

ANÁLISE ENERGÉTICA DE DOIS GERADORES DE VAPOR DE UMA PLANTA DE PRODUÇÃO DE CELULOSE

Emerson Zeferino de Paiva¹, Ramon E. Pereira Silva²

¹Programa de Pós Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Brasil (emersonzpaiva@gmail.com)

²Programa de Pós Graduação em Eficiência Energética e Sustentabilidade, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, Brasil

Resumo: Este trabalho avaliou o desempenho energético de dois geradores de vapor de uma planta de celulose, via balanços de massa e energia. Os resultados indicaram que o licor negro representa 89,6% da energia de entrada. Das caldeiras, a de recuperação atingiu eficiência de 62,7% (68,8% com reações químicas); de biomassa, 80,1%. Concluiu-se que a integração energética otimiza o sistema, reduz o consumo de combustíveis externos e fortalece a sustentabilidade do processo.

Palavras-chave: Cogeração; Eficiência energética; Caldeira de biomassa; Indústria de celulose.

INTRODUÇÃO

A indústria de papel e celulose destaca-se como um dos segmentos industriais de maior relevância econômica e estratégica, apresentando elevada participação nas exportações brasileiras e contribuindo significativamente para a geração de empregos e para o desenvolvimento sustentável. Em função da elevada demanda por vapor e energia elétrica, o setor caracteriza-se também como um dos maiores consumidores de energia da indústria de transformação, tornando a eficiência energética um fator determinante para sua competitividade e sustentabilidade (IBÁ, 2021; KONG et al., 2020).

Nesse contexto, os sistemas de cogeração assumem papel fundamental ao possibilitar a produção simultânea de energia térmica e elétrica a partir de uma mesma fonte primária, aumentando o aproveitamento energético do combustível e reduzindo perdas associadas aos processos convencionais de geração. Na indústria de celulose, essa configuração é baseada principalmente na utilização do licor negro, subproduto do processo Kraft que, além de permitir a recuperação de produtos químicos, constitui a principal fonte de energia para geração de vapor e eletricidade (CASTRO, 2009; FERREIRA, 2013).

Diversos estudos demonstram que o desempenho desses sistemas pode ser avaliado por meio dos balanços de energia e exergia. A análise energética quantifica os fluxos de energia envolvidos no processo. Dessa forma, a aplicação dessa metodologia fornece informações mais completas para a otimização dos processos industriais e para o aumento

da eficiência global da cogeração (HUBBE, 2021; SAARI et al., 2021).

Nos últimos anos, a expansão do setor de celulose no estado de Mato Grosso do Sul consolidou a região como um dos principais polos produtores do país, impulsionada por investimentos em plantas industriais de grande porte projetadas com elevado grau de automação e eficiência energética. Apesar desse avanço, ainda são escassos os estudos que apresentam avaliações integradas do desempenho energético e exergético utilizando dados reais de operação dessas unidades industriais, limitando a identificação de oportunidades práticas de melhoria e a comparação com valores reportados na literatura.

Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho energético e exergético do sistema de cogeração de uma planta moderna de produção de celulose localizada em Ribas do Rio Pardo (MS), por meio da aplicação de balanços de massa, energia e exergia em condições reais de operação, identificando os principais fluxos energéticos, as irreversibilidades do processo e oportunidades para o aumento da eficiência operacional e do aproveitamento energético do sistema.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem quantitativa e natureza descritiva, desenvolvida com o objetivo de avaliar o desempenho energético do sistema de cogeração de uma planta industrial de produção de celulose. O sistema analisado é composto por uma caldeira de recuperação química, uma caldeira de biomassa e três

turbogeradores responsáveis pelo fornecimento simultâneo de vapor de processo e energia elétrica.

Os dados operacionais foram obtidos a partir do sistema de controle distribuído (DCS) da unidade industrial, contemplando as principais correntes do processo por meio das variáveis de pressão, temperatura e vazão mássica. Com base nessas informações, foram determinadas as propriedades termodinâmicas de interesse, incluindo entalpia, entropia e exergia específica, utilizando o software CATT3, amplamente empregado em análises de sistemas de vapor industriais.

Para a avaliação do desempenho do sistema, foram aplicados balanços de massa e energia em regime permanente, considerando volumes de controle independentes para a caldeira de recuperação e os turbogeradores. Foram desprezadas as variações de energia cinética e potencial, assumindo-se condições operacionais estáveis durante o período de coleta dos dados. A eficiência energética foi determinada a partir da relação entre a energia útil transferida ao vapor e a energia fornecida pelo combustível. Os resultados obtidos foram analisados por meio da quantificação dos fluxos energéticos, permitindo identificar os principais pontos de destruição de exergia e as oportunidades de melhoria do desempenho operacional do sistema de cogeração. Os indicadores calculados foram comparados com valores reportados na literatura para plantas modernas de produção de celulose, possibilitando avaliar o nível de eficiência da unidade estudada e discutir alternativas para otimização do aproveitamento energético.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização do sistema de cogeração

A planta industrial (Figura 1) possui um sistema de cogeração composto por uma caldeira de recuperação química, uma caldeira de biomassa e três turbogeradores operando de forma integrada para suprimento simultâneo de vapor de processo e energia elétrica. Essa configuração possibilita elevado aproveitamento energético do combustível, reduzindo a dependência de fontes externas de energia e aumentando a eficiência operacional da unidade.

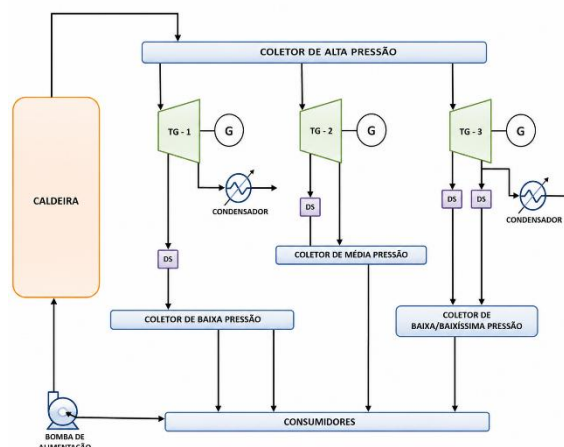


Figura 1. Fluxograma simplificado do sistema de cogeração da planta de produção de celulose. Fonte: O autor.

A caldeira de recuperação desempenha papel central nesse sistema, sendo responsável pela geração de vapor a partir da queima do licor negro, principal subproduto energético do processo Kraft. O vapor produzido é distribuído aos turbogeradores, onde sua energia térmica é convertida em energia mecânica e posteriormente em energia elétrica, enquanto o vapor extraído em diferentes níveis de pressão é utilizado nas diversas etapas do processo produtivo.

A caldeira de biomassa desempenha um papel estratégico na geração complementar de vapor da planta, utilizando como combustível resíduos florestais, principalmente cavacos de eucalipto. O vapor gerado é empregado para suprir as necessidades térmicas do processo produtivo e, em condições operacionais específicas, pode contribuir para a geração de energia elétrica por meio dos turbogeradores. Dessa forma, a caldeira de biomassa aumenta a flexibilidade operacional do sistema de cogeração, complementa a produção de vapor da caldeira de recuperação e promove o aproveitamento energético de uma fonte renovável, contribuindo para a eficiência global e para a redução dos impactos ambientais da indústria de celulose.

Esse arranjo operacional permite o aproveitamento simultâneo da energia térmica e elétrica, característica fundamental dos sistemas de cogeração modernos e um dos principais fatores responsáveis pela elevada eficiência energética observada na indústria de celulose.

Avaliação energética do sistema

Para quantificar a energia transferida pela caldeira de recuperação foi aplicado o balanço energético apresentado na Equação (1), considerando as principais correntes de entrada e saída do sistema em regime permanente. Essa abordagem permite determinar a energia útil disponibilizada ao processo

a partir das propriedades termodinâmicas das correntes de trabalho.

$$Q_c = \sum(m_s h_s) - \sum(m_e h_e) \quad (1)$$

Sendo:

Q_c = taxa de transferência de energia da caldeira (kW);

m_s = vazão mássica na saída da caldeira (kg/s);

m_e = vazão mássica na entrada da caldeira (kg/s);

h_s = entalpia específica do vapor na saída da caldeira (kJ/kg);

h_e = entalpia específica da água de alimentação na entrada da caldeira (kJ/kg).

A aplicação do balanço energético permitiu quantificar os fluxos de energia envolvidos no sistema de cogeração e avaliar o desempenho da caldeira de recuperação em condições reais de operação. Os cálculos foram realizados considerando regime permanente, desprezando-se as variações de energia cinética e potencial, hipótese amplamente adotada em análises termodinâmicas de sistemas industriais.

Os resultados evidenciaram que o licor negro representa aproximadamente 89,6% da energia total fornecida ao sistema, confirmando sua importância como principal combustível da planta e demonstrando a elevada capacidade de recuperação energética característica do processo Kraft.

As principais propriedades termodinâmicas utilizadas na avaliação do sistema são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades termodinâmicas das correntes analisadas. Autor, 2026

Variável	Valor
Pressão máxima	11,10 Mpa
Temperatura máxima	511 °C
Vazão mássica máxima	488,1 kg/s
Entalpia do vapor	3402 kJ/kg
Entropia do vapor	7,13 kJ/kg.K
Pressão de Saída do Vapor	102,0 bar(g)
Pressão da Água de alimentação	132,5 bar (g)

As propriedades termodinâmicas apresentadas demonstram que a caldeira opera, sob condições típicas de plantas modernas de produção de celulose, produzindo vapor superaquecido em elevada pressão e temperatura, condição essencial para maximizar a geração de energia elétrica nos turbogeradores e atender às demandas térmicas do processo.

Os parâmetros utilizados para o cálculo da eficiência energética são apresentados na Tabela 2, permitindo identificar as principais variáveis consideradas na aplicação do balanço energético.

Tabela 2. Dados utilizados para determinação da eficiência energética da caldeira. Autor, 2026

Parâmetro	Valor	Unidade
Vazão do licor negro	129,3	kgDS/s
Poder calorífico inferior (PCI)	14.000	kJ/kg
Vazão do vapor gerado	488,1	kg/s
Entalpia do vapor	3402	kJ/kg
Entalpia da água de alimentação	546	kJ/kg

Utilizando os valores médios apresentados na Tabela 2, a aplicação da Equação (3) resultou em uma eficiência energética de 62,7%, conforme demonstrado pelo balanço energético da caldeira de recuperação.

Os parâmetros apresentados na Tabela 2 representam as principais variáveis empregadas no cálculo da eficiência energética da caldeira de recuperação. A utilização de dados reais de operação permitiu determinar o desempenho do sistema em condições representativas do processo industrial, fornecendo uma base consistente para a aplicação do balanço energético e para a avaliação dos indicadores de eficiência.

A participação das fontes energéticas no sistema de cogeração é apresentada na Figura 2.

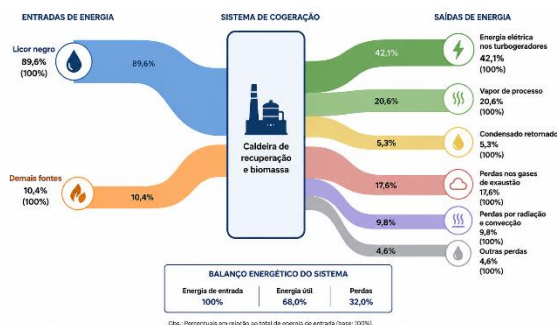


Figura 2. Distribuição da energia de entrada do sistema de cogeração. Fonte: O autor.

Verifica-se que o licor negro representa aproximadamente 89,6% da energia de entrada do sistema, confirmando sua importância para a autossuficiência energética da planta. As demais fontes energéticas correspondem a apenas 10,4%, demonstrando a elevada eficiência do ciclo de recuperação química característico do processo Kraft.

Eficiência energética da caldeira de recuperação

A eficiência energética da caldeira foi determinada pela relação entre a energia útil transferida ao vapor e

a energia fornecida pelo combustível, conforme apresentado na Equação (2).

$$\eta_I = \frac{m_s h_s - m_e h_e}{m_{comb} \cdot PCI} \quad (2)$$

Sendo:

η_I = eficiência energética ou eficiência de primeira lei (**adimensional ou %**);

m_s = vazão mássica de saída da caldeira (**kg/s**);

m_e = vazão mássica de entrada da caldeira (**kg/s**);

h_s = entalpia específica na saída da caldeira (**kJ/kg**);

h_e = entalpia específica na entrada da caldeira (**kJ/kg**);

m_{comb} = vazão mássica do combustível (licor negro) (**kg/s**);

PCI = poder calorífico inferior do combustível (**kJ/kg**).

A aplicação da Equação (3) permitiu determinar a eficiência energética da caldeira de recuperação a partir dos dados reais de operação da planta industrial. Os valores de vazão mássica, entalpia do vapor gerado, entalpia da água de alimentação, vazão do licor negro e poder calorífico inferior do combustível foram obtidos diretamente do sistema supervisor da unidade e utilizados na determinação do indicador de desempenho.

Os resultados obtidos evidenciaram uma eficiência térmica de 62,7%, valor compatível com o desempenho esperado para caldeiras de recuperação de grande porte. Quando considerada a contribuição das reações químicas de redução do licor negro, a eficiência alcançou 68,8%, demonstrando o elevado aproveitamento energético do sistema e confirmando a importância da recuperação química para a autossuficiência energética da planta.

Os principais indicadores de desempenho obtidos a partir dos balanços energético e exergético são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Indicadores de desempenho do sistema de cogeração.

Indicador	Valor
Participação do licor negro	89,6 %
Eficiência térmica	62,7 %
Eficiência com redução química	68,8 %

Com o objetivo de comparar o desempenho da unidade estudada com resultados disponíveis na literatura, a Figura 3 apresenta a eficiência térmica obtida neste trabalho em relação a valores reportados para plantas modernas de produção de celulose.

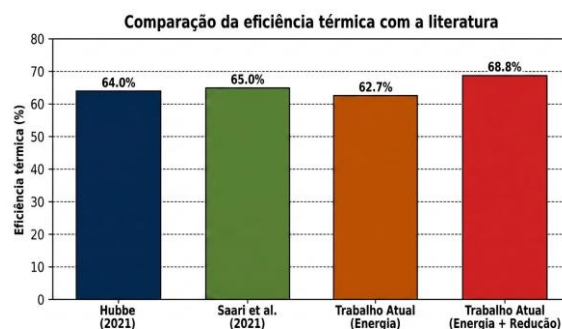


Figura 3. Comparação da eficiência térmica da caldeira de recuperação com valores reportados na literatura. Fonte: O autor.

Observa-se que a eficiência encontrada situa-se na faixa superior dos valores normalmente reportados, evidenciando o elevado desempenho operacional da unidade analisada.

Os resultados indicam que a combinação entre recuperação energética do licor negro, integração do sistema de cogeração e controle operacional contribui significativamente para o aproveitamento da energia disponível. A eficiência de 68,8%, considerando as reações químicas de redução, demonstra que a planta apresenta desempenho compatível com unidades industriais de referência, reforçando a importância da análise integrada dos balanços energético e exergético como ferramenta de diagnóstico e otimização.

Além disso, a proximidade dos resultados com aqueles encontrados por Hubbe (2021) e Saari et al. (2021) confere maior confiabilidade à metodologia empregada, evidenciando que o sistema opera dentro dos padrões esperados para instalações de alta eficiência e indica que a unidade opera dentro da faixa típica de plantas modernas de produção de celulose. Sob o ponto de vista industrial, os resultados sugerem que ações voltadas à redução do excesso de ar na combustão, ao aumento da concentração de sólidos do licor negro e ao aproveitamento do calor residual podem contribuir para ganhos adicionais de eficiência e sustentabilidade do processo.

Eficiência energética da caldeira de biomassa

A caldeira de biomassa desempenha papel fundamental no sistema de cogeração da planta industrial, sendo responsável pela conversão da energia química contida no combustível em energia térmica, utilizada para a geração de vapor de alta pressão destinado ao processo produtivo e à produção de energia elétrica. Dessa forma, a avaliação do seu desempenho energético permite quantificar a eficiência da conversão de energia e identificar oportunidades de otimização operacional.

A análise energética foi desenvolvida com base no balanço de energia aplicado ao volume de controle da caldeira, considerando as condições de operação em regime permanente e desprezando as variações de

energia cinética e potencial. Para essa avaliação, foram utilizados os dados operacionais de vazão, pressão e temperatura do vapor gerado, bem como as condições da água de alimentação obtidas diretamente do sistema supervisão da unidade industrial.

Os principais parâmetros operacionais da caldeira de biomassa, utilizados na análise energética, foram obtidos diretamente do sistema supervisão da unidade industrial durante condições normais de operação. A Tabela 4 apresenta as variáveis adotadas nos cálculos, incluindo vazão, pressão, temperatura e demais parâmetros necessários para a determinação da energia útil transferida ao vapor e da eficiência energética da caldeira.

Tabela 4. Parâmetros operacionais da caldeira de biomassa

Parâmetro	Valor
Vazão de vapor	120 t/h = 33,33 kg/s
Temperatura do vapor	= 507,8 °C
Entalpia do vapor	= 3402 kJ/kg
Água de alimentação	= 252 °C
Entalpia da água	= 1095 kJ/kg

Inicialmente, foi determinada a taxa de energia útil transferida ao fluido de trabalho pela caldeira de biomassa. Esse parâmetro representa a quantidade de energia térmica absorvida pela água durante sua transformação em vapor superaquecido e constitui a base para a avaliação do desempenho energético da caldeira. O cálculo foi realizado considerando a diferença entre as entalpias específicas do vapor gerado e da água de alimentação, multiplicada pela vazão mássica de vapor, conforme apresentado na Equação (3).

$$Q_{util} = m_{vapor} \times (h_{vapor} - h_{agua}) \quad (3)$$

Sendo:

Q_{util} = energia útil transferida ao vapor (**kW**)

m_{vapor} = vazão mássica de vapor gerado (**kg/s**)

h_{vapor} = entalpia específica do vapor na saída da caldeira (**kJ/kg**)

h_{agua} = entalpia específica da água de alimentação (**kJ/kg**)

A partir dos dados operacionais apresentados na Tabela 4 e das propriedades termodinâmicas determinadas para as correntes de água e vapor, procedeu-se à substituição dos valores na Equação (4), obtendo-se a taxa de energia útil transferida ao vapor pela caldeira de biomassa.

$$\begin{aligned} Q_{util} &= 33,33 \times (3402 - 1095) \\ Q_{util} &= 33,33 \times 2307 \\ Q_{util} &= 76.892 \text{ kW} \\ Q_{util} &= 76,9 \text{ MW} \end{aligned}$$

Em seguida, foi determinada a taxa de energia disponibilizada pelo combustível. Essa grandeza corresponde à energia química introduzida na caldeira por meio da combustão da biomassa e foi calculada a partir da vazão mássica do combustível e do seu poder calorífico inferior (PCI), conforme apresentado na Equação (5).

$$Q_{comb} = m_{biomassa} \times PCI_{biomassa} \quad (5)$$

Onde:

Q_{comb} = energia fornecida pela biomassa (**kW**)

$m_{biomassa}$ = vazão mássica de biomassa consumida (**kg/s**)

$PCI_{biomassa}$ = poder calorífico inferior da biomassa (**kJ/kg**)

Considerando a vazão mássica de biomassa de 10,83 kg/s e o poder calorífico inferior do cavaco de eucalipto de 8.860 kJ/kg, realizou-se a substituição dos valores na Equação (5), obtendo-se a potência térmica fornecida pelo combustível ao sistema:

$$\begin{aligned} Q_{comb} &= 10,83 \times 8.860 \\ Q_{comb} &= 95.953,8 \text{ kW} \\ Q_{comb} &= 95,95 \text{ MW} \end{aligned}$$

Verifica-se que a combustão da biomassa disponibiliza aproximadamente 95,95 MW de potência térmica ao sistema. Esse valor corresponde à energia química fornecida pelo combustível e representa a quantidade máxima de energia disponível para conversão em energia útil na forma de vapor, constituindo a base para a determinação da eficiência energética da caldeira.

Conhecidas a potência térmica útil transferida ao vapor e a potência térmica disponibilizada pelo combustível, foi determinada a eficiência energética da caldeira de biomassa. Esse indicador expressa a capacidade do equipamento em converter a energia química contida no combustível em energia útil para a geração de vapor, constituindo um dos principais parâmetros para avaliação do desempenho térmico da unidade. A eficiência energética foi calculada conforme apresentado na Equação (6).

$$\eta = \left(\frac{Q_{util}}{Q_{comb}} \right) \times 100 \quad (6)$$

Onde:

η = eficiência energética da caldeira (%);

Q_{util} = potência térmica útil transferida ao vapor (**kW**);

Q_{comb} = potência térmica fornecida pela combustão da biomassa (**kW**).

Substituindo os valores obtidos nas Equações (4) e (5), tem-se:

$$\begin{aligned} \eta &= \left(\frac{76.892}{95.953,8} \right) \times 100 \\ \eta &= 80,13 \% \\ \eta &\approx 80,1 \% \end{aligned}$$



A eficiência energética obtida para a caldeira de biomassa foi de aproximadamente 80,1%, indicando elevado aproveitamento da energia química do cavaco de eucalipto na geração de vapor. Esse resultado encontra-se compatível com a faixa de eficiência reportada para caldeiras aquatubulares modernas alimentadas por biomassa, normalmente situada entre 75% e 90%, dependendo das características do combustível, do teor de umidade e das condições operacionais. Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que a unidade avaliada apresenta desempenho energético satisfatório, evidenciando um processo de combustão eficiente e adequada transferência de calor ao fluido de trabalho.

Além do elevado desempenho térmico observado, a utilização da biomassa como combustível contribui para a diversificação da matriz energética da planta, reduzindo a dependência exclusiva da caldeira de recuperação e aumentando a flexibilidade operacional do sistema de cogeração. Nesse contexto, a caldeira de biomassa atua como importante fonte complementar de geração de vapor, favorecendo a confiabilidade operacional da unidade industrial e o melhor aproveitamento dos resíduos florestais provenientes do processo produtivo.

CONCLUSÃO

A presente pesquisa permitiu avaliar o desempenho energético de um sistema de cogeração de uma moderna planta de produção de celulose a partir de dados reais de operação, demonstrando a aplicabilidade dos balanços de energia e exergia como ferramentas para análise do desempenho de sistemas térmicos industriais.

Os resultados obtidos evidenciaram que o licor negro constitui a principal fonte energética da planta, sendo responsável por aproximadamente 89,6% da energia de entrada do sistema, confirmando sua importância para a autossuficiência energética característica do processo Kraft. A caldeira de recuperação apresentou eficiência térmica de 62,7%, alcançando 68,8% quando consideradas as reações químicas de redução, valores compatíveis com aqueles encontrados para plantas industriais modernas descritas na literatura.

A avaliação da caldeira de biomassa também apresentou resultados satisfatórios. A eficiência energética aproximada de 80,1% demonstrou elevado aproveitamento da energia química do cavaco de eucalipto na geração de vapor, situando-se dentro da faixa normalmente reportada para caldeiras aquatubulares modernas alimentadas por biomassa. Esse resultado evidencia a relevância desse equipamento como fonte complementar de vapor, contribuindo para a confiabilidade operacional da planta e para o melhor aproveitamento dos resíduos florestais.

De forma geral, o estudo demonstrou que a integração entre a caldeira de recuperação, a caldeira de biomassa e os turbogeradores proporciona elevado aproveitamento energético, reduzindo o consumo de combustíveis externos e aumentando a sustentabilidade do processo produtivo. Os resultados obtidos podem servir como referência para avaliações semelhantes em outras plantas de celulose e para estudos voltados à otimização energética de sistemas de cogeração.

Como trabalhos futuros, recomenda-se executar a análise exérgica considerando todos os equipamentos auxiliares da planta, bem como realizar estudos de sensibilidade envolvendo excesso de ar, teor de sólidos do licor negro, umidade da biomassa e recuperação de calor residual, visando identificar estratégias que possibilitem elevar ainda mais a eficiência energética e reduzir os impactos ambientais do processo.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC – Brasil, em parceria com a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- CASTRO, R. M. Cogeração e geração distribuída: desafios e perspectivas. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.
- FERREIRA, D. C. Caldeiras de recuperação química na indústria de celulose. São Paulo: Blucher, 2013.
- HUBBE, M. A. et al. Energy use and efficiency in the pulp and paper industry: a review. *BioResources*, v. 16, n. 4, p. 7870-7919, 2021.
- IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual 2021. São Paulo: IBÁ, 2021.
- KONG, L. et al. Energy efficiency analysis and optimization of pulp and paper industry processes. *Applied Energy*, v. 275, 2020.
- MORAN, M. J. et al. *Princípios de Termodinâmica para Engenharia*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- SAARI, J. et al. Recovery boiler performance and energy efficiency in modern kraft pulp mills. *TAPPI Journal*, v. 20, n. 7, 2021.
- SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F. R. *Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes*. New York: Hemisphere Publishing, 1988.