

AVALIAÇÃO TEÓRICA DO POTENCIAL DE FONTES RESIDUAIS DE CALOR DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CELULOSE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EM CICLOS DE RANKINE ORGÂNICOS

Cláudia Cristina do Carmo Neves¹; Ricardo da Silva Ferreira Junior^{2,5}; Uilian Gabaldi Yonezawa^{3,5}; Ana Elisa Achilles^{4,5*}

¹ Graduanda em Engenharia Química, Faculdades Integradas de Três Lagoas – FITL/AEMS; ² Graduado em Química Tecnológica, mestre em Química – UFMS, doutor em Química – UFMS; ³ Graduação em Química Licenciatura com Atribuições Tecnológicas, mestre em Ciência dos Materiais – ENESP, doutor em Ciências dos Materiais – UNESP; ⁴ Mestra em Engenharia Química – UFSCar; ⁵ Docente da Instituição Faculdades Integradas de Três Lagoas – FITL/AEMS

*autor correspondente: anaachiles@hotmail.com

RESUMO

A recuperação de energia em processos industriais vem se tornando um tópico extremamente importante devido ao fortalecimento das metas globais de conservação de energia e redução de emissões atmosféricas agravantes do aquecimento global. O presente artigo objetiva analisar, por meio de uma revisão bibliográfica sobre o tema, a recuperação da energia térmica residual em fábricas de celulose, a fim de melhorar a sua eficiência energética e aumentar a produção de energia limpa. Sendo assim, os ciclos de Rankine orgânicos (CRO) consistem em uma das tecnologias promissoras de conversão de calor de baixa temperatura em eletricidade, pois estes podem ser acionados por fontes de baixa e/ou média temperatura com uma eficiência térmica considerável. Entre as principais fontes de calor residual em fábricas de celulose estão os gases quentes gerados nas caldeiras de biomassa e de recuperação, os quais possuem um grande potencial de geração de energia por CROs. Dentre os trabalhos da literatura que investigam a aplicação de CRO em fábricas de celulose, foi avaliado, com maior detalhamento, o estudo promovido na análise da aplicação de três fluidos orgânicos na recuperação de calor dos gases oriundos da caldeira de biomassa, no qual é possível verificar que a aplicação de CRO pode gerar um ganho significativo de potência para a planta.

PALAVRAS-CHAVE: ciclo Rankine orgânico (CRO); recuperação de calor residual; energia; termodinâmica.

1 INTRODUÇÃO

A recuperação de energia em processos industriais vem se tornando um

tópico extremamente importante devido ao fortalecimento das metas globais de conservação de energia e redução de emissões atmosféricas agravantes do

aquecimento global. A fim de se reduzir os impactos energético e ambiental das atividades industriais energointensivas, como o processo de fabricação de celulose e papel, há esforços em explorar meios de aproveitamento energético de forma mais sustentável (SOTOMONTE, 2020). Um desses consiste em minimizar a quantidade de energia útil desperdiçada do processo para o meio e, com isso, melhorar a eficiência energética. Assim, a aplicação dos ciclos de Rankine Orgânicos (CRO) na recuperação de calor residual de processos de baixa/média temperatura para a geração de eletricidade tem sido vista como uma solução promissora (SOTOMONTE, 2020).

O ciclo de Rankine orgânico é uma unidade geradora de potência equivalente ao ciclo Rankine convencional, que utiliza água como fluido de trabalho. Contudo, o CRO aplica um composto orgânico de elevada massa específica em substituição da água e faz o uso da energia térmica residual (PINTO, 2018). Com um aumento de sua aplicação ao longo dos últimos anos, a tecnologia de Ciclos Rankine Orgânicos tem se mostrado como uma solução confiável e econômica para a recuperação de calor em baixas temperaturas (PINTO, 2018). O crescimento do número de projetos e da capacidade instalada de ciclos CRO nos últimos 20 anos é exponencial, com 48% das aplicações corresponde a biomassa, 31% de energia geotérmica, 20% de calor residual e 1% instalação solar (QUOILIN et al., 2009).

Apesar da utilização direta do calor residual industrial significar aumento na eficiência energética, redução de custos e de emissões de poluentes (Pinto, 2018), nem sempre essa tecnologia consiste em uma solução economicamente

viável. Isso ocorre devido à falta de requisitos de calor nas proximidades ou na própria unidade industrial. Logo, uma análise minuciosa do processo é necessária para verificar se é ou não possível implementar essa tecnologia.

Como o Brasil é um dos maiores produtores de celulose do mundo, o presente projeto visa investigar a viabilidade energética da implementação de um ciclo de Rankine em uma fábrica de celulose; pois ainda que existem inúmeros estudos e aplicações dessa tecnologia no mercado, foi verificada uma escassez de estudos, que têm por base o tema em questão, publicados no setor.

1.1 Setor industrial de celulose no Brasil

A indústria de celulose é caracterizada por conter um elevado nível de desenvolvimento tecnológico nas suas instalações industriais, com grande capacidade de produção, uma ampla base de recursos florestais plantados e intenso capital aplicado em tecnologia. Segundo os dados da Tabela 1, o Brasil corresponde ao maior exportador mundial de celulose, sendo responsável por 22,8% da produção total do mundo.

No Brasil, mesmo com a pandemia da Covid-19, a produção de celulose apresentou um crescimento em 2020 de 6,6% em relação a 2019, configurando o setor como um que se organizou rapidamente para atender as demandas do novo formato de consumo dos diversos setores econômicos. Dessa forma, o Brasil é reconhecido pela qualidade e origem sustentável e certificada da sua celulose, e este fato contribuiu para manter a indústria nacional como uma grande referência no mundo (EPE, 2022).

Tabela 1. Ranking dos maiores exportadores mundiais de celulose.

País	Produção (106 t)	% da produção
Brasil	15,6	22,8
Canadá	9,0	13,2
Estados Unidos	7,8	11,5

Fonte: Adaptado de EPE, 2022.

O consumo de eletricidade se configura como um dos mais significativos para diversos setores da economia, principalmente para a indústria de papel e celulose. Este setor possui a vantagem da utilização da lixívia (resíduo líquido proveniente do digestor após o processo de cozimento da madeira) para a auto-produção de eletricidade. Apesar disso, em longo prazo, o fornecimento de energia renovável e a contribuição do setor para a segurança energética nacional devem crescer, uma vez que novas fábricas de celulose estão em construção no Brasil (EPE, 2022).

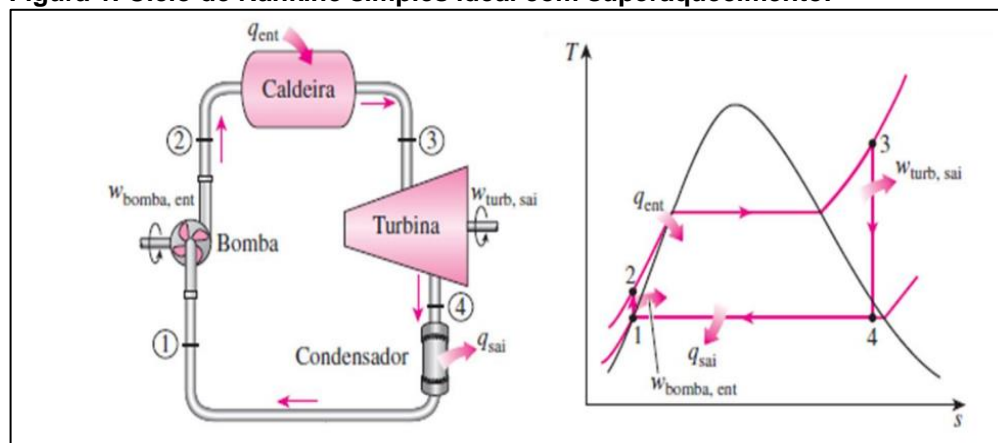
Sendo assim, a necessidade de aumentar a sustentabilidade da matriz energética das fábricas de celulose, aliada à grande demanda de energia por essas plantas, contribuem com a busca por novos meios de aproveitamento energético a fim de melhorar a eficiência energética dos processos existentes de conversão de energia, o qual inclui o emprego de sistemas energéticos (ciclos

termodinâmicos) mais efetivos.

1.2 Termodinâmica e ciclos de potência

Um dos objetivos da termodinâmica é estudar as interações energéticas de um dado sistema com as vizinhanças. A primeira lei da termodinâmica estabelece que a energia é transferida de uma forma para outra (calor; trabalho; energias cinéticas, potencial e interna), mas sempre a soma de todas estas permanecem constante durante todo o processo, ou seja, a energia não é destruída. No entanto, a segunda lei da termodinâmica impõe limitações a todos os processos de transformação energética (SOTOMONTE, 2009), sendo o princípio responsável pelo entendimento da degradação da energia nos sistemas térmicos, pois uma parte do fluxo energético acaba por converter-se em calor à temperatura ambiente e deixa de ser aproveitável.

Figura 1. Ciclo de Rankine simples ideal com superaquecimento.



Fonte: Extraído de Çengel e Boles, 2013.

A produção de energia elétrica é feita por meio de uma unidade de geração de potência. Uma das formas de se gerar potência consiste em fazer o uso de ciclos termodinâmicos, os quais transformam, continuamente, calor em trabalho (GASPAR, 2002).

Fundamentalmente, os ciclos termodinâmicos de potência constituem-se

de um processo de conversão de energia térmica em trabalho útil, através da transferência de calor de meio de alta temperatura para o meio de baixa temperatura (WENZEL, 2015), tal como ocorre em ciclos de Rankine.

Segundo Çengel (2013), o ciclo de Rankine ideal não envolve nenhuma irreversibilidade interna e consiste nos

quatro processos seguintes: 1-2: compressão isentrópica em uma bomba; 2-3: fornecimento de calor a pressão constante em uma caldeira; 3-4: expansão isentrópica em uma turbina; 4-1: rejeição de calor a pressão constante em um condensador.

A Figura 1 demonstra o esquema de um ciclo de Rankine ideal com superaquecimento do vapor d'água na caldeira, o que viabiliza a correção das limitações práticas encontradas no ciclo de Carnot.

O fluido de trabalho (água), ao entrar na bomba (estado 1), sofre uma compressão isentrópica até a pressão de operação da caldeira (estado 2). Em virtude da redução do volume específico da água, sua temperatura sofre uma ligeira elevação. Logo após, o líquido comprimido que sai da bomba adentra a caldeira, onde recebe calor oriundo de combustível, de reações nucleares, ou de outras fontes térmicas. O fluido de trabalho recebe este calor a uma pressão constante, deixando a caldeira como vapor superaquecido (estado 3). No diagrama T-s (representação gráfica de processos termodinâmicos que apresenta a temperatura em função da entropia do sistema), também ilustrado na Figura 1, o calor transferido para a água corresponde à área sob a curva do processo 2-3. Em seguida, o vapor superaquecido chega à turbina, onde sofre uma expansão isentrópica, produzindo trabalho, movendo um eixo que se encontra conectado a um gerador elétrico. Nessa etapa do processo, temperatura e pressão sofrem uma redução (estado 4). Ao entrar no condensador, o vapor se encontra como mistura água e vapor, com título de alto valor. A condensação ocorre sob pressão constante, devido à transferência de calor para um reservatório a baixa temperatura (FUMES, 2020).

Compreende-se que os processos básicos do ciclo de Rankine ideal são baseados na suposição de que todos os

processos são reversíveis e com algumas hipóteses, como, perda por calor entre os componentes e o meio ambiente é desprezada; efeitos da energia cinética e potencial são ignorados; cada componente opera em regime permanente e volume de controle; todos os processos são internamente reversíveis e não existe perda de pressão nos componentes (condensador, tubulações, bomba, entre outros) (FERRARINI, 2013).

1.3 Ciclo de Rankine orgânico

Lecompte et al. (2015) definem o ciclo Rankine orgânico como um modelo muito similar ao ciclo de Rankine convencional, cuja diferença básica remete ao fluido de trabalho utilizado. Neste modelo, ocorre a substituição do fluido usual (água) por um fluido orgânico que, cuidadosamente selecionado, permite ao sistema a conversão de energia térmica em eletricidade a partir de baixas temperaturas.

Angelino e Moroni (1973) detalharam a possibilidade de utilização de fluidos orgânicos em ciclos de potência (Rankine) para produção de eletricidade como uma alternativa aos ciclos a vapor por meio de uma análise comparativa. O estudo evidenciou que quando determinados fluidos orgânicos eram utilizados no lugar do vapor, a eficiência do ciclo de potência era superior para casos nos quais a fonte de calor possuía temperaturas mais baixas.

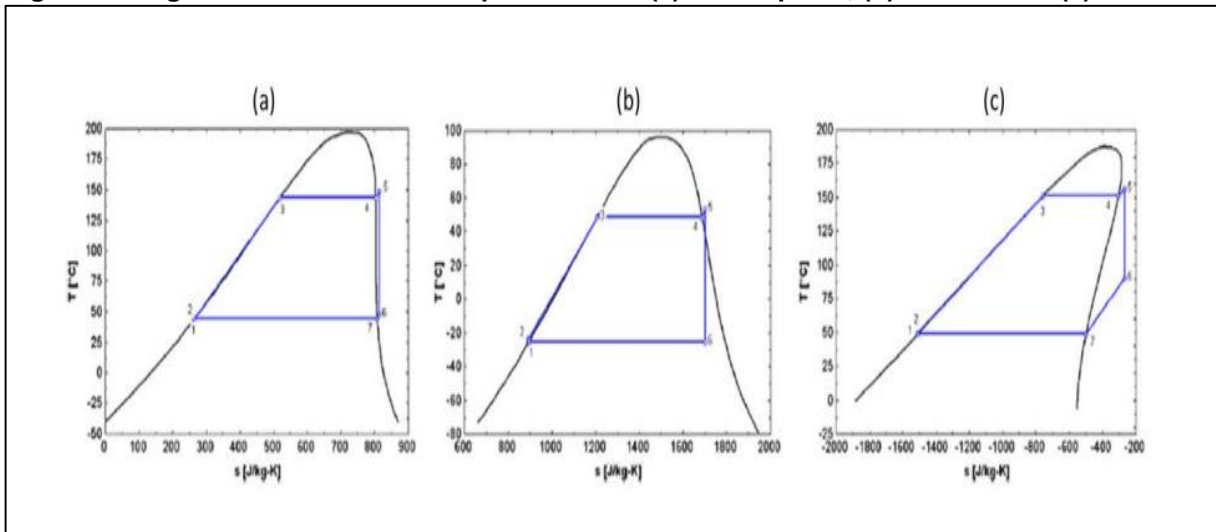
Equipamentos sob o regime CRO operam de forma semelhante a um ciclo de Rankine a vapor d'água; porém, utiliza fluidos orgânicos de alta massa molecular que possuem ponto de ebulição menor que o da água. De acordo com Vankeirsbilck et al. (2011), isso representa a possibilidade de aproveitamento térmico de fontes de temperaturas mais baixas.

Quoilin et al. (2013) classificam os fluidos orgânicos em três categorias básicas: isentrópicos, molhados e secos.

Segundo os autores, tal classificação é baseada na forma da linha de saturação de vapor do diagrama T-s de cada fluido. Curvas de saturação que tendem ao infinito representam fluidos isentrópicos. Este tipo de fluido tem seu diagrama T-s representado na Figura 2(a). Já as curvas de saturação de vapor com direção negativa são características de fluidos molhados, tendo em vista que, após a

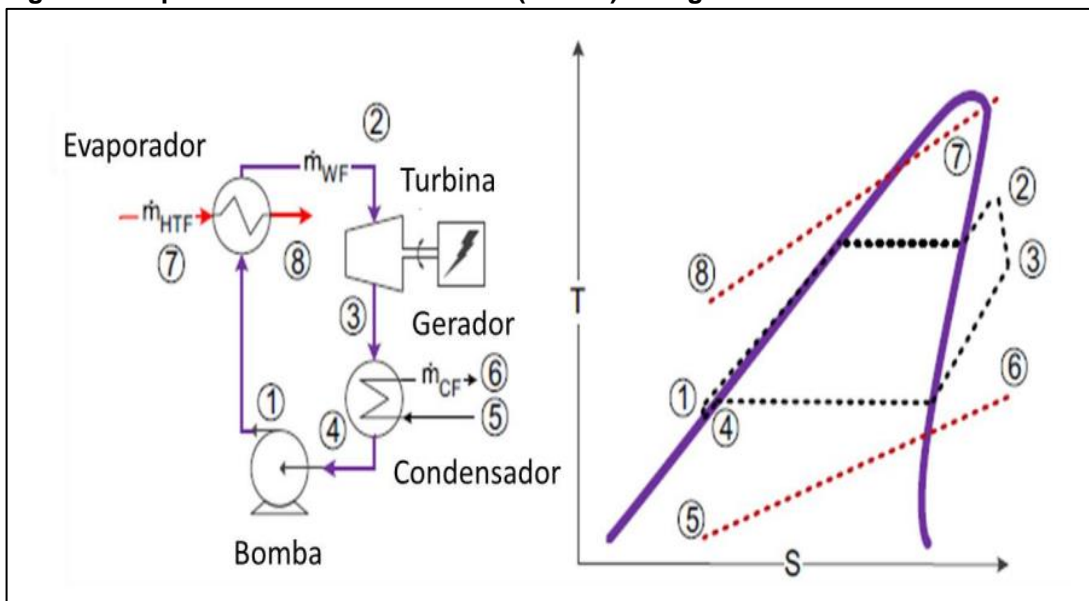
expansão na turbina, o fluido se encontra em um estado de líquido-vapor. Estes casos estão exemplificados pela Figura 2(b). Por fim, curvas de saturação de vapor positivas denotam fluidos secos, considerando que, após o processo de expansão, o fluido se encontra em um estado de vapor superaquecido. Os fluidos secos são representados pela curva ilustrada na Figura 2(c).

Figura 2. Diagrama T-s característico para fluidos: (a) isentrópicos, (b) molhados e (c) secos.



Fonte: Extraído da Quoilin et al., 2013.

Figura 3. Arquitetura básica de um CRO (básico) e diagrama T-s.



Fonte: Adaptado de Lecompte et al., 2015.

Na Figura 3 é possível verificar o esquema básico de um CRO. A bomba fornece fluido de trabalho ao evaporador

(caldeira), que promove a mudança de fase a uma pressão aproximadamente constante. Este aquecimento é realizado

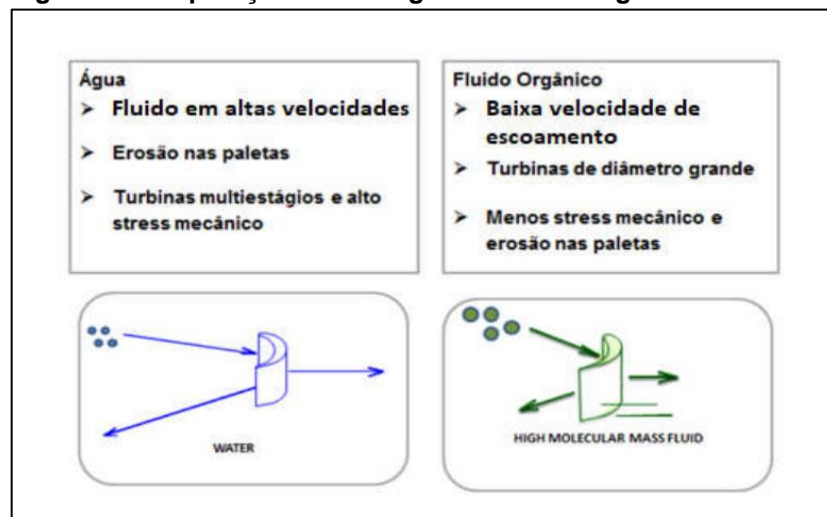
a partir da transferência de calor produzida por uma fonte externa ao sistema. Em seguida, o fluido de trabalho saturado ou superaquecido passa pela turbina, sofrendo um processo de expansão produzindo potência. Neste instante, a turbina, que está conectada a um gerador, promove a geração de energia elétrica, enquanto o fluido de trabalho no estado de vapor a baixa pressão e temperatura (saída da turbina) é conduzido a um trocador de calor (condensador) para retornar ao seu estado inicial. Ao passar pela bomba de alimentação, a

pressão do fluido é elevada novamente para o início de um novo ciclo (JAVANS-HIR; SARUNAC, 2013).

A utilização de um regenerador que recupera parte do calor da saída do expensor para pré-aquecer o fluido orgânico antes da evaporação também pode ser adotada para aumentar a eficiência termodinâmica do ciclo (DECLAYE, 2009).

A Figura 4 demonstra uma comparação entre o emprego da água e de fluidos orgânicos em ciclos de Rankine.

Figura 4. Comparação entre a água e o fluido orgânico.



Fonte: Extraído de Pinto, 2018.

O ciclo de Rankine orgânico apresenta algumas vantagens em relação ao convencional, tais como (i) curva de saturação características; (ii) expansão seca de vapor; (iii) reduz necessidade de superaquecimento; (iv) emprego de pressões e temperaturas moderadas; (v) pequeno salto entálpico, o que reduz a quantidade de energia requerida e (vi) redução de perdas.

O CRO é uma escolha usual em tecnologias de recuperação de calor residual, no qual possui dois tipos de energia térmica de baixa qualidade não aproveitada: o calor de baixa/média temperatura na forma de gases de combustão e de condensados.

1.3.1 Aplicações de ciclo de Rankine orgânico na indústria de celulose

O processo de celulose, por ser um processo químico complexo que demanda um grande montante de energia, possui diversas oportunidades de recuperação de calor residual por ciclos de Rankine orgânico. Dessa maneira, alguns trabalhos científicos visaram estudar o potencial da utilização do calor residual dessas plantas por CRO, os quais incluem Souza Filho; Higa (2018), Francis (2014) e Crus (2011).

O autor Souza Filho; Higa (2018) investigou a aplicação de um CRO em uma caldeira de biomassa de uma indústria de papel e celulose. Para tal, o autor selecionou três fluidos de trabalho

(R245fa, R600 e tolueno) em três arranjos distintos de integração do CRO com a saída do gerador a vapor. Além disso, variou-se a temperatura de fornecimento de vapor ao CRO e comparou os resultados também empregando a água como fluido de trabalho. Os resultados demonstraram que a potência gerada para a planta foi da ordem de 500 a 810 kW, dependendo do fluido empregado. Além disso, aplicando o fluido que gerou mais potência foi o tolueno. No entanto, a potência gerada pelo mesmo foi menor que a gerada pela água.

Francis (2014) promoveu uma discussão sobre como fontes térmicas de energias não utilizáveis podem ser recuperadas em plantas de papel e celulose com o intuito de melhorar a sua eficiência energética e aumentar a sua geração de energia limpa. Analisando as formas de recuperar o calor residual das unidades, o autor destaca a o calor dos gases gerados na combustão das caldeiras de biomassa e de recuperação; e o calor das unidades de condensação. Para calcular o montante de energia capaz de ser gerado por esses processos, o autor faz o uso de um CRO usando o R134a como fluido de trabalho, gerando 2 MW de eletricidade, aproximadamente 16 milhões de energia em kWh anualmente. Além disso, o incremento do CRO na planta reduziu em até 2% de combustível na caldeira e 1% de emissão de CO₂.

E por fim, os autores Cruz, et al. (2021) apresentaram uma metodologia para estimar o potencial técnico viável para geração de eletricidade a partir de excesso de calor industrial de baixa e média temperatura usando a tecnologia CRO. A metodologia é baseada em uma análise de oportunidades de integração de calor em fábricas de papel e celulose Kraft individuais, nas quais a disponibilidade de excesso de calor para determinados locais foi estimada usando perfis detalhados de temperatura. Com base em tal abordagem, o trabalho determinou os potenciais de geração de

eletricidade a partir de excesso de calor de temperatura média, encontrando um potencial técnico para aumentar a produção de eletricidade na indústria em 8 a 11%. As estimativas foram realizadas para diferentes níveis de temperatura, apresentando, detalhadamente, os potenciais de recuperação de calor em excesso. O autor frisa que essa metodologia pode ser adaptada para outros setores a fim de orientar, estrategicamente, a recuperação e aproveitamento do excesso de calor em diferentes processos industriais. Trabalhos futuros também podem se basear nessa metodologia para incluir aspectos econômicos e em termos de emissões de gases poluente para obter, além dos ganhos energéticos, potenciais econômicos e ambientais.

2 OBJETIVOS

O presente artigo tem como objetivo investigar o potencial energético das fontes de calor residuais presentes no processo de fabricação da polpa celulósica para a geração de energia por meio da aplicação de ciclos de Rankine orgânicos.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A recuperação de calor residual de baixa/média temperatura para a geração de eletricidade por meio do emprego de ciclos de Rankine orgânico é uma solução promissora para melhorar a eficiência energética de processos, e torná-los mais sustentável em termos de energia. Neste contexto, foi verificada uma oportunidade no setor industrial de fabricação de celulose, dada a sua importância no cenário econômico brasileiro e a sua forte demanda energética.

Sendo assim, este artigo, primeiramente, realizou uma revisão bibliográfica sobre o setor industrial da celulose no Brasil, seguida de um maior detalhamento sobre ciclos termodinâmicos de

potência, sobretudo o ciclo de Rankine orgânico.

Além disso, para demonstrar que ciclos de Rankine constituem uma tecnologia promissora em processos de fabricação de celulose, foram demonstrados três trabalhos da literatura científica que aplicaram CRO neste setor, juntamente com os resultados alcançados.

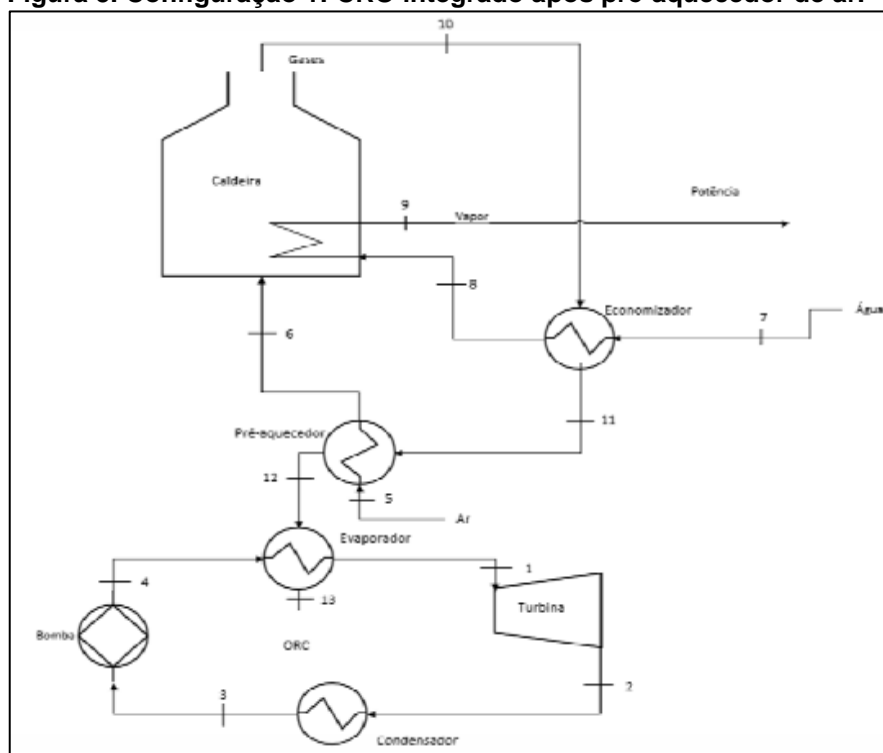
Uma vez que a literatura científica sobre a aplicação de CROs em fábricas de celulose é escassa; portanto, como última etapa, foi reproduzido, como um estudo de caso, o trabalho realizado por Souza Filho; Higa (2018), intitulado “Aplicação de ciclo rankine orgânico para aproveitamento de calor residual numa caldeira de biomassa de uma indústria de papel e celulose”.

4 ESTUDO DE CASO: Aplicação de ciclo Rankine orgânico para aproveitamento de calor residual numa caldeira de biomassa de uma indústria de papel e celulose

O estudo de Souza Filho; Higa (2018), como previamente detalhado, promoveu uma investigação da aplicação da tecnologia CRO em uma caldeira de biomassa de uma indústria de papel e celulose, a fim de gerar potência elétrica.

Como metodologia, o autor selecionou três fluidos de trabalho (R245fa, R600 e tolueno), seguindo os parâmetros recomendados por Quolin et al. (2013). O CRO foi rearranjado em três formas distintas de integração do CRO com a saída do gerador a vapor para verificar a melhor opção de configuração de trabalho.

Figura 5. Configuração 1: CRO integrado após pré-aquecedor de ar.



Fonte: Extraído Souza Filho; Higa, 2018.

4.1 Procedimento experimental segundo Souza Filho e Higa

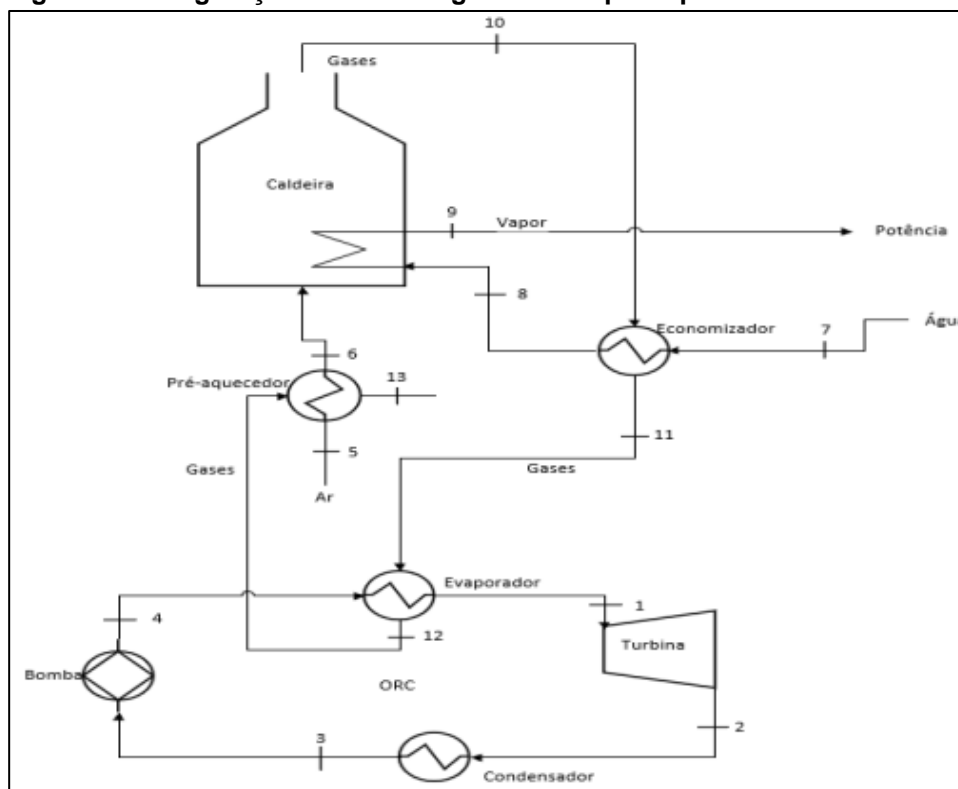
As diferentes configurações propostas variaram de acordo com a

disposição dos componentes. O primeiro CRO utilizava os gases residuais após o seu uso no pré-aquecedor de ar a 168 °C, tal como ilustrado pela Figura 5. Já

na segunda configuração (Figura 6), o CRO utilizava os gases após a sua utilização no economizador a 230°C, antes do pré-aquecedor de ar. Na configuração 3, o CRO era integrado após a saída da caldeira a 458 °C, antes do pré-

aquecedor de ar, enquanto a condensação do fluido orgânico a 232 °C fornecia calor para o economizador no pré-aquecimento da água. Este último esquema pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 6. Configuração 2: CRO integrado entre pré-aquecedor e economizador.



Fonte: Extraído Souza Filho; Higa ,2018.

A avaliação dos sistemas foi realizada fazendo-se o uso das eficiências termodinâmicas definidas pelas primeira e segunda leis da termodinâmica para volumes de controle. Para a utilização dos gases de combustão, os cálculos levaram em conta que o gerador de vapor produzia 37,5 kg/s de vapor saturado a 6300 kPa.

4.2 Resultados da aplicação de ciclo Rankine orgânico para aproveitamento de calor residual numa caldeira de biomassa de uma indústria de papel e celulose

Os principais resultados alcançados do estudo foram: não houve diferença significativa na geração de

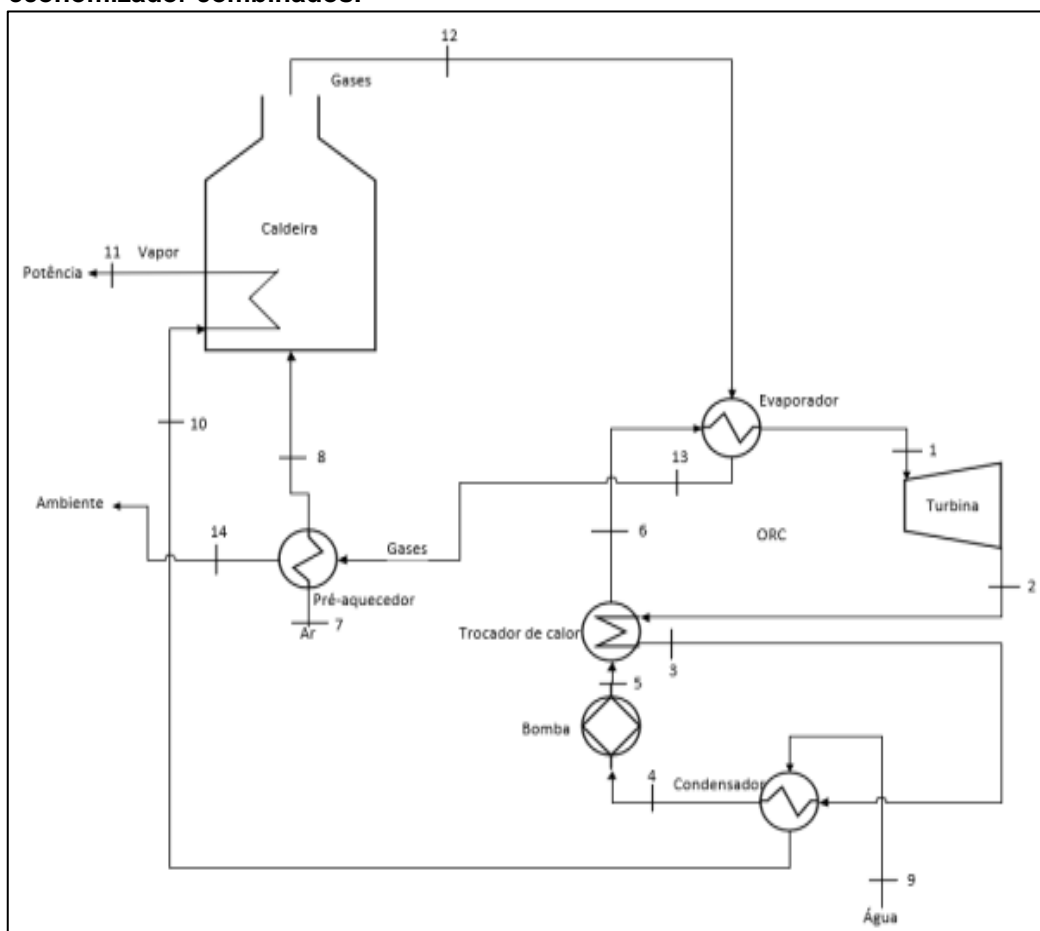
potência entre os fluidos R245fa e R600 na primeira e segunda configurações. Desta forma, é vantajoso utilizar o R245fa que não é inflamável em vez do R600, inflamável; apesar da vazão mássica do R245fa ter sido maior que a do R600. Quanto a geração de potência, a configuração 2 gerou mais potência que a 1 em virtude de apresentar uma temperatura de evaporação mais elevada. Sendo assim, a configuração 3 foi a que mais gerou potência, justificado pela sua temperatura de evaporação ser ainda mais alta. No entanto, o tolueno, que foi empregado na Configuração 3, é inflamável e a vazão mássica requerida foi a maior obtida.

Como a configuração 3 utilizava

gases de combustão a 458 °C, podia-se aquecer o fluido de trabalho do ciclo de potência a temperaturas na ordem de 300 °C, o que viabilizava a aplicação da água. Neste caso, a potência gerada com a água foi superior ao arranjo com o tolueno. Além disso, quando se empregou água em vez de tolueno, vazão

mássica requerida pelo ciclo foi inferior e as eficiências energética e exergéticas alcançadas foram superiores. Com isso, além da menor vazão mássica, a água não apresenta os riscos à segurança como o tolueno; logo, a sua utilização no ciclo foi mais vantajosa.

Figura 7. Configuração 3: CRO integrado após saída da caldeira e condensador-economizador combinados.



Fonte: Extraído Souza Filho; Higa, 2018.

4.3 Considerações finais de Souza Filho e Higa

A partir dos resultados, foi possível concluir que o fluido orgânico R245fa se mostrou uma ótima opção como fluido de trabalho quando se leva em conta segurança e fatores ambientais. Tal fluido conseguiu gerar potências na ordem de 500 kW. O tolueno foi capaz de gerar uma maior quantidade de potência (810 kW); todavia, deve-se levar em conta a sua periculosidade e o seu impacto ao

meio ambiente. Constatou-se também que, embora CROs sejam alternativas interessantes na recuperação de calor residual, deve-se estudar outras possibilidades na configuração do sistema, o que pode viabilizar a aplicação de um ciclo Rankine convencional, tal como ocorreu na Configuração 3, que gerou mais potência e foi mais eficiente ao empregar água como fluido de trabalho.

5 CONCLUSÃO

A aplicação de ciclos Rankine orgânicos, capazes de operar com eficiências consideráveis, são alternativas viáveis na recuperação de calor de fontes de temperaturas baixas, constituindo de uma solução interessante para o aproveitamento do potencial térmico de menor qualidade, principalmente, no ramo da indústria de celulose.

Da revisão bibliográfica concluiu-se que das diferentes variáveis do ciclo CRO, a seleção do fluido de trabalho e os parâmetros de operação são os aspectos mais importantes a serem pesquisados.

Com base nos resultados do trabalho desenvolvido por Souza Filho; Higa (2018), é evidente que nenhum fluido de trabalho pode ser sinalizado como ótimo para determinada aplicação do ciclo CRO. A seleção da tecnologia correta para a conversão de calor irá demandar analisar mais estudos criterioso visando o incremento dos ganhos da oportunidade.

REFERÊNCIAS

ANGELINO, G.; MORONI, V. Perspectives for Waste Heat Recovery by Means of Organic Fluid Cycles, v. 95, n. 2, p. 75-83, abr. 1973.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. 2013. Termodinâmica. 7ª edição, São Paulo, Editora McGraw-Hill. 2013.

CRUZ, I. et al. Electricity Generation from Low and Medium Temperature Industrial Excess Heat in the Kraft Pulp and Paper Industry. *Energies*, v. 14, n. 24, p. 84-99, dez. 2021.

DECLAYE, S. Design, optimization and modeling of an organic Rankine cycle for waste heat recovery. 92 l. Thesis (ElectroMechanical Engineer) - Mechanical Engineering Department. University of

Liège. 2009.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. A Indústria de Papel e Celulose no Brasil e no Mundo. Disponível em: <epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicação650/Pulp%20and%20paper_EPE+IEA_Português_2022_01_25_IBA.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2022.

FERRARINI, R. S. Avaliação termodinâmica preliminar da influência do vácuo do condensador no desempenho de uma central de cogeração típica da indústria siderúrgica. 2013. 68f. Projeto de Graduação-TCC – Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2013.

FRANCIS, A. C.; CHUNGPAIBULPATANA, S. Waste heat recovery for power generation using organic rankine cycle in a pulp and paper mill. In: 2014 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE). IEEE, p. 1-6. 2014. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6828895>>. Acesso em: 9 jun. 2022.

FUMES, D. R. Um Modelo Termodinâmico Para Análise e Seleção de um Fluido de Trabalho Para Um Ciclo Rankine Orgânico com um Aquecedor de Fluido de Alimentação Aberto. 152 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Bauru. 2020.

GASPAR, A. Física. 2ª Edição. Editora: Ática, São Paulo, 2002.

JAVANSHIR, A.; SARUNAC, N. Jan. 2017. Thermodynamic analysis of a simple Organic Rankine Cycle. *Energy*, vol. 118, p. 85-96, jan. 2017.

LECOMPTE, S. et al. Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for

waste heat recovery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 47, p. 448-461, jun. 2015.

PINTO, R. G. D. Aplicação de ciclos rankine orgânicos para geração de eletricidade a partir de calor de processo industrial no brasil. 354 f. Tese (Doutor em Planejamento Energetico) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2018.

QUOILIN, S. et al. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 22, p. 168-186, jun. 2013.

SOTOMONTE, C. A. R. Otimização Multiobjetivo para a seleção de fluidos de trabalho e parâmetros de projeto no ciclo rankine orgânico. 132 f. Tese (Doutor em Ciência em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2015.

SOUZA FILHO, H. A.; HIGA, M. Aplicação de ciclo Rankine orgânico para aproveitamento de calor residual numa caldeira de biomassa de uma indústria de

papel e celulose, 27º Encontro Anual de Iniciação Científica. p. 1-7. out. 2018. Disponível em: <<http://www.eaic.uem.br/eaic2018/anais/artigos/2860.pdf>>. Acesso em: 7 Jun. 2022.

VANKEIRSBILCK, I. et al. Organic Rankine cycle as efficient alternative to steam cycle for small scale power generation. 8 th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics - HEFAT, p. 1-8, jul. 2011. Disponível em: <https://repository.up.ac.za/bitstream/handle/2263/41796/Vankeirsbilck_Organic_2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 7 jun. 2022.

WALKER, J.; RESNICK, R.; HALLIDAY, D. Halliday and resnick fundamentals of physics. 10º Ed. Publishing Company: Wiley. 2014.

WENZEL, T. A. Análise termodinâmica e simulação de um Ciclo Rankine Orgânico (ORC). 21 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2015.