

## ROTAS PARA POTENCIAIS GANHOS NA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E NA GESTÃO HÍDRICA E NA BUSCA DE REDUÇÕES NA INTENSIDADE DE EMISSÕES DA INDÚSTRIA BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL

Mauro Donizeti Berni<sup>1</sup>  
Flávio Roberto de Carvalho Mathias<sup>1</sup>  
Sergio Valdir Bajay<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Universidade Estadual de Campinas*

DOI: 10.47168/rbe.v28i4.755

### RESUMO

Neste trabalho foram analisados dados recentes de consumo específico de energia e de água, e de intensidade de emissões na produção de celulose de mercado e de papel, em fábricas de celulose, fábricas de papel e em plantas integradas. Utilizando tais dados, junto com estatísticas de desempenho das melhores tecnologias e práticas disponíveis no mercado, são estimados potenciais técnicos de melhorias nas plantas brasileiras em relação a estes três indicadores. Medidas que podem concretizar esses potenciais são mencionados no trabalho, com destaque para as que proporcionam ganhos em mais de um desses indicadores. Novos programas governamentais que podem aumentar os ganhos nesses três tipos de indicadores também são propostos aqui.

Palavras-chave: Eficiência energética; Economia de água; Redução de emissões.

### ABSTRACT

Recent data on the specific energy and water consumption, and the emissions intensity in the production of market pulp and paper, in pulp mills, paper mills and in integrated plants were evaluated in this paper. Using these data, together with performance statistics of the best technologies and practices available in the market place, technical potentials for improvements in the Brazilian plants regarding these three indicators are estimated. Measures that can materialize these potentials are presented, highlighting those that can improve more than one of the indicators. New government programs that can increase the gains in these three types of indicators are also proposed here.

Keywords: Energy efficiency; Water economy; Emissions reduction.

## 1. INTRODUÇÃO

O setor de celulose e papel (C&P) destaca-se no parque industrial brasileiro, tendo contribuído, em 2020, com 0,4% do PIB nacional e 2,5% de seu componente industrial. Naquele ano, o país foi o segundo maior produtor e o maior exportador mundial de celulose, tendo destinando 75% da sua produção de 20,9 milhões de toneladas para o mercado externo, com um superávit de 6,9 bilhões de dólares na balança comercial desta *commodity*. A maior parte da produção nacional de papel, de 10,2 milhões de toneladas em 2020, foi destinada ao mercado interno. O setor pode ser segmentado em plantas de celulose, plantas de papel utilizando celulose de mercado, papéis reciclados, ou ambos, e plantas integradas, que produzem C&P.

O setor é um grande consumidor de energia e água, e suas emissões são significativas. É o terceiro maior consumidor de energia na indústria brasileira. Seu consumo energético passou de 5% do consumo energético industrial em 1970, para 16% em 2020, com um crescimento médio de 5,4% a.a.

O cozimento da madeira para extração da polpa no processo *Kraft*, principal processo de produção de celulose no Brasil, gera um líquido rico em compostos de sódio e matéria orgânica, o licor negro. Este é queimado em caldeiras para recuperação de reagentes químicos, produção de vapor e geração de eletricidade. Algumas plantas já realizam biorrefinamento, produzindo hidrogênio verde e metanol consumidos nas próprias plantas, e outros produtos, como a lignina. As unidades também realizam cogeração a partir de caldeiras de biomassa, fazendo com que essa indústria tenha índice de renovabilidade acima de 85%, e elevada autoprodução de energia elétrica.

O processo de produção de papel é diferenciado, com menor consumo energético específico e sem coprodutos para viabilizar a cogeração. Há consumo de energia elétrica em basicamente todas as etapas, como prensagem e refino, e demanda de vapor para secagem.

As próximas seções apresentam, nesta sequência: (i) potenciais de redução dos consumos específicos de energia e água deste segmento industrial, e das suas emissões de gases que causam o efeito estufa; (ii) medidas que podem concretizar esses potenciais; (iii) propostas de novos programas governamentais de fomento a ganhos de eficiência na indústria brasileira; e (iv) as conclusões do trabalho.

## 2. POTENCIAIS DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E DE ÁGUA, E DE REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES QUE CAUSAM O EFEITO ESTUFA

O monitoramento dos consumos específicos de energia, de água e de emissões, e a adoção de medidas visando a sua redução, são importantes nessa indústria. Os potenciais ganhos desses indicadores são elevados, conforme apresentado nas próximas subseções.

### 2.1 Potenciais ganhos de eficiência energética

Em uma mesma rota tecnológica, como o processo *Kraft*, o consumo específico de energia térmica pode variar de 10 a 14 GJ/t, enquanto o consumo específico de energia elétrica varia de 600 a 1200 kWh/t (EUROPEAN COMMISSION, 2001).

Em meados de 2014 houve uma fusão entre a Associação Brasileira de Celulose e Papel (Bracelpa) e algumas outras associações que têm florestas plantadas como principal matéria prima, formando a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). Um aspecto negativo dessa fusão foi a descontinuidade da publicação de estatísticas detalhadas da indústria de papel e celulose, como as contempladas anteriormente nos relatórios estatísticos da Bracelpa, o que dificulta a realização de estudos detalhados sobre consumo e autoprodução de energia nesta indústria. Hoje, por exemplo, a IBÁ não disponibiliza estatísticas sobre a produção de celulose e papel por tipo de fábrica.

Apesar desta dificuldade, neste trabalho se apresenta uma estimativa aproximada do potencial técnico total de conservação de energia nessa indústria, em 2020, cujo cálculo requer uma estimativa do consumo energético específico das melhores tecnologias e práticas disponíveis no mercado (BATs – *Best Available Technologies*), que representaram o *mix* brasileiro de produção de celulose e papel naquele ano. Para tanto é necessário, primeiro, se obter a distribuição dos componentes da produção física desta indústria naquele ano e se estimar em que tipos de fábricas estes componentes foram produzidos.

Do portal da IBÁ na Internet (IBÁ, 2022) se pode compilar que a produção física total desta indústria em 2020, que foi  $31.137 \times 10^3$  t, foi composta por  $20.953 \times 10^3$  t de celulose,  $5.496 \times 10^3$  t de papéis para embalagens,  $2.008 \times 10^3$  t de papéis de imprimir e escrever,  $1.300 \times 10^3$  t de papéis para fins sanitários,  $800 \times 10^3$  de papel cartão,  $500 \times 10^3$  t de outros tipos de papéis e  $80 \times 10^3$  t de papel imprensa. As participações relativas destes componentes da produção física setorial são os pesos da média ponderada no cálculo do consumo energético específico das BATs que representam o *mix* de produção de celulose e papel no país em 2020.

A estimativa dos tipos de fábricas que produzem cada um dos componentes da produção física de papel e celulose requer a adoção de várias hipóteses, já que não existem dados recentes publicados a respeito. Como a maior parte da produção brasileira de celulose utiliza o processo *Kraft* para fabricar celulose branqueada de eucalipto, assume-se aqui que toda a produção emprega este processo e que o consumo energético específico de sua BAT é 11,1 GJ/t (MATHIAS, 2019). Segundo a Associação Nacional dos Aparistas de Papel (ANAP), em 2019 foram recicladas as seguintes porcentagens de tipos de papel: aparas de papel de embalagem – 79,8% do consumo aparente, ou 71,7% da produção; aparas de papel de imprimir e escrever – 35,0% do consumo aparente, ou 25,9% da produção; e aparas de papel cartão – 5,6% do consumo aparente, ou 4,6% da produção (ANAP, 2020). Um índice de perdas de massa de 10% é comum na conversão de aparas em papel reciclado; este valor foi adotado aqui para todos os tipos de aparas. Assumiu-se, então, que 64,5% ( $71,7\% \times 0,9$ ) da produção de papel para embalagens ocorreu em fábricas de papel reciclado, com um consumo energético específico de sua BAT de 5,381 GJ/t (JACOBS e IPST, 2006), e o restante foi produzido em fábricas integradas, com uma BAT de consumo energético específico de 17,6 GJ/t (MATHIAS, 2019). Analogamente, foi assumido que 23,3% ( $25,9\% \times 0,9$ ) da produção de papéis de imprimir e escrever e 4,1% ( $4,6\% \cdot 0,9$ ) da produção de papel cartão ocorreram em fábricas de papéis reciclados, cujos consumos energéticos específicos das BATs são assumidos como sendo 5,381 GJ/t (JACOBS e IPST, 2006). O restante da produção de papéis de imprimir e escrever e de papel cartão em 2019 teria sido proveniente de fábricas integradas, cujos consumos energéticos específicos das BATs são de 18,3 GJ/t e 11,8 GJ/t, respectivamente (MATHIAS, 2019). Assumiu-se que toda a produção de papéis para fins sanitários e de outros tipos de papéis, entre os quais se destacam os chamados papéis especiais, ocorre em fábricas de papel que utilizam celulose de mercado, e cujos consumos energéticos específicos de suas BATs são, respectivamente, 10,5 GJ/t e 10,4 GJ/t (MATHIAS, 2019). Finalmente, assumiu-se que todo o papel jornal é produzido em fábricas integradas, com um consumo energético específico de 6,6 GJ/t na BAT correspondente (MATHIAS, 2019).

A utilização destes valores permite calcular o consumo energético específico da BAT equivalente, que representa o mix de produção de celulose e papel no país em 2020, como sendo de 11,1 GJ/t. Confrontando este valor com o consumo energético específico da indústria de papel e celulose brasileira em 2020, que foi de 17,7 GJ/t, se chega a um potencial técnico de conservação de energia de 37,2%.

No âmbito do Projeto Meta, em 2016, a QUALITEC–APPLUS levantou, através de visitas técnicas, e analisou dados sobre consumos

energéticos específicos de 17 fábricas de papel e celulose, agregadas em quatro categorias: produtores de celulose de mercado; fábricas integradas; fabricantes de papel a partir, majoritariamente, de celulose de mercado; e fabricantes de papel a partir de, majoritariamente, aparas. O relatório da QUALITEC–APPLUS (2018) não apresenta a desagregação da amostra de 17 fábricas entre as quatro categorias supracitadas e nem classifica os consumos energéticos específicos por tipo de celulose e de papel.

Entre os produtores de celulose de mercado, a QUALITEC–APPLUS encontrou consumos específicos de energia elétrica variando entre 620 kWh/t e 850 kWh/t, com uma média de 698,42 kWh/t (2,514 GJ/t), e consumos específicos de energia térmica entre 11 GJ/t e 18 GJ/t, com uma média de 15,623 GJ/t. Comparando, então, o consumo energético específico total médio desta amostra de produtores de celulose de mercado, de 18,137 GJ/t, com o consumo energético específico da BAT do processo *Kraft*, de 11,1 GJ/t, se obtém um potencial técnico de conservação de energia de 38,8%.

Na amostra de fabricantes de papel a partir, majoritariamente, de celulose de mercado, a QUALITEC–APPLUS calculou um consumo específico médio de energia elétrica de 960,78 kWh/t (3,459 GJ/t) e um consumo específico médio de energia térmica de 7,270 GJ/t. A comparação entre o consumo energético específico total médio, de 10,729 GJ/t, com o consumo energético específico médio da BAT correspondente (valor médio entre os diversos tipos de papel), de 7,7 GJ/t, permite o cálculo de um potencial técnico de conservação de energia de 28,2%.

Entre as plantas integradas analisadas pela QUALITEC–APPLUS, encontrou-se um consumo específico médio de energia elétrica de 1.309,13 kWh/t (4,713 GJ/t) e um consumo específico médio de energia térmica de 14,632 GJ/t. Comparando o consumo energético específico total médio dessas plantas, de 19,345 GJ/t, com o consumo energético específico médio da BAT correspondente (valor médio entre os diversos tipos de papel), de 18 GJ/t, obtém-se um potencial técnico de conservação de energia de 6,9%, valor que parece ser muito baixo, provavelmente pelo fato da amostra de plantas não ter contemplado diversas fábricas integradas antigas, de baixo rendimento.

Entre os fabricantes de papel a partir, majoritariamente, de aparas, a QUALITEC–APPLUS calculou um consumo específico médio de energia elétrica de 543,84 kWh/t (1,958 GJ/t) e um consumo específico médio de energia térmica de 4,970 GJ/t. O potencial técnico de conservação de energia obtido para este tipo de fabricante de papel, de 22,3%, reflete o consumo energético específico total médio destas fábricas, de 6,928 GJ/t, vis-à-vis o consumo energético específico médio da BAT de papel-cartão reciclado, de 5,381 GJ/t (JACOBS e IPST, 2006).

## 2.2 Potenciais economias de água

O consumo específico de água no processo *Kraft* varia de 20 a 100 m<sup>3</sup>/t (EUROPEAN COMMISSION, 2001).

O consumo específico de água captada na indústria de celulose brasileira foi reduzido, em média, 4% ao ano no período de 1970 a 2015, quando se observou uma faixa de consumo específico entre 22 e 40 m<sup>3</sup>/t celulose (MATHIAS, 2019). Comparando o valor médio desta faixa, de 31 m<sup>3</sup>/t celulose, com o consumo específico da BAT do processo *Kraft*, 20 m<sup>3</sup>/t celulose, obtém-se um potencial técnico de economia de água de 35% nesta indústria, em 2015.

## 2.3 Potenciais reduções nas emissões de gases de efeito estufa

O setor diminuiu a intensidade das emissões de CO<sub>2</sub> em 8,2% na última década, de 0,171 para 0,157 GgCO<sub>2</sub> eq/t, devido a melhorias na sua eficiência energética e substituição de combustíveis fósseis. Existe, ainda, um potencial significativo de redução dessas emissões.

## 3. MEDIDAS CAPAZES DE MATERIALIZAR ESSES POTENCIAIS

As melhores práticas e tecnologias disponíveis no mercado, e/ou emergentes, que promovem a proteção ambiental e oportunidades de melhoria na eficiência energética dos equipamentos e processos na produção de P&C (fábricas integradas e não integradas a partir de pasta de madeira pelo processo *Kraft*), em curto e médio prazo, são identificadas a seguir, além do benefício ambiental que possibilitam às instalações industriais.

Entre as medidas transversais e melhores práticas para o segmento de C&P destacam-se: a utilização, pelas empresas, de um sistema de gestão da energia, como o proposto pela norma ISO 50.001 (*Energy Management Systems*); emprego de um sistema de monitoramento e gestão do consumo e do tratamento de água e efluentes, contemplando aumentos do reuso (recirculação ou reutilização) de água e efluentes; gerenciamento de resíduos com foco na redução da geração na fonte, no uso energético de resíduos do processo, no aumento da reciclagem e na reutilização interna de materiais; e o monitoramento e controle das emissões de gases de efeito estufa (GEE) decorrentes dos processos industriais e da combustão de combustíveis fósseis nas fábricas e nas florestas que suprem a madeira para produção de celulose, incluindo o transporte da madeira para as fábricas.

Na fabricação de celulose as melhores tecnologias incluem a substituição de transportadores pneumáticos por transportadores de correia, que podem propiciar uma redução no consumo de energia em 17,2 kWh/t no transporte de cavacos e aparas. Na preparação de material, o descascador tipo berço consome menos energia do que os outros métodos de descasque; estima-se uma redução no consumo energético em 0,025 GJ/t de toras descascadas e apresenta um potencial de redução nas emissões de 2,93 kg CO<sub>2</sub>/t de madeira. A implantação de um sistema de controle contínuo do digestor possui um potencial de economia de energia de 1%. A utilização do aditivo auxiliar de polpa -ChemStone OEA-11 aumenta a eficácia do licor de cozimento, previne o cozimento excessivo e melhora a uniformidade e o rendimento do produto; estima-se uma economia de energia de 0,131 GJ/t de madeira processada. Foram relatadas economias de energia de 8 a 10% com o emprego de fosfato como aditivo na polpação.

Na fabricação de papel, a utilização de unidades de cogeração pode melhorar a eficiência energética na produção e gerar uma economia com combustíveis de 10 a 20%. A otimização do sistema de vácuo para desaguamento na máquina de papel pode gerar economias de energia entre 20 e 40%. A adoção da tecnologia *Evaporador Thermodyne* reduz o consumo de energia na secagem do papel em até 50%. O uso do *software Dryer Management System* no controle do secador pode reduzir o consumo de vapor em 2 t/h. A otimização dos requisitos de ar da máquina de papel pode gerar uma redução do consumo energético específico de até 0,76 GJ/t de papel e uma redução de até 6,3 kWh/t de papel, no consumo específico de eletricidade. A substituição dos secadores tradicionais por sifões estacionários pode gerar uma economia de até 0,89 GJ/t de papel, devido à maior eficiência na secagem. Estima-se uma economia de até 1,1 GJ/t de papel com o emprego de cilindro de secagem direta. Uma redução no consumo de vapor de 1,6 GJ/t de papel pode ser obtida com a utilização do sistema Condebelt na secagem do papel. O emprego da radiação infravermelha para controle do perfil de umidade da folha de papel propicia uma economia de 0,7 GJ/t de papel. Estima-se uma economia de 5 GJ/t de papel com a utilização da tecnologia de conformação a seco da folha de papel. O pré-tratamento da polpa antes da secagem possibilita uma economia de 1,7 GJ/t de papel.

Descrições mais detalhadas sobre essas tecnologias podem ser encontradas em IETD/IIP (2019), EPE (2018) e EUROPEAN COMMISSION (2015).

#### 4. PROPOSTAS DE NOVOS PROGRAMAS GOVERNAMENTAIS DE FOMENTO A GANHOS DE EFICIÊNCIA NA INDÚSTRIA BRASILEIRA

Em um recente trabalho de consultoria para o Procel, visando prover subsídios para o Plano Decenal de Eficiência Energética (PDEf), foram propostos novos programas governamentais de eficiência energética para diversos setores no Brasil, inclusive o setor industrial (SANTOS et al., 2021).

Das cinco propostas de novos programas de eficiência energética para o setor industrial, três envolvem participação voluntária e duas são mandatórias. Três das cinco propostas envolvem estruturas de mercado. Todas as cinco propostas, com algumas variantes, estão sendo aplicadas com sucesso em diversos países (IX ESTUDOS E PROJETOS, 2020).

A primeira ação de cunho voluntário e envolvendo a criação de um mercado associado, concerne leilões de eficiência energética, tanto leilões descentralizados, no âmbito do Programa de Eficiência Energética (PEE) da ANEEL, como, sobretudo, leilões centralizados. Os leilões podem alavancar muito mais projetos industriais do que os programas e mecanismos de eficiência energética hoje existentes no Brasil conseguem atrair, sobretudo projetos que, de outra forma, provavelmente não se viabilizariam por terem períodos de retorno do investimento superiores aos atualmente praticados na indústria.

Ainda de cunho voluntário e com um mercado associado, a segunda proposta para o setor industrial é a ampliação dos acordos voluntários para empresas não energointensivas e fábricas de médio porte, neste último caso junto com a criação de redes de eficiência energética.

A tendência mundial é a de se adotar uma combinação de mecanismos mandatórios com instrumentos de mercado para se obter ganhos substanciais de eficiência energética nos vários setores da economia e, particularmente, no setor industrial, com vistas a uma significativa descarbonização das matrizes energéticas.

Os consultores propõem, como um programa mandatório combinado com um instrumento de mercado, a imposição, no médio prazo, de metas de ganhos de eficiência energética para consumidores industriais energointensivos, junto com a criação de um mercado de certificados brancos para as economias de energia que excederem as metas destes consumidores, nos moldes do bem sucedido programa indiano *Perform, Achieve and Trade* (PAT). Além dessas metas, estes grandes consumidores industriais também teriam que ter um “gerente de energia” e um Sistema de Gestão da Energia.

A imposição de metas de economia de energia, no Brasil, para instalações industriais de médio porte é inviável, por conta dos elevados custos de transação que esta medida ocasionaria. Já a imposição legal de que estas instalações tenham gerentes de energia, com a responsabilidade de liberar os dados necessários para a realização de diagnósticos energéticos periódicos mandatórios por auditores de energia independentes, e pelo fornecimento de relatórios sobre o consumo energético, os resultados dos diagnósticos energéticos e a implantação das medidas de eficiência energética, é factível para este tipo de instalação e não incorre em altos custos de transação.

A quinta e última nova medida proposta para o setor industrial é a criação do Sistema Integrado de Informações em Eficiência Energética (SI2E2) e a incorporação de dados técnicos de tecnologias, consumos energéticos específicos, etc., deste setor no sistema, preenchendo uma grande lacuna hoje existente sobre estes tipos de dados na indústria brasileira.

## 5. CONCLUSÕES

A comparação do consumo energético específico do setor de C&P no país, em 2020, com os consumos energéticos específicos das melhores tecnologias disponíveis no mercado (BATs) revelou o elevado potencial técnico de 37,2%. O consumo específico de água captada na indústria de celulose brasileira foi reduzido, em média, 4% ao ano no período de 1970 a 2015. Na última década o setor diminuiu a intensidade das emissões de CO<sub>2</sub> em 8,2%, de 0,171 para 0,157 GgCO<sub>2</sub>eq/t. Portanto, há um potencial significativo para a redução dos consumos específicos de energia e água, e das emissões específicas neste importante setor da indústria brasileira. As medidas capazes de materializar este potencial e as propostas de novos programas governamentais de eficiência energética na indústria também são contribuições deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANAP. Relatório Anual 2019 - 2020. Associação Nacional de Aparistas de Papel (ANAP), 2020.

EPE/MME. Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados. Segmento celulose e papel. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética (EPE) / Ministério de Minas e Energia (MME), 2018.

EUROPEAN COMMISSION, Integrated pollution prevention and control (IPCC), reference document on Best Available Techniques in the pulp and paper industry, December, 2001.

EUROPEAN COMMISSION, Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board. Disponível em: <[http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/PP\\_revised\\_BREF\\_2015.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/PP_revised_BREF_2015.pdf)>. Acesso em: 01/02/2017.

IBA. Dados estatísticos. São Paulo: Indústria Brasileira de Árvores (IBA), 2022. Disponível em: <<https://iba.org/>>. Acesso em: 10/03/2022.

IETD/IIP. Industrial Efficiency Technology Database: Pulp and Paper. Institute for Industrial Productivity, 2019. Disponível em: <<http://www.iipinetwork.org/wp-content/ietd/content/pulp-and-paper.html#benchmarks>>. Acesso em: 16/06/2019.

IX ESTUDOS E PROJETOS, Produto 7: Propostas de Novas Ações no Setor Industrial, Prestação de Serviço de Consultoria para Elaboração do Plano Decenal de Eficiência Energética – PDEf, Provendo um Portfólio de Ações para o Avanço dos Ganhos de Eficiência Energética no Brasil, Contrato no ECE-DSS-4299/2019 com a Eletrobrás, Itajubá, MG, dezembro de 2020, 320 p.

JACOBS and IPST. Pulp and paper industry – Energy bandwidth study, report for the American Institute of Chemical Engineers, USA, August 2006.

MATHIAS, F. R. C. Gestão da energia, água e emissões em segmentos energo-intensivos da indústria brasileira, tese de doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos, agosto de 2019, FEM/Unicamp.

QUALITEC–APPLUS. Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados – Segmento celulose e papel, Projeto de Assistência Técnica dos Setores de Energia e Mineral (Projeto META), Contrato N° CT-EPE-004/2017, Rio de Janeiro, 2018.

SANTOS, A. H. M.; HADDAD, J.; BAJAY, S. V. Eficiência energética e sua inserção no planejamento energético brasileiro, Revista Brasileira de Energia, 27 (3): 85-109, 2021.