



ANÁLISE DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DE UM PROCESSO DE SECAGEM DE PAPEL KRAFTLINER

Arthur Possenti¹

Adriano da Silva Marques¹

Programa de Pós-graduação em Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, Brasil

arthur.possenti@cear.ufpb.br

adriano@cear.ufpb.br

Resumo: A produção de papel tem crescido significativamente, impulsionada por investimentos e expansão da produtividade no setor. O processo de fabricação destaca-se pelo elevado consumo de água e vapor, sendo a etapa de secagem a mais crítica para a remoção da água do papel e ajuste da umidade. Contudo, o sistema de secagem estudado apresenta um elevado consumo de vapor. Este trabalho visa analisar a eficiência térmica da secagem do papel kraftliner, observando parâmetros do processo para sugerir otimizações que melhorem a eficiência do sistema. Foram realizados cálculos de balanços de massa e energia para o sistema de secagem, a produção de papel, a geração de vapor e o sistema de ventilação. A eficiência térmica do sistema é de 74,8% com um consumo específico de 1,77 toneladas de vapor por tonelada de água evaporada. A otimização do sistema de ventilação, com potencial para reduzir 1.150 kW, envolve a diminuição do ar de infiltração e o balanceamento da capota. Esses esforços alinham-se com os ODS 6, 7, 9 e 12, que abordam a gestão eficiente de água, energia e inovação industrial sustentável.

Palavras-chave: Consumo de Vapor. Eficiência Energética. Otimização de Processos. Sustentabilidade Industrial.

1. Introdução

A indústria de papel e celulose desempenha um papel estratégico tanto no cenário global quanto nacional, sendo fundamental para a economia devido à crescente demanda por papel e embalagens. No Brasil, o setor é composto por mais de 300 fábricas com destaque para a produção de papel *kraftliner*, essencial para embalagens devido à sua durabilidade (Dixit *et al*, 2019). A demanda crescente por produtos sustentáveis tem incentivado o setor a adotar práticas mais ecológicas, como o uso de matérias-primas recicladas e a redução no consumo de água e energia, aspectos fundamentais para mitigar os impactos ambientais da produção de papel. No entanto, a indústria ainda enfrenta desafios relacionados ao grande uso de recursos naturais e à geração significativa de efluentes e resíduos, o que exige um foco constante em tecnologias inovadoras e práticas sustentáveis, como a valorização de resíduos e a produção de energia a partir de biomassa (Rullifank *et al*, 2020).

A eficiência térmica é fundamental na produção de papel, especialmente na etapa de secagem, que demanda grande quantidade de energia térmica, fornecida principalmente por vapor (Janosovsky *et al*, 2020). Otimizar esse processo busca reduzir o consumo de vapor e, conseqüentemente, de água, diminuindo custos operacionais e impactos ambientais, como a



emissão de gases de efeito estufa. Melhorias tecnológicas, como sistemas de recuperação de calor e processos de secagem mais eficientes, são vitais para promover uma produção mais sustentável e economicamente viável (Sjöstrand, 2023).

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU são essenciais para orientar práticas industriais em direção às metas globais de sustentabilidade. No setor de papel e celulose, é crucial considerar o ODS 6, que aborda água limpa e saneamento, e o ODS 7, voltado para energia acessível e limpa (Hernandez *et al*, 2023). Investir em inovação e infraestrutura sustentável, conforme o ODS 9, é vital para melhorar a eficiência energética e hídrica da indústria, contribuindo para um futuro mais sustentável (Longo *et al*, 2023; Azevedo *et al*, 2023). O ODS 12, que incentiva consumo e produção responsáveis, também exige que o setor adote práticas que reduzam o desperdício de recursos e aumentem a eficiência produtiva, em sintonia com as expectativas de consumidores e investidores por práticas mais sustentáveis (Tawfik *et al*, 2022; Montezuma *et al*, 2023).

O consumo de vapor na secagem do papel é um desafio crítico para a indústria de papel e celulose. Um consumo ineficiente de vapor pode causar defeitos no produto, aumentar o tempo de secagem e reduzir a produtividade das máquinas (Pathak & Sharma, 2023). O uso excessivo de vapor também eleva os custos operacionais e agrava a pegada ambiental, associada à queima de combustíveis, reforçando a necessidade de otimização térmica (Dias, 2024).

A otimização e inovação no processo de secagem do papel são cruciais, especialmente diante da crescente demanda por práticas mais sustentáveis e competitivas. Investir em soluções que melhorem a eficiência térmica e diminuam o consumo de vapor é essencial para assegurar a viabilidade econômica e atender aos objetivos da Agenda 2030 (Hemavathi, 2020). A adoção de tecnologias avançadas, como sistemas de recuperação de calor e métodos de secagem mais eficientes, pode transformar o setor. Essas melhorias têm o potencial de reduzir custos operacionais e minimizar os impactos ambientais da produção de papel (Anjomshoaa & Salmanzadeh, 2021).

Em suma, a análise da eficiência térmica no processo de secagem de papel é um passo crucial para a redução do consumo de vapor e, conseqüentemente, para a promoção da sustentabilidade na indústria de papel e celulose. Este trabalho tem como objetivo geral analisar a eficiência térmica desse processo, com vistas à redução do consumo de vapor. Os objetivos específicos incluem relacionar o consumo eficiente de vapor com os ODS, analisar a eficiência do processo de secagem em termos de tonelada de água evaporada por tonelada de vapor consumido, e identificar perdas para otimização do processo, visando a redução do consumo específico e o alinhamento com as metas de sustentabilidade global.

2. Fundamentação teórica

O papel é um composto de fibras de celulose interligadas entre si, somado a produtos químicos utilizados para conferir a ele resistência física e mecânica, tem entre 6 a 10% de umidade, de acordo com sua finalidade (Kloppenbug *et al*, 2023). Possui diversas aplicações em todos os segmentos, como papel branco para imprimir e escrever, papel para fins sanitários, jornal e embalagens. Destaca-se por ser um produto sustentável e pode ser reciclado inúmeras vezes (Balea *et al*, 2020).



Dentre os tipos de papéis para embalagem destacam-se os do tipo *kraftliner* e reciclado, utilizados para a fabricação de chapas de papel e depois caixas de papelão ondulado. Os papéis *kraftliner* possuem uma face composta de celulose virgem (capa) e a outra a partir de material reciclado (base), são utilizados nas faces da chapa de papelão e são chamados, portanto, de papel capa. Os papéis reciclados, chamados de papel miolo, são posteriormente ondulados para formar a estrutura interior da chapa (Salvador *et al*, 2020).

Para o processo de fabricação de papel *kraftliner* uma unidade industrial apresenta um elevado consumo de água, em todas as etapas de produção, como cozimento, desagregação, depuração, refinação e preparo de massa (Odunlami, *et al*, 2023). A massa de fibras fica suspensa em água para possibilitar todas essas operações e também seu transporte, que é todo realizado por bombeamento (Han *et al*, 2021).

A concentração das fibras em água é medida por meio da consistência dessa solução e ao longo do processo produtivo pode sofrer diluição ou ser engrossada, ora pode estar em uma consistência de até 7%, ora em 0,4% (Son *et al*, 2020).

Depois das etapas de preparação de massa, esta é encaminhada para a máquina de papel, que faz a distribuição das fibras em uma tela formadora. Nesse ponto, a consistência da massa é muito importante para uma boa formação e acabamento superficial do papel, quanto maior a diluição da massa, melhor a qualidade do papel (Mboowa, 2021).

A partir da distribuição da massa na tela formadora, com a folha de papel já formada, a água presente na massa que agregava qualidade passa a ser uma dificuldade, pois está presente em grande quantidade e precisa ser removida por diversas operações até atingir a umidade especificada para o produto (Hubbe *et al*, 2020).

A máquina de papel então realiza a remoção da água pela aplicação de vácuo na tela formadora, prensagem da folha de papel e posterior secagem a partir de aplicação de vapor saturado no interior de cilindros rotativos, que aquecem o papel por contato indireto (Noori *et al*, 2020). Esse vapor depois de fornecer calor para o sistema, é drenado do interior dos cilindros secadores e sai na forma de líquido saturado, uma corrente de condensado que é enviada como retorno para a caldeira de força (Majeed & Wang, 2019).

A etapa de secagem é composta também por uma capota, que faz o condicionamento do ar circulante no interior do secador. O ar de circulação aquecido a uma temperatura média de 80 °C é injetado no interior do secador onde se difunde com o vapor d'água que estava presente no papel, essa corrente úmida posteriormente é removida através de um exaustor (Yan & Wen, 2022). A eficiência de ventilação de ar pode ser analisada por meio do balanço da capota, coeficiente matemático obtido pela razão entre kg de ar seco insuflado por kg de ar seco removido (Zhang *et al*, 2021).

No sistema de secagem ocorrem os fenômenos de transferência de calor e de massa, (Foust *et al*, 1982) a transferência de calor entre o vapor e o papel, precisando vencer a resistência térmica do cilindro secador, e a de massa, onde a água presente no papel é evaporada e transferida para o ar em circulação (Khan *et al*, 2020).

Dentre as três etapas de remoção de água de uma máquina de papel, a de secagem é a mais onerosa pois consome uma grande quantidade de energia em forma de vapor para secar o papel e por isso, se não analisado periodicamente o processo de secagem da máquina de papel



pode apresentar um elevado consumo de vapor em termos de toneladas de vapor consumido por toneladas de papel produzido (Marchevsky *et al*, 2020).

3. Metodologia

Uma das maneiras de medir a eficiência de secagem é pelo método que correlaciona a quantidade de energia fornecida pela corrente de vapor saturado e a quantidade de energia requerida para evaporar a água presente no papel (Godin & Radgen, 2022).

Para isso, foi desenvolvida uma metodologia para elaboração deste trabalho, desde a coleta de dados *in loco*, realização dos cálculos de balanço de massa, balanço de energia e cálculos de eficiência energética, contemplando as seguintes etapas: Coleta de Dados, Balanço de Massa, Cálculo Energético, Análise Estatística e Possibilidade de Otimização.

Para o completo desenvolvimento do projeto foi crucial realizar a coleta dos principais dados necessários para a determinação dos parâmetros objetivados, esses fatores que mais impactam sobre a secagem da folha de papel. Os dados e cálculos elaborados foram obtidos com a máquina de papel produzindo papel de 210 g.m², com velocidade de 460 m.min⁻¹ na enroladeira. A máquina de papel é equipada com capota do tipo fechada convencional.

Dados como vazão mássica, pressão e temperatura do vapor foram coletados diretamente da malha de controle de instrumentação do processo, por meio dos instrumentos instalados em campo. As leituras foram realizadas via painel de operação da máquina, onde são centralizadas e monitoradas as variáveis críticas do processo. Os dados foram registrados continuamente a cada intervalo de uma hora, simultâneas ao período de coleta dos demais dados experimentais, garantindo amostragem representativa. A temperatura do papel foi analisada por medições em infravermelho com pirômetro. A temperatura e umidade do ar foram obtidas com uso de termômetro convencional e a umidade do papel obtida experimentalmente pelo método de secagem em estufa (Pereira, 2013). A vazão de ar foi quantificada a partir de análises com anemômetro digital. Os valores de entalpia, calor específico e calor latente para a água foram obtidos com base na literatura, de acordo com as tabelas da termodinâmica. Outros valores como produção da máquina foram fornecidos pela empresa estudada. As informações referentes aos equipamentos e instrumentos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho estão relacionadas na tabela 1. Assim como todos os dados e parâmetros utilizados nos cálculos foram reunidos e são expostos na tabela 2.

Tabela 1 – Informações técnicas dos equipamentos utilizados no projeto

Equipamento	Marca	Modelo	Erro
Termômetro de Mercúrio Convencional	Incoterm	5085	0,5 °C
Pirômetro	Benetech	gm550	1,5 °C
Transmissor de pressão	Yokogawa	EJX530A	0,5 kgf.cm ⁻²
Estufa de Secagem com Ventilação	Ethik	400/*D	0,3 °C
Anemômetro Digital	Minipa	MDA-11	3% do fundo de escala



Fonte: Os autores, 2024

Da mesma maneira, todos os dados e parâmetros utilizados nos cálculos foram reunidos e são expostos na tabela 2.

Tabela 2 – Informações e dados do processo

	Entradas	Saídas
Produção de Papel (ton.h ⁻¹)	-	13,33
Umidade do Papel (%)	53,3	7,36
Temperatura do Papel (°C)	49,0	69,4
Vazão Linha Vapor 5 kgf.cm ⁻² (ton.h ⁻¹)	12,341	12,341
Vazão Linha Vapor 12 kgf.cm ⁻² (ton.h ⁻¹)	7,781	7,781
Vazão Linha Vapor 18 kgf.cm ⁻² (ton.h ⁻¹)	2,112	2,112
Pressão Linha Vapor 5 kgf.cm ⁻² (kPa)	568,4	-
Pressão Linha Vapor 12 kgf.cm ⁻² (kPa)	1205,5	-
Pressão Linha Vapor 18 kgf.cm ⁻² (kPa)	1675,4	-
Entalpia Linha Vapor 5 kgf.cm ⁻² (kJ.kg ⁻¹)	2754,362	661,298
Entalpia Linha Vapor 12 kgf.cm ⁻² (kJ.kg ⁻¹)	2784,973	799,544
Entalpia Linha Vapor 18 kgf.cm ⁻² (kJ.kg ⁻¹)	2795,153	868,449
Vazão de Ar de Circulação (kg.h ⁻¹)	55652	319549
Umidade do Ar de Circulação (kg _{H₂O} .h.kg _{arseco} .h ⁻¹)	4,0	6,8
Temperatura do Ar de circulação (°C)	126	62
cp água (kJ.kg ⁻¹) = 4,186		
ΔH _{vap} água (kJ.kg ⁻¹) = 2.257,1		

Fonte: Os autores, 2024

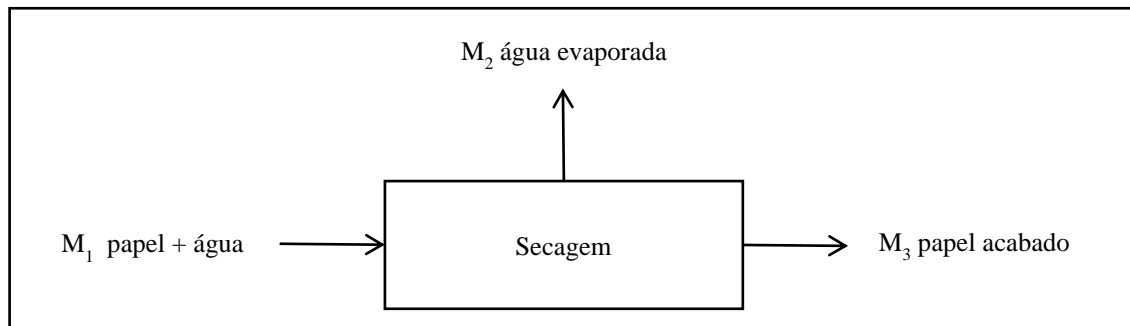
O balanço de massa é um método de análise de processos que consiste na verificação de fluxos de entrada e saída por meio do método de igualdades de um sistema ou de um volume de controle (Cengel, 2017). No presente trabalho ele foi aplicado com o objetivo de estimar o total de massa que entra no secador e também o total de água que é evaporada pelo sistema de secagem.

Os balanços de massa foram realizados para o volume de controle do secador. Foi utilizado como base de cálculo a produção da máquina de papel, 13,33 ton.h⁻¹. E a partir da aplicação da lei de conservação de massa podem ser obtidos os valores para as demais correntes



do sistema (Himmelblau & Riggs, 2014). O esquema com as correntes de entrada e saída do secador é denotado na figura 1.

Figura 1 – Entrada e saída de papel no sistema de secagem



Fonte: Os autores, 2024

As equações para realização balanço de massa foram definidas conforme as equações 1 e 2, para quantificação do total de massa de água evaporada (M_2) e da massa de papel úmido que entra no sistema (M_1), a partir da produção de papel (M_3).

$$M_1 = M_2 + M_3 \quad (1)$$

$$M_1 \cdot xM_1 = M_2 \cdot xM_2 + M_3 \cdot xM_3 \quad (2)$$

A água presente no papel demanda uma grande quantidade de calor para ser removida, desta forma balanços de energia são uma ótima ferramenta para apontar e determinar os níveis de eficiência para o processo de secagem em questão (Taner, 2015).

A quantidade de energia requerida para evaporação da água foi calculada pela soma do calor sensível com o calor latente de vaporização da água a 1 atm (Green *et al*, 2018), a partir das equações 3 e 4.

$$Q_{\text{SENSÍVEL}} = M_1 \cdot c_p \cdot (T_f - T_i) \quad (3)$$

$$Q_{\text{LATENTE}} = M_2 \cdot \Delta H_{\text{VAP}} \quad (4)$$

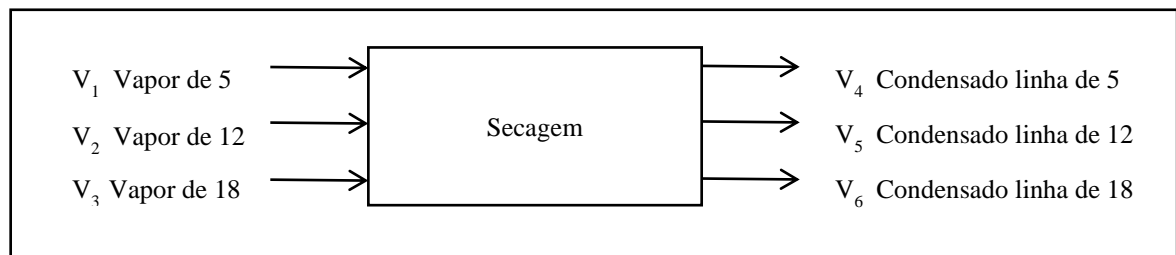
O calor total fornecido pelo vapor para o sistema foi obtido mediante balanço energético envolvendo as três linhas de vapor, dado na equação 5, com a aplicação da primeira lei da termodinâmica para o volume de controle (Borgnakke & Sonntag, 2013), como expressado na



figura 2. Para esse balanço foi considerado entrada de 100% vapor saturado e saída de 100% líquido saturado.

$$V_1.h_1 + V_2.h_2 + V_3.h_3 = V_4.h_4 + V_5.h_5 + V_6.h_6 + Q_f \quad (5)$$

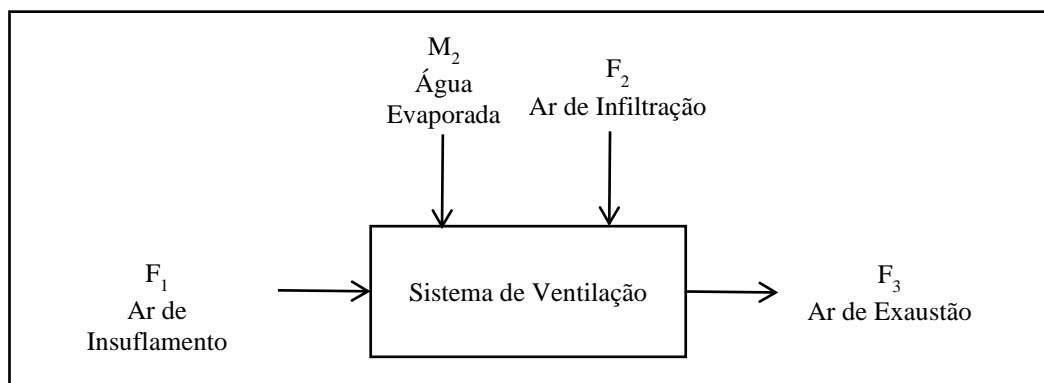
Figura 2 – Esquema das linhas de vapor do secador.



Fonte: Os autores, 2024

Por fim, realização de um balanço de massa com as correntes de circulação de ar, que envolvem a captura da água contida no papel que foi evaporada e sai do sistema de secagem por exaustão, a fim de encontrar a quantidade de ar de infiltração que poderia estar ocasionando queda da eficiência térmica do secador (Patel & Bade, 2020). O esquema com as correntes de ar é exibido na figura 3, assim como as equações desenvolvidas nessa etapa dos balanços de massa e energia estão descritas nas equações 6, 7 e 8, para o balanço global, balanço para o componente água presente no ar e balanço energético do sistema de ventilação, respectivamente.

Figura 3 – Esquema do sistema de ventilação do ar de circulação no interior da capota



Fonte: Os autores, 2024

$$F_1 + M_2 + F_2 = F_3 \quad (6)$$



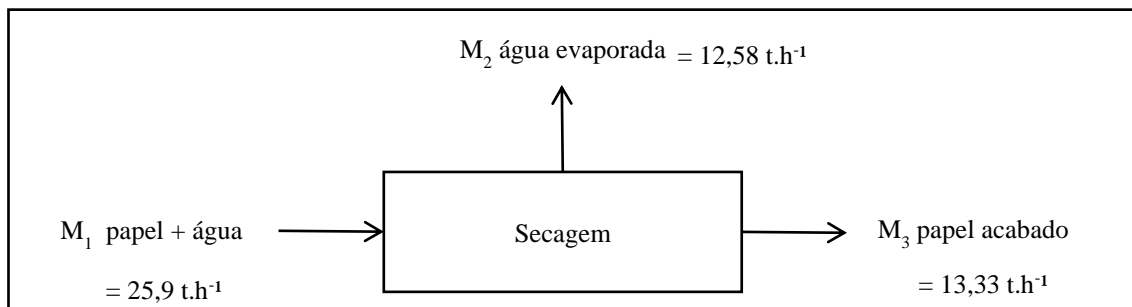
$$F_1 \cdot xF_1 + M_2 \cdot xM_2 + F_2 \cdot xF_2 = F_3 \cdot xF_3 \quad (7)$$

$$F_1 \cdot hF_1 + M_2 \cdot h_2 + F_2 \cdot hF_2 + Q_r = F_3 \cdot hF_3 \quad (8)$$

4. Resultados

A partir do cálculo do balanço de massa para os produtos no secador obteve-se a quantidade de água evaporada e também a taxa de entrada do papel úmido no secador, que foram estimadas em 12,58 ton.h⁻¹ e 25,9 ton.h⁻¹, respectivamente, a partir da resolução das equações 1 e 2, ilustrados na Figura 4.

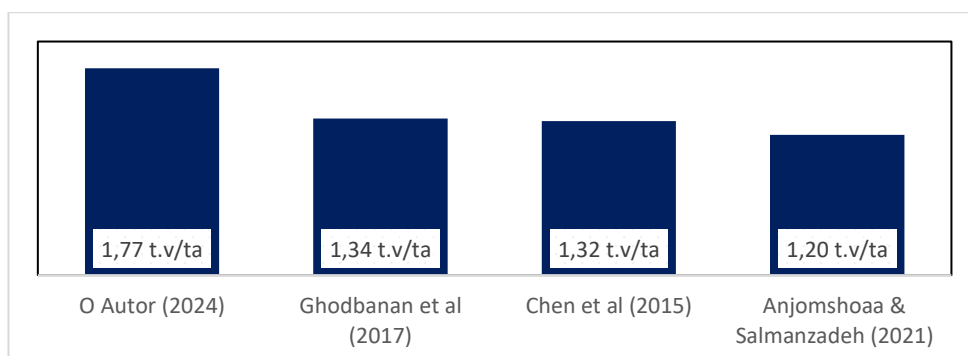
Figura 4 – Resultado do Balanço Global de Massa para o Produto



Fonte: Os autores, 2024

Esses valores são importantes para obter a relação de toneladas de vapor consumido por toneladas de água evaporada, que para o cenário estudado é de 1,77. Esse valor é comparado na Figura 4 a outros estudos semelhantes da literatura como os de Chen *et al* (2015), Ghodbanan *et al* (2017) e de Anjomshoaa & Salmanzadeh (2021) que obtiveram um coeficiente de 1,32, 1,34 e 1,20, respectivamente. Com esse índice podemos comparar a taxa de evaporação, que quanto menor, melhor. Essa comparação indica que o processo carece e tem potencial para otimização, evidenciando uma possibilidade de identificar oportunidades e reduzir valor e gerar economia de vapor para a máquina de papel estudada.

Figura 4 – Comparativo dos resultados do trabalho com dados da literatura



Fonte: Os autores, 2024



Com os resultados obtidos pelo balanço de massa foi calculado o total de energia requerida para secar o papel, por meio da soma do calor sensível e do calor de latente de mudança de fase da água. Por meio desse cálculo, encontrou-se que a energia requerida para secar o papel, que para as condições do processo do equipamento em estudo foi de 9421 kW.

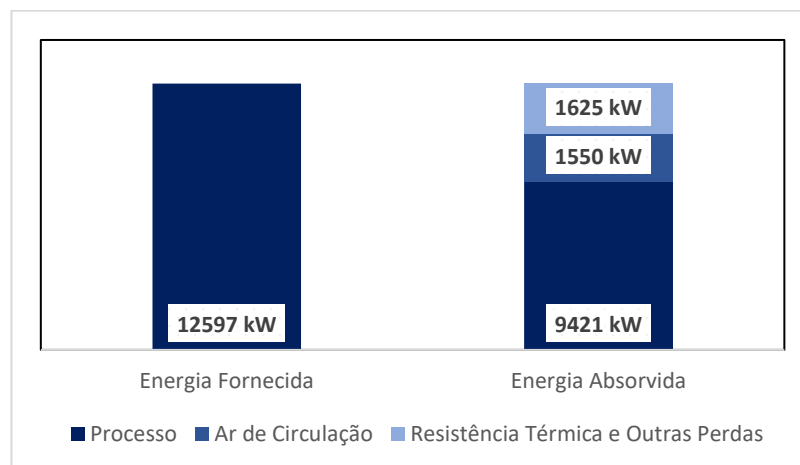
A fim de comparar a energia fornecida pelo sistema com a energia necessária para secar o papel, foi realizado o balanço energético para as linhas de vapor, para conferir a quantidade total de energia fornecida pelo vapor saturado. Desse balanço de energia verificou-se que a quantidade total de energia fornecida para o sistema de secagem foi de 12597 kW. O total de energia fornecida é um valor aproximado de 30% acima da quantidade necessária. Mesmo considerando a energia necessária para vencer a resistência térmica dos cilindros secadores e aquecer o sistema de secagem ainda é uma quantidade excessiva, já que a quantidade teórica necessária para secar o papel é 74,8% da quantidade de energia fornecida.

Com esses valores identificou-se que existe elevada perda de energia, cerca de 3176 kW, que está sendo consumida em outros locais do secador e não destinados à secagem do papel.

A partir do balanço de massa sobre a circulação de ar do sistema de ventilação pode-se evidenciar que o sistema opera atualmente com um desbalanço dos fluxos do ar de circulação, com deficiência de insuflamento e excesso de exaustão. Como consequência o sistema de secagem contém uma grande quantidade de ar de infiltração, que atinge 251320 kg.h⁻¹ de ar e a partir desse dado foi possível calcular a quantidade de energia em forma de calor que o ar frio de infiltração absorve do processo. Esse valor foi calculado a partir da resolução das equações 6, 7 e 8.

O resultado desse balanço energético é que a corrente de ar de infiltração consome em média 1550 kW do sistema, significando 12% do total da energia fornecida pelo vapor, sendo este o principal ponto que reduz a eficiência do sistema de secagem e aumenta a relação de consumo de vapor por toneladas de papel produzido. O resultado do balanço energético está ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Relação da Energia Fornecida e Consumida no Sistema



Fonte: Os autores, 2024



O balanceamento da capota é uma forma de controle das condições do ar de exaustão e de insuflamento e diz que para o modelo de capota objeto desse estudo, a relação de ar seco de insuflamento por ar seco de exaustão deve ser de 0,5 a 0,8 (TAPPI, 2022), sendo assim, a atual condição do sistema de ventilação demonstra que a capota está com esse coeficiente em 0,179, bem distante do orientado como ponto ótimo pela literatura (Taqiyuddin & Abdurrahman, 2023 e McDonald, 2020).

Haja visto a grande quantidade de calor consumido pelo ar de infiltração, a principal alternativa para otimização do sistema de secagem é desenvolver um controle sobre as condições do ar de insuflamento, estabilizando a sua temperatura e também implementando um controle de umidade do ar de entrada e saída, para monitorar sua variação e conseqüentemente reduzindo ou até evitando que o sistema permita a entrada de ar frio infiltrado pela vizinhança. Essas medidas certamente vão contribuir para uma maior eficiência térmica do sistema e conferir também maior capacidade de secagem para a máquina de papel.

Segundo o modelo criado para realização dos balanços de massa e energia, é recomendado como medida para melhoria da eficiência do sistema promover o aumento do fluxo de ar de insuflamento. Essa medida tende a minimizar a infiltração de ar frio, e tem potencial de gerar uma economia de até 1550 kW, podendo aumentar a eficiência global para próximo dos 80%.

5. Conclusões

Após analisar o sistema de secagem, foi identificado que a máquina de papel estudada opera com uma eficiência de aproximadamente 75%, resultando em uma perda estimada de 3.176 kW. A principal causa da redução da eficiência é a perda de calor para o ar frio que infiltra pelo sistema de secagem, devido ao desbalanceamento da capota, que apresenta um alto coeficiente de 1,77 toneladas de vapor consumido por toneladas de água evaporada.

Para corrigir essa deficiência é necessário balancear a capota, aumentando o fluxo de ar seco insuflado e impedindo infiltrações de ar frio, melhorando a troca térmica. Após implementar essas ações recomenda-se uma nova análise para avaliar o comportamento da secagem do papel.

Essa eficiência energética abaixo do ideal representa uma grande perda financeira e ambiental, afetando tanto a lucratividade do negócio quanto o maior consumo de recursos hídricos. O monitoramento da eficiência térmica é um indicador também da sustentabilidade do processo, e avaliação integrada do consumo eficiente de água e energia. Portanto, deve ser analisado criticamente e periodicamente.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à: (1) Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pelo financiamento ao projeto n° 038/2023 do Edital 19/2022 e ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo financiamento ao projeto n° 405925/2023-9, Edital 10/2023.



7. Referências bibliográficas

- ANJOMSHOAA, A.; SALMANZADEH, M. A novel thermodynamic and heat and mass transfer model for the multicylinder dryer section of a paper machine. **Drying Technology**, v. 40, n. 7, p. 1307–1328, 2022. DOI: 10.1080/07373937.2020.1866596
- AZEVEDO, V. S.; MAGALHAES, B. M.; AMARAL, P. C.; SILVA, V. Impacto da incorporação de RBRO em sistemas de autoconstrução e suas implicações frente as ODS 9, 11 e 12. **Livro de Memórias do Sustentare & WIPIS**, 2024. DOI: 10.29327/sustentare-wipis-2023-311985.752302
- BALEA, A.; FUENTE, E.; CONCEPCION MONTE, M.; MERAYO, N.; CAMPANO, C.; NEGRO, C.; BLANCO, A. Industrial application of nanocelluloses in papermaking: A review of challenges, technical solutions, and market perspectives. **Molecules**, v. 25, n. 3, p. 526, 2020. DOI: 10.3390/molecules25030526
- BORGNACKE, C; SONNTAG, R. E; 2013. **Fundamentos Da Termodinâmica**. Blucher. 8 ed. 730 p.
- CENGEL, Y. A.; Boles, M. A. **Termodinâmica: Uma abordagem de engenharia**. 9. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2017
- CHEN, X.; LI, J.; LIU, H.; YIN, Y.; HONG, M.; ZENG, Z. Energy System Diagnosis of Paper-Drying Process: Part 1. Energy Performance Assessment. **Drying Technology**, v. 34, n. 8, p. 930–943, 2015. DOI: 10.1080/07373937.2015.1087022
- DIAS, R. O papel das energias renováveis no cumprimento dos ODS: Oportunidades e desafios. **Recima 21**, v. 5, n. 1, p. e514845, 2024. DOI: 10.47820/recima21.v5i1.4845
- FOUST, A. S. **Princípios Das Operações Unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 795 p.
- GHODBANAN, S.; ALIZADEH, R.; SHAFIEI, S. Optimization for energy consumption in drying section of fluting paper machine. **Thermal science**, v. 21, n. 3, p. 1419–1429, 2017. DOI: 10.2298/TSCI150503141G
- GODIN, H.; RADGEN, P. Model-based framework for the evaluation of energy-efficiency measures in multi-cylinder paper drying. **Drying Technology**, v. 40, n. 13, p. 2723–2740, 2022. DOI: 10.1080/07373937.2021.1958338
- HAN, N.; ZHANG, J.; HOANG, M.; GRAY, S.; XIW, Z. A review of process and wastewater reuse in the recycled paper industry. **Environmental Technology & Innovation**, v. 24, n. 101860, p. 101860, 2021. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101860
- HEMAVATHI, G. A review of energy conservation strategies and measures in industry division. **Malaya Journal of Matematik**, v. s, n 2, p. 2806-2810. 2020. DOI: 10.26637/MJM0S20/0720
- HERNÁNDEZ, J. G. S.; HERNÁNDEZ, S.; VARGAS, E. C.; RAMÍREZ, E. S. Challenges and opportunities in process intensification to achieve the UN's 2030 agenda: Goals 6, 7, 9, 12 and 13. **Genie des Procédés [Chemical engineering and processing]**, v. 192, n. 109507, p. 109507, 2023. DOI: 10.1016/j.cep.2023.109507
- HIMMELBLAU, D. M.; RIGGS J. B. **Engenharia Química Princípios e Cálculos**. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 772 p.



HUBBE, M. A.; S JÖSTRAND, B.; LARS, N.; KOPONEN, A.; MCDONALD, J. D. Rate-limiting mechanisms of water removal during the formation, vacuum dewatering, and wet-pressing of paper webs: A review. **Bioresources**, v. 15, n. 4, p. 9672–9755, 2020.

JANOŠOVSKÝ, J.; VARINY, M.; MIERKA, O. Cost-saving opportunities in the energy management of papermaking processes. **Chemical Engineering & Technology**, v. 43, n. 6, p. 1194–1204, 2020. DOI: 10.1002/ceat.201900483

KHAN, M. I. H.; WELSH, Z.; GU, Y.; KARIM, M. A.; BHANDARI, B. Modelling of simultaneous heat and mass transfer considering the spatial distribution of air velocity during intermittent microwave convective drying. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 153, n. 119668, p. 119668, 2020. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119668

KLOPPENBURG, G.; LI, X.; DINKELMANN, A.; FINCKH, H.; NEUMANN, J.; SIMON, J. W. Identifying microstructural properties of paper. **Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics**, v. 23, n. 3, 2023. DOI: 10.1002/pamm.202300251

LONGO, A. M. M.; FILHO, C. F. S.; BENELI, D. S. Desenvolvimento sustentável no Brasil: avanços e perspectivas em relação ao ODS 12.3 da agenda 2020 da ONU. **Livro de Memórias do Sustentare & WIPIS**, 2024. DOI: 10.29327/sustentare-wipis-2023-311985.749512

MAJEED, H.; WANG, T. Investigação do fluxo de flashing em um sifão para extrair condensado em aplicação de secador de papel. **Anais do Congresso e Exposição Internacional de Engenharia Mecânica**. ASME 2019, Volume 8: Transferência de calor e engenharia térmica. Salt Lake City, Utah, EUA. 11 a 14 de novembro de 2019. V008T09A028. ASME. DOI: 10.1115/IMECE2019-10318

DIXIT, M.; KUMAR, G.; SHUKLA, P. Insights into the resources generation from pulp and paper industry wastes: Challenges, perspectives and innovations. **Bioresource Technology**, v. 297, n. 122496, p. 122496, 2020. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122496

MARCHEVSKY, V. M.; NOVOKHAT, O. A.; VOZNIUK, V. T.; DANCHYSHEN, I. A. Intensification of paper drying on drying cylinders. **Journal of Engineering Sciences**, v. 7, n. 1, p. F45–F49, 2020. DOI: 10.21272/jes.2020.7(1).f5

MBOOWA, D. A review of the traditional pulping methods and the recent improvements in the pulping processes. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 14, n. 1, p. 1–12, 2024. DOI: 10.1007/s13399-020-01243-6

MCDONALD, D. Wet pressing and product quality: Review of previous pilot machine trials papermaking peer-reviewd. **TAPPI Journal**, v. 19, n. 7, p. 369, 2020. DOI:10.32964/TJ19.7.369

MONTEZUMA, M. G.; PEDROTTI, F. S.; SANTOS, C. B.; LIGOSKI, G. R.; DORNFELD, C. B. Cidades sustentáveis: Perspectiva sobre uso da água e do esgotamento sanitário na ISO 37120/2021. **Livro de Memórias do Sustentare & WIPIS**, 2024. DOI: 10.29327/sustentare-wipis-2023-311985.760247

NOORI, Z.; YAGOOBI, J. S.; TILLEY, B. S. Fundamental understanding of removal of liquid thin film trapped between fibers in the paper drying. **TAPPI Journal**, v. 19, n. 5, p. 249, 2020. DOI:10.32964/TJ19.5.249

ODUNLAMI, O. A.; AMOO, T. E.; ADISA, H. A.; ELEHINAFE, F. B.; OLADIMEJI, T. E. Application of mass transfer in the pulp and paper Industry - Overview, processing, challenges,



- and prospects. **Results in Engineering**, v. 20, n. 101498, p. 101498, 2023. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101498
- PATEL, S. K.; BADE, M. H. Energy targeting and process integration of spray dryer with heat recovery systems. **Energy Conversion and Management**, v. 221, n. 113148, p. 113148, 2020. DOI: 10.1016/j.enconman.2020.113148
- PATHAK, P.; SHARMA, C. Processes and problems of pulp and paper industry: an overview. **Physical Sciences Reviews**, v. 8, n. 2, p. 299–325, 2023. DOI: 10.1515/psr-2019-0042
- PEREIRA, J. Umidade no papelão ondulado. **O Papel**, 2013.
- GREEN, D. W.; PERRY, R. H.; MALONEY, J. O. **Perry's Chemical Engineers Handbook**. 9 ed. New York: McGraw-Hill, 2018. 2668 p.
- RULLIFANK, K. F.; ROEFINAL, M. E.; KOSTANTI, M.; SARTIKA, L.; EVELYN. Pulp and paper industry: An overview on pulping technologies, factors, and challenges. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 845, n. 1, p. 012005, 2020. DOI:10.1088/1757-899X/845/1/012005
- SALVADOR, J. L S.; BALEA, A.; MONTE, M. C.; NEGRO, C.; MILLER, M.; OLSON, J.; BLANCO, A. Comparison of mechanical and chemical nanocellulose as additives to reinforce recycled cardboard. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1–14, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-60507-3
- SJÖSTRAND, B. Progression of vacuum level in successive vacuum suction boxes in a paper machine – Impact on dewatering efficiency and energy demand – A laboratory study. **Bioresources**, v. 18, n. 2, p. 3642–3653, 2023. DOI: 10.15376/biores.18.2.3642-3653
- SON, S. H.; CHOI, H.-K.; KWON, J. S.-I. Multiscale modeling and control of pulp digester under fiber-to-fiber heterogeneity. **Computers & Chemical Engineering**, v. 143, n. 107117, p. 107117, 2020. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2020.107117
- TANER, T. Optimisation processes of energy efficiency for a drying plant: A case of study for Turkey. **Applied Thermal Engineering**, v. 80, p. 247–260, 2015. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.01.076
- TAPPI**. Dryer section performance monitoring, Technical Information Paper TIP 0404-33. Peachtree Corners, GA: TAPPI Press, 2022. 15 p.
- TAQIYUDDIN, A.; ABDURRAHMAN, R. Calculation analysis of steam consumption efficiency on the dryer section in paper machine. **Jurnal Proksima**, v. 1, n. 2, p. 54-59, 2023. DOI: 10.31258/proksima.v1i2.15
- TAWFIK, A.; BAKR, M. H.; NASR, M.; HAIDER, J.; MESFER, M.; LIM, H.; QYYUM, M. A.; LAM, S. S. Economic and environmental sustainability for anaerobic biological treatment of wastewater from paper and cardboard manufacturing industry. **Chemosphere**, v. 289, n. 133166, p. 133166, 2022. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.133166
- YAN, Y.; WEN, L. Numerical simulation of heat pump drying system for paper exhaust hood. **Research Square**, v. 1, 2022. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1895652/v1
- ZHANG, Y.; HONG, M.; LI, J.; REN, J.; MAN, Y. Energy system optimization model for tissue papermaking process. **Computers & Chemical Engineering**, v. 146, n. 107220, p. 107220, 2021. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2020.107220