelo regenerador do CRO através da troca de calor com a água do ciclo Convencional que é super aquecida na caldeira e serve como fonte de alta temperatura. O fluido de trabalho se torna vapor e segue para a turbina 2.

$$Q_E = m_a(h_3 - h_{2a}) \quad (10)$$

$$Q_E = m_{ft}(h_{1a} - h_{6a}) \quad (11)$$

Dessa forma, o m_{ft} representa a massa do fluido de trabalho Orgânico do CRO.

A turbina tem o objetivo de gerar trabalho e a equação utilizada irá fornecer a potência bruta gerada W_T . A pressão de saída da turbina é pré-definida pela queda de pressão no condensador, ou seja, ele não pode ser inferior à pressão ambiente na entrada da bomba.

$$W_T = m_a(h_1 - h_2)n_{mt} \quad (12)$$

W_T é a quantidade de trabalho produzido na turbina ao longo da expansão do fluido de trabalho e n_{mt} é a eficiência da turbina que representa a porcentagem que é desperdiçada de trabalho devido às perdas.

O condensador tem como função realizar a troca térmica e retirar calor do fluido de trabalho.

$$Q_C = m_{ft}(h_{4a} - h_{3a}) \quad (13)$$

O Q_C representa a quantidade de calor que o condensador deverá retirar do fluido Orgânico de trabalho.

A bomba 2 está atrelada à parte do ciclo operando com o fluido térmico, ela conecta o evaporador à caldeira. Sua função é bombear o fluido térmico após trocar calor com o fluido de trabalho no

evaporador para a caldeira, para que assim, ele evapore novamente e seja capaz de prover o calor necessário para o fluido Orgânico de trabalho.

$$W_{B2} = m_{ft} w_{B2} \quad (14)$$

$$W_{B2} = m_{ft} (h_{5a} - h_{4a}) / n_{B2} \quad (15)$$

O w_{B2} é a quantidade de trabalho que é consumido pela bomba durante a troca de pressão do fluido térmico. A eficiência n_{B2} corresponde às perdas do motor da bomba.

A caldeira é a responsável por admitir a biomassa da casca do coco e realizar a queima, resultando na vaporização do fluido térmico.

$$Q_{bio} = m_{bio} * PCI \quad (16)$$

$$m_{bio} = Quantidade [kg] / horas[s] \quad (17)$$

$$Q_{cald} = m_a * (h_1 - h_4) \quad (18)$$

O Q_{bio} representa o calor admitido pela queima da biomassa na caldeira, ou seja, o calor que entra no sistema a partir da fonte de alta temperatura. O m_{bio} representa a massa total de resíduos inserida na caldeira.

Eficiência térmica global:

$$n_{term,global} = \frac{W_{LIQ}}{Q_{CAL}} = 1 - \frac{Q_C}{Q_{CAL}} \quad (19)$$

$$W_{LIQ} = W_T - W_B! \quad (20)$$

A $n_{term,global}$ corresponde à eficiência que considera somente o balanço de energia do ciclo, ou seja, eficiência da primeira lei da termodinâmica.

Às eficiências isentrópicas do sistema, na turbina e nas bombas, são:

$$n_{B1} = \frac{W_{reversivel}}{W_{real}} = \frac{(h_{2reversivel}[h_{2s}] - h_1)}{(h_{2real}[h_2] - h_1)} \quad (21)$$

$$W_{B1} = \frac{v_1(p_2 - p_1)}{n_B} \quad (22)$$

$$n_T = \frac{W_{reversivel}}{W_{real}} = \frac{(h_3 - h_{4real}[h_4])}{(h_3 - h_{4reversivel}[h_{4s}])} \quad (23)$$

$$W_T = n_T (h_3 - h_{4reversivel}[h_{4s}]) \quad (24)$$

Onde: h_{2s} é a entalpia do fluido para uma condição isentrópica na saída da bomba e h_1 é a entalpia do fluido na entrada da bomba, h_{4s} é a entalpia do fluido para uma condição isentrópica na saída da turbina e h_3 é a entalpia do fluido na entrada da turbina.

Eficiência exergética do ciclo:

$$n_{II} = \frac{n_{term,global}}{(1 - (T_{4a}K/T_5K))} = \frac{n_{term,global}}{n_{Carnot}} \quad (25)$$

Ademais, a eficiência de segunda lei (exergética) também pode ser obtida, no ciclo Rankine, pela razão entre a exergia destruída total pela exergia fornecida ao ciclo.

3.4 Metodologia de simulação

Os fluidos inseridos nas equações foram o R245fa, R134a e o R123, todos são fluidos refrigerantes e possuem validação acadêmica. A ferramenta utilizada possui uma biblioteca extensa com os parâmetros termodinâmicos dos fluidos utilizados para a análise.

O poder calorífico inferior foi considerado a partir do estudo de Aguirre (2017) a respeito do beneficiamento da casca do coco verde para fins energéticos e o valor encontrado pelo autor foi de 17.260 kJ/kg. Primeiramente, os estados foram definidos no software a partir dos parâmetros de entrada escolhidos para este trabalho. A Tabela 2 mostra todas as variáveis de entrada para o ciclo Convencional.

Tabela 2: Variáveis de entrada aplicadas à simulação do ciclo no código em MATLAB.

Pressão P3 (Entrada da bomba 1)	150 kPa
Temperatura T1 (Condições climáticas)	30 °C
Pressão P4	4000 kPa
Temperatura T1	400 °C
Eficiência (Bombas e turbinas)	0,75
PCi da biomassa da casca do coco	17000 kJ/kg
Horas de funcionamento	10 horas
Quantidade de biomassa	40.000 ton
Eficiência (Evaporador e regenerador)	0,75
T0	30 °C
TQ	400 °C
ma	18kg/s

Fonte: Cavalcante (2017).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aqui serão apresentados os resultados da simulação realizada no MATLAB para eficiência térmica e exergética do ciclo Rankine Orgânico acoplado ao ciclo Rankine Convencional proposto, bem como a escolha do fluido de trabalho. Com a biomassa já definida e os parâmetros iniciais também, a simulação foi realizada com êxito.

4.1 Análise da simulação do ciclo

A simulação foi realizada com o intuito de selecionar a melhor configuração para o ciclo proposto. Utilizando a casca do coco como biomassa, três fluidos de trabalho foram simulados. Os fluidos de trabalho selecionados na metodologia foram o R245fa, R134a e o R123 para o CRO, já para o Rankine Convencional, o fluido utilizado foi a água.

4.2 Resultados para cada cenário

Os resultados apresentados a seguir foram validados conforme as simulações de Lima (2023), onde os cenários utilizados no respectivo trabalho foram refeitos para servir como base para esta pesquisa, e Possamai (2023), na qual as equações de análise exergéticas utilizadas foram validadas com os resultados do autor. Ademais, todas as análises foram feitas, além do MATLAB, no software EES

para fornecer mais viabilidade aos resultados. Dessa forma, os dados adquiridos são viáveis para serem utilizados como fonte de pesquisa.

Com o funcionamento do ciclo, as bombas consomem trabalho para o seu funcionamento e as turbinas geram trabalho a partir do seu funcionamento. A energia em forma de calor proveniente da caldeira, regenerador e do evaporador, representa a energia admitida ao ciclo. Por fim, o condensador é responsável por remover energia em forma de calor do ciclo. A Tabela 3 demonstra os fluxos energéticos dos componentes.

Tabela 3: Fluxos de energia em forma de trabalho e calor, gerados e consumidos no ciclo.

W/Q (kW)	Cald	B1	T1	Troc	T2	Cond	B2
R245fa	51308	98,34	9382,7	27555	828,72	25799	177,7
R134a	51308	98,34	9382,7	27555	2835,1	21052	111,9
R123	51308	98,34	9382,7	27555	500,12	26603	214,6

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

As exergias destruídas representam a irreversibilidade dos componentes que compõem o ciclo termodinâmico. Irreversibilidades tais como atrito, mistura, reações químicas, transferência de calor com diferença finita de temperaturas, e expansão não resistida sempre geram entropia, e tudo que gera entropia sempre destrói exergia. A exergia destruída é proporcional à entropia gerada (Çengel; Boles, 2013). As exergias destruídas em cada equipamento para cada fluido de trabalho estão organizadas na tabela 4.

Tabela 4: Irreversibilidades encontradas pelo software MATLAB.

Equipamento	Irreversibilidades (kW) – R134a	Irreversibilidades (kW) – R245fa	Irreversibilidades (kW) – R123
Caldeira	10265	10265	10265
Bomba 1	1572	1572	1572
Turbina 1	7400	7400	7400
Regenerador	1042,5	2471,8	4317,7
Turbina 2	2998,9	802,58	4615,4
Condensador	2357,6	622,63	1782,5
Bomba 2	31,69	43,22	49,74
Trocador de calor	5481	7330	7554,6

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Ao observar os valores provenientes de cada equipamento do ciclo, percebe-se que as maiores irreversibilidades são associadas à caldeira, o que evidencia que ela é responsável pela maior parcela de exergia destruída, para verificar o motivo é necessário analisar a estrutura da caldeira. A mesma análise foi realizada nos trabalhos de Lima (2023) e Braz (2022), o que viabiliza os cálculos utilizados e possibilita uma comparação. A variação dos resultados obtidos a partir de Lima (2023) é cerca de 6% dos valores finais de eficiência exergética, apesar de serem biomassas diferentes.

Ao observar os valores das irreversibilidades para cada fluido de trabalho, nota-se que o R134a destruiu mais exergia na turbina 2 e bomba 2, enquanto o R245fa destruiu mais exergia no regenerador e trocador de calor, o que impacta diretamente a eficiência exergética, já o R123 destruiu mais exergia

na turbina 2 e no trocador de calor, seguido do regenerador. A visualização das irreversibilidades possibilita notar o motivo dos fluidos R245fa e R123 terem uma eficiência exergética abaixo do R134a, pois o trocador de calor é o que fornece energia ao CRO, sendo assim, a alta taxa de destruição de exergia neste equipamento, impacta o funcionamento de todo o ciclo Orgânico.

4.3 Eficiência do ciclo

A partir dos dados obtidos da simulação, as eficiências tanto de primeira lei quanto de segunda lei foram calculadas e estão representadas na Tabela 5.

Tabela 5: Eficiências encontradas pelo software MATLAB.

Cenário	η_t	$\eta_x - RC$	η_x	η_c
1 - R245fa	19,36%	33,15%	35,85%	53,49%
2 - R134a	23,4%	33,15%	43%	60,06%
3 - R123	18,65%	33,15%	34,65%	51,20%

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Onde, η_t é a eficiência térmica, η_x é a eficiência exergética, η_c é a eficiência de Carnot e RC é Rankine Convencional, dessa forma é possível visualizar o aumento de eficiência exergética ao adicionar o ciclo Orgânico. Os valores obtidos das eficiências de Carnot mostram se os valores de eficiência térmica são possíveis ou não. O valor da eficiência de Carnot é sempre superior à eficiência térmica real, pois representa uma eficiência de um ciclo completamente reversível. A eficiência exergética pode ser maior ou menor que a eficiência de Carnot por conta de ela ser o resultado da relação entre a eficiência térmica encontrada no ciclo pela eficiência máxima. Dessa forma, constata-se que os valores de eficiência encontrados são realistas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados analisados, constatou-se que os objetivos propostos foram alcançados com êxito a partir da metodologia empregada, na qual foi possível avaliar a biomassa da casca, analisar o aumento de eficiência exergética ao se utilizar o ciclo Rankine Orgânico, as irreversibilidades geradas em cada componente.

De acordo com o estudo, o fluido que apresentou maior eficiência térmica no ciclo foi o R134a, com cerca de 23,4%. Entretanto, como demonstrado por Çengel e Boles (2013), a eficiência de primeira lei não faz referência ao melhor desempenho possível. Dessa forma, pela eficiência de segunda lei, obtivemos que a eficiência do ciclo operando com R134a foi de 43%, o que diz respeito a porcentagem que o ciclo converte do potencial de trabalho disponível em trabalho útil, sendo no ciclo com R245fa apenas 35,85% e com R123 de 34,65%. Neste aspecto, ao comparar os resultados obtidos neste trabalho com os resultados de Lima (2023) e Possamai (2023), é possível validar os resultados como possíveis e reais, o que torna esta metodologia viável para um estudo de ciclo de Rankine Convencional acoplado a ciclo Rankine Orgânico operando com a biomassa de coco. Os resultados aqui apresentados são bem próximos do estudo da biomassa do açaí de Lima (2023), o que prova que a biomassa do coco pode ser uma fonte alternativa viável para a geração de energia. O valor de geração da turbina 1 foi de 9382,7 kW e da turbina 2 de 2835,1 kW, o que corrobora como uma boa fonte energética.

Assim, a biomassa da casca do coco foi definida como um ótimo combustível para ser utilizado em um Ciclo Rankine Convencional acoplado a um ciclo Rankine Orgânico, que adicionou à planta 2.835,1 kW de potência líquida operando com o R134a, sendo 12,21 MW por ano e 1,02 MW por mês. O software MATLAB mostrou-se uma ótima ferramenta juntamente com o EES para a análise deste ciclo, agregando praticidade ao estudo por conta da base de dados rica que a biblioteca utilizada no programa possui, sendo uma ferramenta bem intuitiva e prática. O presente trabalho pode ser utilizado como base para a análise termodinâmica, energética, exergética e termoeconômica de um ciclo Rankine Orgânico real, bem como analisar diferentes biocombustíveis.

5.1 Contribuições e recomendações

O software MATLAB foi de fundamental importância para o presente estudo, o código foi elaborado a partir do trabalho de Lidia (2023) e Cavalcante (2017) e forneceu resultados satisfatórios para o estudo das eficiências térmica e exergética do ciclo. Sendo assim, o trabalho possui o potencial de ser utilizado em modelos reais de usinas deste tipo.

A partir disso, fica aqui algumas recomendações de estudos futuros:

- Estudo termodinâmico de como aumentar as eficiências do ciclo proposto;
- Aplicar uma análise termoeconômica ao ciclo e verificar sua viabilidade voltada para o mercado atual;
- Otimizar o código no MATLAB com a adição de hipóteses que se aproximem de uma operação de ciclo real;
- Apresentar as escolhas e dimensionamentos dos componentes reais para uma possível montagem de uma usina bioenergética.

AGRADECIMENTOS. Esta pesquisa teve o apoio institucional (estrutura física e pessoal) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí-IFPI Campus Teresina Central.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES. **ABS, LRS:** Conceituação; **LRS:** Metodologia, Software, Curadoria de dados, Análise formal, Redação – rascunho original, Visualização, Investigação; **ABS:** Redação – revisão e edição, Aquisição de financiamento, Supervisão. Todos os autores participaram ativamente da discussão dos resultados, revisaram e aprovaram a versão final do artigo.

CONFLITO DE INTERESSE. Os autores declaram que não têm interesse comercial ou associativo que represente um conflito de interesses em relação ao manuscrito.

APROVAÇÃO ÉTICA. Não se aplica.

REFERÊNCIAS

ABREU, 2020. **Ciclo Rankine, cogeração e análise exergética.** Exercícios Resolvidos de Exatas. Carlos Abreu. 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=tmlF5L23RUM>. Acesso em: 07 mar. 2024.

AGUIRRE, C. R. G.; FILHO, P. R. A. M. **Análise prévia e estudo de caso do beneficiamento da casca de coco verde para fins energéticos**. 2017. 49 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal do Espírito Santo. São Mateus, Espírito Santo, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/951>. Acesso em: 07 mar. 2024.

BRAZ, H. C. **Análise termoeconômica em um sistema de cogeração de uma usina sucroenergética norte capixaba**. 2022. 56 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal do Espírito Santo, Campus São Mateus. São Mateus, Espírito Santo, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/2906>. Acesso em: 07 mar. 2024.

CAVALCANTE, L. V. A dinâmica espacial da produção cearense de coco. **GeoTextos**, v. 13, n. 1, p. 123-148. 2017. Doi: 10.9771/1984-5537geo.v13i1.21403. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/geotextos/article/view/21403>. Acesso em: 10 mar. 2024.

CAVALCANTI, I. L. R.; MOURA, I. A. A.; CRUZ, A. D.; SILVA, M. C. D.; LOPES, R. M. B. P. Caracterização química do resíduo da biomassa da algaroba para fins de estudos energéticos. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 872-881, 2020. Doi: 10.34117/bjdv6n1-061. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/5923/5307>. Acesso em: 10 mar. 2024.

CESAR, F. S. **Análise termoeconômica para duas propostas de centrais de cogeração cafeeira, utilizando a casca de café como fonte de energia**. 2021. 79 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal do Espírito Santo, Campus São Mateus, São Mateus, Espírito Santo, 2021. Disponível em: https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/2322/TCC%20Final_Frederico_com%20Ficha%20Catalogr%C3%A1fica.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 10 mar. 2024.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7 ed. 2013, 556–590. Porto Alegre: AMGH, 2013.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Produção de coco no Brasil**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. Disponível em <https://www.embrapa.br/>. Acessado em: 08 mar. 2024.

ELECTRIZ. **Ciclo Rankine Orgânico**. 2024. Disponível em: <https://electriz.com.mx/ciclo-organico-de-rankine/>. Acesso em: 9 de jun. 2025.

FARIA, P. R. **Uma avaliação das Metodologias de Desagregação da Exergia Física para Modelagem Termoeconômica de Sistemas**. 2014. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2014. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/handle/10/1129>. Acesso em: 9 de jun. 2025.

GITEL, M. **Reaproveitamento do coco verde vira negócio na Bahia**. 2018. Disponível em: <https://www.correio24horas.com.br/sustentabilidade/reaproveitamento-do-coco-verde-vira-negocio-na-bahia--0418>. Acesso em: 12 nov. 2024.

LIMA, L. **Configuração de um Ciclo Rankine Orgânico a partir da Biomassa do Açaí na Geração de Energia Elétrica**. 2023. 116 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, 2023. Disponível em: <http://riu.ufam.edu.br/handle/prefix/6880>. Acesso em: 10 de mar. 2024.

PINTO, R. G. D. **Aplicação de ciclos Rankine Orgânicos para geração de eletricidade a partir de**

calor de processo industrial no Brasil. 2018. 354 p. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/12267>. Acesso em: 05 mar. 2024.

POSSAMAI, J. G. **Análise energética e exergética de uma termelétrica operando em ciclo regenerativo com biomassa de casca de arroz.** 2023. 37 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/29904?show=full>. Acesso em: 10 de mar. 2024.

QUOILIN, S.; BROEK, M. V. D.; DECLAYE, S.; DEWALLEF, P.; LEMORT, V. Techno-economic survey of organic rankine cycle (ORC) systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 168-186, 2013. Doi: 10.1016/j.rser.2013.01.028. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113000592?via%3Dihub>. Acesso em: 7 de mar. 2024.

SEMEAR. **Brasil é o 10º país que mais desperdiça alimentos no mundo.** 2023. Disponível em: <https://semarfoodsafetyculture.com.br/#:~:text=J%C3%A1%20no%20consumo%2C%20os%20alimentos,dia%20a%20dia%20das%20fam%C3%ADlias>. Acesso em: 12 nov. 2024.

SIMONE, M. C. **Coco: produção e mercado.** Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2021. (Caderno Setorial Etene, n. 206). Disponível em: <https://www.bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/1043>. Acesso em: 10 de nov. 2024.

TCHANCHE, B. F.; PAPADAKIS, G.; LAMBRINOS, G.; FRANGOUDAKIS, A. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 11-12, p. 2468-2476, 2009. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.12.025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431108004900?via%3Dihub>. Acesso em: 10 de nov. 2024.

TEIXEIRA, H. A. O. **Avaliação de sistemas ORC (Organic Rankine Cycle) para aproveitamento de calor dos gases de escape de um automóvel.** 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Guimarães, Portugal, 2014. Disponível em: <https://hdl.handle.net/1822/41872>. Acesso em: 10 de nov. 2024.

VÉLEZ, F.; SEGOVIA, J. J.; MARTÍN, M. C.; ANTOLÍN, G.; CHEJNE, F.; QUIJANO, A. A technical, economic and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 4175-4189, 2012. Doi: 10.1016/j.rser.2012.03.022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112002055?via%3Dihub>. Acesso em: 9 set. 2024.