

Monitoramento e Predição da Geração de Energia em uma Indústria de Celulose no Brasil

Sérgio Henrique Saavedra Martinelli, Valmir de Jesus Ferreira, Marcos Paulo Lopes Ferreira, Reginaldo Rodrigues de Carvalho, Rayne de Souza Pereira

Resumo: As fábricas modernas de celulose branqueada geram grandes quantidades vapor e de energia elétrica pela queima de licor negro e biomassa. O licor negro é um subproduto do cozimento da madeira durante a sua transformação em celulose. A biomassa é gerada pela separação da casca das toras de madeira e pela separação dos cavacos de madeira com granulometria não conforme. A caldeira de recuperação química, a caldeira de biomassa, os turbo-geradores de dupla extração de vapor e de condensação de vapor são os equipamentos que fazem a cogeração de vapor e energia elétrica. Com o aumento crescente do preço da energia elétrica no Brasil as novas fábricas de celulose se tornaram cada vez mais energeticamente eficientes. A geração excedente de energia elétrica proporciona a receita importante no balanço financeiro dessas fábricas. As variações de processo, de operação e manutenção dessas fábricas geram oscilações nos volumes de excedente de energia, o que as obriga a comercializar parte em contratos e o restante como liquidação mensal de diferenças. O objetivo deste trabalho foi implementar um monitoramento contínuo dos consumos de vapor e energia e um modelo de predição do excedente da geração de energia de uma indústria de celulose no Brasil. Essas ferramentas proporcionaram uma melhor gestão operacional e uma previsibilidade mais antecipada para permitir a negociação mais eficiente dos contratos comerciais de energia elétrica.

Palavras chave: cogeração de energia, monitoramento, predição, produção de celulose e eficiência energética.

Power Generation Monitoring and Prediction in a Market Bleached Pulp Industry in Brazil

Abstract: Modern market bleached pulp mills generate large amounts of steam and electricity from burning black liquor and biomass. Black liquor is a byproduct of wood cooking during its transformation into cellulose. Biomass is generated by the separation of the bark from the wood logs and the separation of the wood chips with non-conforming particle size. The chemical recovery boiler, the biomass boiler, the double steam extraction and steam condensing turbo generators are the equipment that makes the cogeneration of steam and electricity. With the rising price of electricity in Brazil, the new pulp mills have become increasingly energy efficient. Excess electric power generation provides important revenue in the financial balance of these plants. Variations in the process, operation and maintenance of these plants generate fluctuations in surplus energy volumes, which forces them to trade part in contracts and the remainder as monthly settlement of differences. The objective of this work was to implement a continuous monitoring of steam and energy consumption and a prediction model of the power generation surplus of a market bleached pulp industry in Brazil. These tools provided better operational management and earlier predictability to enable more efficient negotiation of commercial electricity contracts.

Keywords: energy cogeneration, monitoring, prediction, market bleached pulp and energy efficiency.

1. Introdução

A polpa de celulose branqueada de mercado é produzida pelo processo Sulfato, que utiliza o licor branco a base de Hidróxido de Sódio e Sulfeto de Sódio para cozimento dos cavacos de madeira em equipamentos chamados de digestores. Esse processo é caracterizado pelo reaproveitamento dos produtos químicos inorgânicos, pela queima dos subprodutos orgânicos, pela geração de grandes quantidades de vapor e energia elétrica e pelo fechamento de circuito de efluentes. A utilização do Sulfeto de Sódio no licor alcalino aumenta o rendimento do processo de cozimento dos cavacos de madeira e melhora a qualidade da celulose produzida quando comparada ao processo Soda, que utiliza apenas o Hidróxido de Sódio no licor de cozimento.

A polpa celulósica pode ser de fibra curta, produzida com madeira de folhosas, dentre elas por exemplo o eucalipto, ou de fibra longa, produzida com madeira de coníferas, dentre elas dentre elas por exemplo o pinus. Os dois tipos de celulose de mercado possuem características distintas e são aplicadas para diferentes tipos de papel. Pela diferença na composição destas madeiras, os processos de fabricação são similares, mas não idênticos. A quantidade específica de licor de cozimento, o rendimento do processo de cozimento dos cavacos de madeira, a quantidade de geração de licor negro, o consumo de vapor para cozimento, a eficiência do processo de deslignificação e de branqueamento da celulose são exemplos de diferenças do processo de fabricação de polpa celulósica utilizando os dois tipos de madeira.

O rendimento do processo de cozimento dos cavacos de madeira é a relação percentual entre a massa de polpa celulósica produzida e a massa de madeira seca utilizada no cozimento. A composição de celulose e hemicelulose na madeira em detrimento a composição de lignina e extrativos da madeira influencia diretamente este rendimento.

O licor negro é uma solução alcalina de compostos orgânicos e inorgânicos gerado no cozimento dos cavacos de madeira com licor de cozimento e aquecimento com vapor. Ele é gerado numa concentração de sólidos totais médio de aproximadamente 14% em massa, sendo que o restante é água. Os compostos orgânicos representam na média aproximadamente dois terços dos sólidos totais do licor negro, enquanto que os compostos inorgânicos representam um terço. Quando concentrado acima de 58% o licor negro pode ser queimado sem necessidade de combustível auxiliar. Fabricas modernas o concentram entre 75 a 80% de sólidos totais em plantas de evaporação de 6 ou 7 múltiplo-efeitos. Apesar desse processo fazer o uso múltiplo do vapor de aquecimento, ele consome grandes quantidades de vapor de baixa pressão, da ordem de 4 bar-g. Plantas de evaporação de 7 efeitos possuem economia de vapor da ordem de 6,3, o que significa que há a evaporação de 6,3 toneladas de água evaporada do licor negro para cada tonelada de vapor vivo consumido.

O processo de cozimento dos cavacos de madeira consiste na mistura destes com licor de cozimento num equipamento pressurizado e a temperaturas acima de 140 °C. O fator H é um índice de condição do cozimento que correlaciona o tempo e a temperatura do cozimento. O álcali aplicado é a relação percentual entre a quantidade de álcali efetivo residual e a quantidade de cavaco de madeira em base seca no processo de cozimento. O álcali efetivo aplicado é caracterizado pela somatória da concentração de Hidróxido de Sódio com metade da concentração de Sulfeto de Sódio presente no licor de cozimento, expresso em gramas de Hidróxido de Sódio por litro. O grau de deslignificação da polpa celulósica é medido pelo número Kappa. Como a composição da madeira varia entre gênero, espécie e condições (idade, tempo de corte, posição ao longo da árvore), para mesmo número Kappa, diferentes

níveis de fator H e de álcali efetivo aplicado são necessários.

Para a produção dos cavacos de madeira, a madeira em toras é alimentada nas mesas de recepção e alimentam os descascadores de madeira. Esses equipamentos são cilíndricos rotatórios com ranhuras, que pela ação da fricção, ele retira mecanicamente as cascas de madeira. Posteriormente essas madeiras descascadas são picadas em cavacos em equipamentos de picagem com facas e contra facas. O peneiramento dos cavacos elimina tamanho pequenos (parcela dos finos) e grandes (parcela de “over size”). Os cavacos classificados são estocados em pilhas de cavacos e alimentam os digestores. Este processo consome energia elétrica, mas não consome vapor. A casca de madeira e os cavacos desclassificados nas peneiras granulométricas são queimados na caldeira de biomassa para geração de vapor.

A polpa celulósica marrom produzida nos digestores é depurada para retirada de nós de madeira não cozidos e lavada para retirada de licor residual. Depois ela é tratada com oxigênio para retirada de parte da lignina residual presente nesta polpa. O processo de branqueamento dessa polpa consiste na utilização de estágios de branqueamento com estágios de lavagem da polpa. Diferentes processos podem ser utilizados no branqueamento da polpa celulósica, em que o mais utilizado é o ECF (“Elemental Chlorine Free”) que significa que é um processo livre de cloro elementar. Os produtos químicos utilizados nesse processo são o Hidróxido de Sódio, o Ácido Sulfúrico, o Oxigênio, o Dióxido de Cloro e o Peróxido de Hidrogênio. A lavagem da polpa celulósica marrom e branqueada é realizada com condensado recuperado do processo de evaporação do licor negro e água industrial. O processo de cozimento e branqueamento consomem vapor e energia elétrica.

A polpa celulósica branqueada é estocada nas torres de massa branqueada e alimenta as máquinas de secagem. Essas máquinas elevam o teor seco da polpa de aproximadamente 12% para 90% de sólidos totais. O processo é composto pelas etapas de desaguamento na mesa plana com vácuo, prensagem e secagem com vapor de baixa pressão (aproximadamente 4,0 bar-g). A polpa celulósica é embalada em fardos. O processo de secagem consome energia elétrica e vapor.

O licor negro gerado no cozimento dos cavacos de madeira é alimentado na caldeira de recuperação química após ser devidamente concentrado na planta de evaporação de licor negro. Esta caldeira faz a incineração dos compostos orgânicos do licor negro, gerando energia térmica e a recuperação dos compostos inorgânicos do licor negro, gerando o licor verde. Essa caldeira gera grandes quantidades de vapor de alta pressão pelo aproveitamento da energia térmica.

O licor verde é uma solução alcalina de compostos inorgânicos fundidos na caldeira de recuperação diluídos com licor branco fraco recuperado do processo. Esse licor é filtrado para eliminação das impurezas não queimadas e posteriormente reagido quimicamente com Óxido de Cálcio em equipamentos chamados de apagador e reatores. Os produtos dessa reação são o Hidróxido de Sódio, que em conjunto com o Sulfeto de Sódio, compõem o licor branco de cozimento e a lama de cal que é a base de Carbonato de Cálcio. Por ser insolúvel, a lama de cal é separada facilmente do licor branco pelo processo de filtração em filtros de discos rotativos e pressurizados. O licor branco filtrado é armazenado no tanque de licor branco e bombeado para o digestor para realizar novos cozimentos.

A lama de cal (a base de Carbonato de Cálcio) é alimentada em fornos rotativos que transformá-la em cal (a base de Óxido de Cálcio). Essa transformação é realizada pelo

aquecimento da lama de cal com ar de combustão aquecido com combustíveis como óleo de baixo ponto de fulgor, gás natural, gás de biomassa degaseificada ou queima direta de biomassa, dentre outros tipos de combustíveis secundários. A cal produzida é retornada para o apagador para preparação do licor branco de cozimento. Os processos de fabricação do licor branco e recuperação da cal consomem energia elétrica e vapor.

As caldeiras de recuperação química e de biomassa geram vapor de alta pressão, da ordem de 100 bar-g e alimentam turbinas a vapor para geração de energia elétrica. A turbina de contrapressão reduz a pressão para média pressão, da ordem de 8 bar-g, e baixa pressão, da ordem de 4 bar-g, para alimentação ao processo produtivo. Nessa turbina há a geração de um MWh para 6,4 toneladas de vapor de alta pressão. A outra turbina é de condensação, em que o total de vapor que é gerado e que o processo não o consome é condensado. Nesta turbina há a geração de um MWh para cada 3,5 toneladas de vapor de alta pressão.

A Figura 1 apresenta o desenho esquemático da fabricação de celulose de uma fábrica de referência no Brasil, com as fontes de energia primária, secundária e terciária.

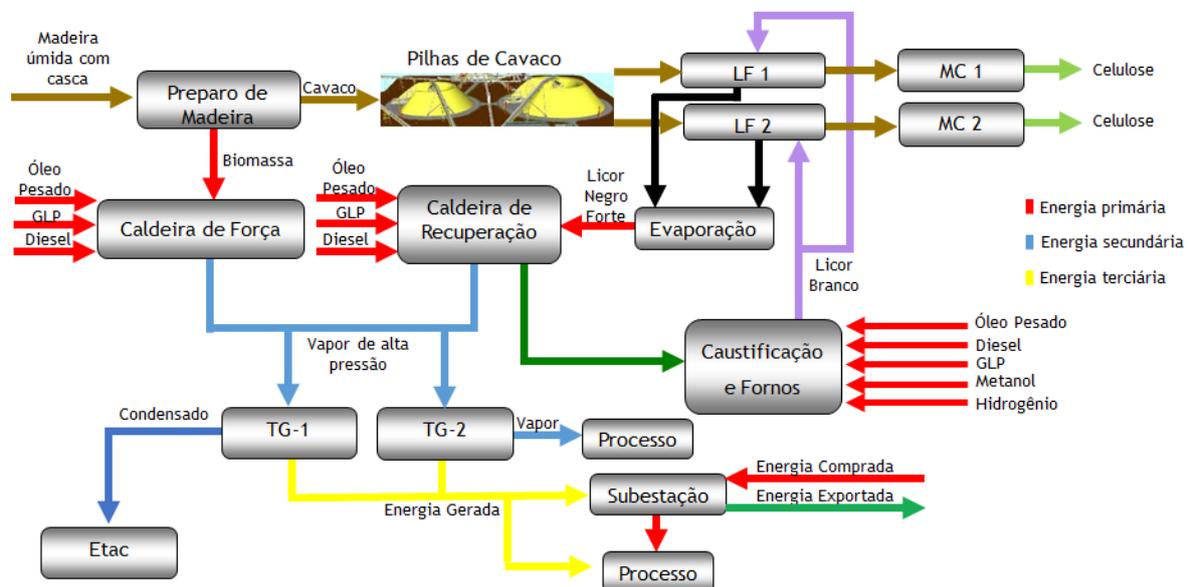


Figura 1 – Desenho esquemático do processo de fabricação de celulose

Devido à complexidade do processo de fabricação de celulose e sua característica cíclica, o processo de cogeração de energia elétrica possui uma imprevisibilidade. Por esse motivo, normalmente as fábricas comercializam apenas parte do excedente de energia previsto como contratos. Como os contratos firmados exigem o fornecimento da energia, em caso de não geração do montante, o vendedor é obrigado a compra-lo e direcioná-lo ao consumidor do contrato. Para reduzir o risco de gastos excessivos com a compra de diferenças em relação ao volume do contrato, as empresas deixam parte da energia excedente prevista como liquidação mensal de diferenças, precificada a PLD (Preço de Liquidação de Diferenças) mensal, como média dos valores semanais divulgados pela CCEE (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica). Esses preços variam conforme o custo de geração de energia elétrica. Como a matriz brasileira é em grande maioria por usinas hidrelétricas, períodos de estiagem geram um aumento dos preços de energia no PLD.

Uma maior previsibilidade da geração de energia excedente da fábrica de celulose pode, por exemplo, trazer vantagens comerciais pela compra antecipada da diferença de energia não

gerada para atendimento aos contratos, a preços menores de PLD. Ela também pode comercializar mais energia em contratos, caso consiga prever melhor desempenho de geração de energia e se os preços de contrato são maiores que as previsões dos preços de PLD.

As fábricas de celulose possuem uma boa confiabilidade para cumprimento do cronograma de parada geral anual, que ocorre a cada 12 a 15 meses de operação e dura aproximadamente 11 dias. Além disso, elas possuem uma boa confiabilidade de paradas setoriais, por exemplo, a cada 3 meses em média há paradas para troca de vestimentas das máquinas secadoras de celulose, que dura aproximadamente 8 horas. Entretanto, elas têm dificuldade para monitoramento da eficiência energética. Uma das razões para isso pode ser pelo fato de que os índices de consumo específico de vapor e energia dos processos variam grandemente pelo ritmo de produção. Ou seja, quando há alguma parada não programada estes índices diários contaminam os índices mensais. Isso faz com que as fábricas concentrem seus esforços em garantir a estabilidade da produção, evitando grandes reduções ou paradas de produção.

Apesar da receita da venda de energia elétrica compor uma parcela importante para a fábrica de celulose, esta não se compara a receita da venda da celulose de mercado. Por esse motivo, muitas vezes se opera a fábrica em níveis de eficiência energética mais baixo em detrimento a se manter o alto ritmo de produção de celulose, evitando paradas não programadas ou postergando a parada até coincidir com uma parada programada.

O objetivo desse trabalho é melhorar o monitoramento e predição da geração de energia elétrica de uma fábrica de celulose branqueada de mercado no Brasil. Com isso, haverá um melhor acompanhamento da eficiência energéticas dos processos e uma maior agilidade na correção de desvios. Além disso, com uma melhor predição da geração de energia, haverá uma maior antecipação da previsão da geração de energia e possibilidade de obtenção de vantagens de comercialização de energia.

Os desafios para esse trabalho é a alta complexidade do processo produtivo e de cogeração, a característica cíclica do processo, a separação dos fatores de redução e paradas de produção em relação aos fatores de redução da eficiência energética dos processos e agrupar esse monitoramento numa gestão da rotina e visualização contínua e on-line desses indicadores.

2. Revisão Bibliográfica

FOEKEL (2010) apresentou um guia referencial completo sobre eco eficiência energética para a indústria de papel e celulose de eucalipto no Brasil pelo processo sulfato. Ele apresentou definições conceituais de eco eficiência, energia primária versus energia de processo e eficiências térmicas, elétricas e mecânicas. Ele discutiu as tecnologias atualmente empregadas no setor e sua relação com a eficiência energética. Ele apresentou alguns casos de sucesso para aumento da eficiência energética neste setor e tendências de futuro que impulsionarão a melhoria deste indicador.

ALMEIDA (2013) analisou as trajetórias da matriz energética da indústria de celulose e papel no curto e médio prazo, identificou os fatores de transformação dessa matriz ao longo dos anos e definiu tendências para o mercado de combustíveis e desenvolvimento energético deste setor.

BACHMANN (2009) realizou um estudo de benchmarking energético na indústria de celulose e papel. Neste estudo os principais indicadores de consumo específico de vapor e energia no

processo de fabricação foram definidos. Ele apresentou valores comparativos de consumo específico de vapor nos processos de cozimento da madeira e secagem da celulose de várias fábricas de celulose e de celulose integradas com papel. Da mesma forma para valores comparativos de consumo específico de energia elétrica. As diferenças entre consumos específicos de vapor e energia entre essas fábricas demonstraram as oportunidades de otimização energética.

FRANCIS et al. (2002) demonstraram o potencial para redução do uso energético nas fábricas de celulose e papel do Canadá e demonstrou formas para que esse potencial seja alcançado. Foram desenvolvidos “*benchmarking*” em indústrias dos dois maiores segmentos do setor de celulose do Canadá, sendo o de polpa sulfato de mercado e papel de impressão. As conclusões foram que há um considerável potencial para redução do consumo de vapor e energia nas fábricas de celulose e papel estudadas e que as fábricas existentes podem se aproximar das menores demandas de vapor e energia das fábricas modernas por meio de um programa de eficiência energética.

3. Metodologia

A mapeamento dos processos foi dividida em três partes:

a) Processos que consomem energia elétrica:

- Monitorar o consumo específico geral de energia elétrica ao longo do tempo;
- Identificar os processos que consomem energia elétrica;
- Priorizar os processos que mais consomem energia elétrica;
- Criar indicadores de consumo específico de energia elétrica por processos;
- Criar indicadores de consumo específico de energia, excluindo-se períodos de parada ou reduções significativas de produção.

b) Processos que consomem vapor:

- Monitorar o consumo específico geral de vapor dos processos ao longo do tempo;
- Identificar os processos que consomem vapor;
- Priorizar os processos que mais consomem vapor;
- Criar indicadores de consumo específico de vapor por processos;
- Criar indicadores de consumo específico de vapor, excluindo-se períodos de parada ou reduções significativas de produção.

c) Processos que geram vapor e energia elétrica:

- Monitorar a geração específica de vapor e de energia elétrica ao longo do tempo;
- Identificar os processos que geram vapor e energia elétrica;
- Priorizar os processos que mais geram vapor e energia elétrica;

Para todos os casos, se faz necessário:

- Comparar os consumos específicos de vapor e energia para cada processo com os

valores objetivos. Da mesma forma, comparar as gerações específicas de vapor e energia;

- Gerar um valor de diferença entre o consumo medido e o valor objetivo;
- Valorar as diferenças de cada processo, considerando como referência o preço orçado da energia de PLD da unidade fabril;
- Fazer a predição da geração de energia elétrica e do excedente de energia elétrica do mês seguinte com base nos consumos específicos de vapor e energia médios dos processos no mês atual;
- Criar uma planilha de monitoramento e predição de energia on-line, de forma que as informações sejam de fácil visualização e interpretação pela equipe de operação.

4. Resultados

A figura 2 apresenta o consumo específico geral de energia elétrica da unidade fabril ao longo do tempo.

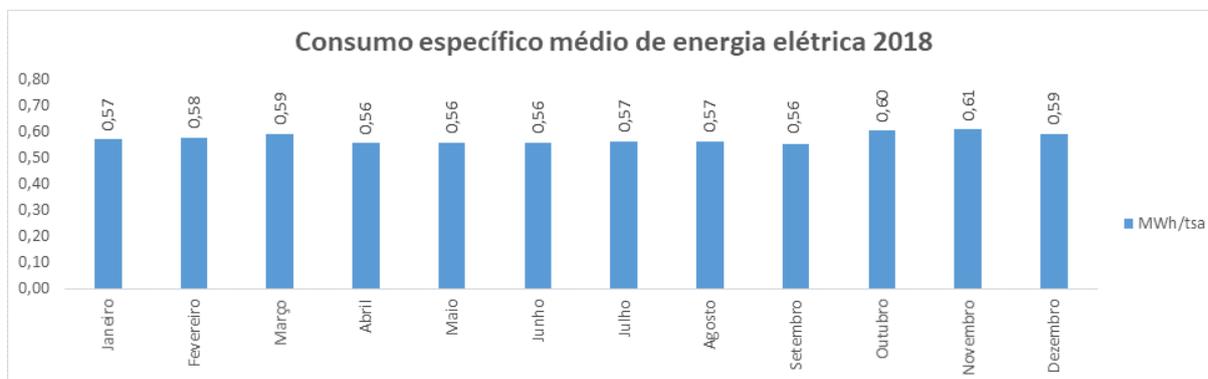


Figura 2 – Consumo específico geral de energia elétrica da unidade fabril estudada, ao longo do tempo

A figura 3 apresenta os processos que mais consomem energia elétrica na unidade fabril.

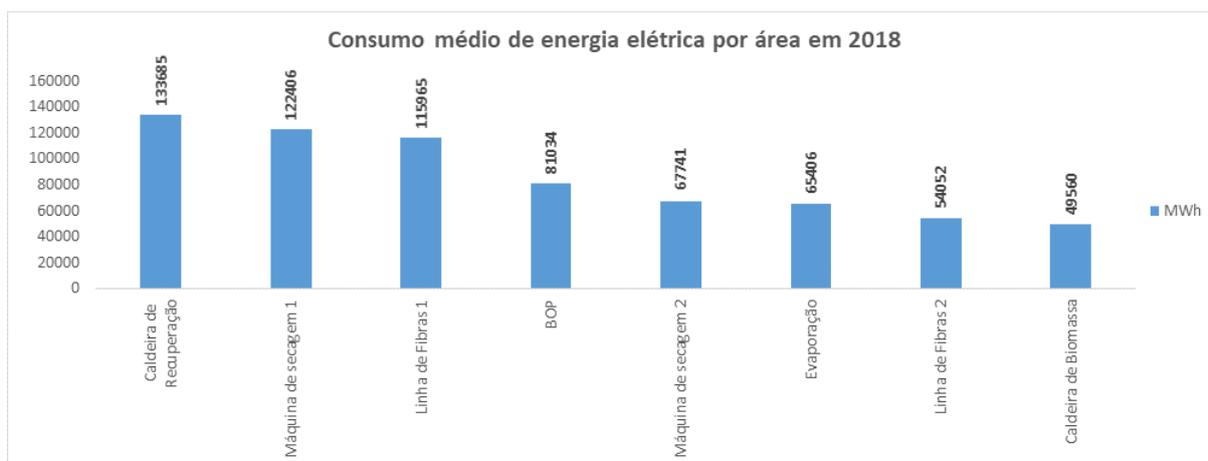


Figura 3 – Processos que mais consomem energia elétrica na unidade fabril estudada

A tabela 1 apresenta os indicadores de consumo específico de energia e de vapor.

Processo	Unidade, Energia	Unidade, Vapor
Máquina de secagem 1	MWh/Adt	MWh_térmico/Adt
Máquina de secagem 2	MWh/Adt	MWh_térmico/Adt
Linha de fibras 1	MWh/Adt	MWh_térmico/Adt
Linha de fibras 2	MWh/Adt	MWh_térmico/Adt
Preparo de madeira	MWh/t_cavacos	Não se aplica
Evaporação de licor negro	MWh/T_H ₂ O_evap	MWh_térmico/ T_H ₂ O_evap
Caldeira de recuperação química	MWh/Tss	MWh_térmico/Tss
Caustificação	MWh/M ³ _LB	MWh_térmico/M ³ _LB
Forno de cal 1	MWh/T_cal	Não se aplica
Forno de cal 2	MWh/T_cal	Não se aplica
Caldeira de biomassa	MWh/T_v	MWh_térmico/T_v
Estação de Tratamento de Água	MWh/M ³ _H ₂ O	Não se aplica
Estação de Tratamento de Efluentes	MWh/M ³ _Efluentes	Não se aplica
BOP (" <i>Balance of Plant</i> ")	MWh/Adt	Não se aplica
Desaerador	Não se aplica	MWh_térmico/Adt
Planta Química	MWh/T_ClO ₂	MWh_térmico/ T_ClO ₂

Fonte: Autor

Tabela 1 – Indicadores de consumo específico de energia dos processos da unidade fabril estudada

As siglas das unidades das tabelas 1 e 2 referem-se a:

Adt: toneladas secas ao ar ("*air dry ton*"), a 90% de teor seco;

T_H₂O_evap: toneladas de água evaporada do licor negro;

Tss: toneladas de sólidos secos queimados ("*as fired*");

M³_LB: metros cúbicos de licor branco produzido;

T_cal: toneladas de cal produzida;

T_v: toneladas de vapor vivo produzido;

M³_H₂O: metros cúbicos de água tratada;

M³_Efluentes: metros cúbicos de efluentes tratados;

T_ClO₂: toneladas de Dióxido de Cloro produzidos;

MWh: megawatts-hora produzido;

Tmucc: toneladas de madeira úmida com casca;

A tabela 2 apresenta as capacidades dos processos e os valores mínimos de produção considerados nos novos "*tags*" criados no sistema PI System dos consumos específicos de energia desconsiderando paradas de processo, reduções e reinícios.

Processo	Unidade	Capacidade	% Mínimo	Capacidade Mínima
Máquina de secagem 1	Adt/d	3.500	40	1.400
Máquina de secagem 2	Adt/d	1.300	40	520
Linha de fibras 1	Adt/d	3.800	40	1.520
Linha de fibras 2	Adt/d	1.400	40	560
Evaporação de licor negro	T_H ₂ O_evap/h	1.700	40	680
Caldeira de recuperação química	Tss/d	7.650	40	3.060
Caustificação	M ³ _LB/d	16.000	40	6.400
Forno de cal 1	T_cal/d	650	40	260
Forno de cal 2	T_cal/d	650	40	260
Planta Química	T_ClO ₂ /d	60	40	24
Estação de Tratamento de Água	M ³ _H ₂ O/h	5.900	40	2.360
Estação de Tratamento de Efluentes	M ³ _Efluentes/h	5.900	40	2.360
Caldeira de biomassa	T_v/h	280	40	112
Turbina a vapor 1	MWh/h	165	40	66
Turbina a vapor 2	MWh/h	165	40	66

Fonte: Autor

Tabela 2 – Níveis mínimos de produção para indicadores de consumos específicos de vapor e energia

A figura 4 apresenta o consumo específico geral de vapor da unidade fabril ao longo do tempo.

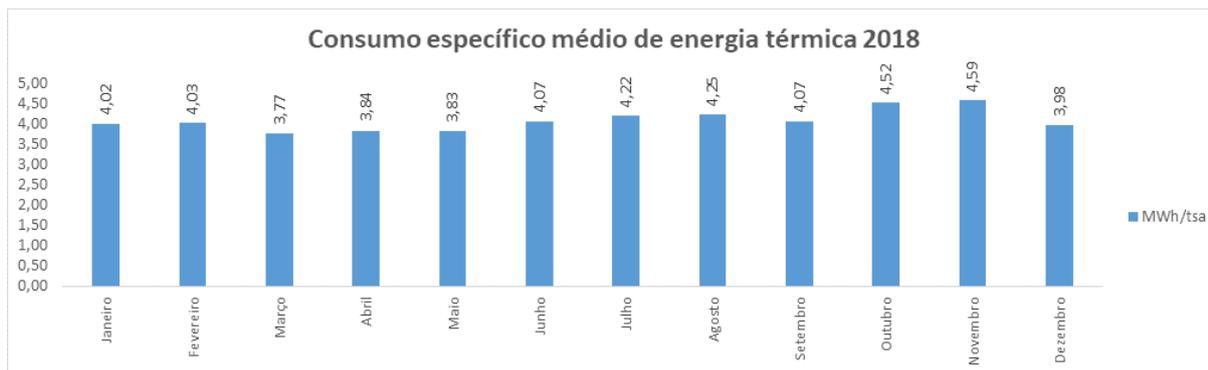


Figura 4 – Consumo específico geral de energia térmica da unidade fabril estudada, ao longo do tempo

A figura 5 apresenta os processos que mais consomem vapor na unidade fabril.

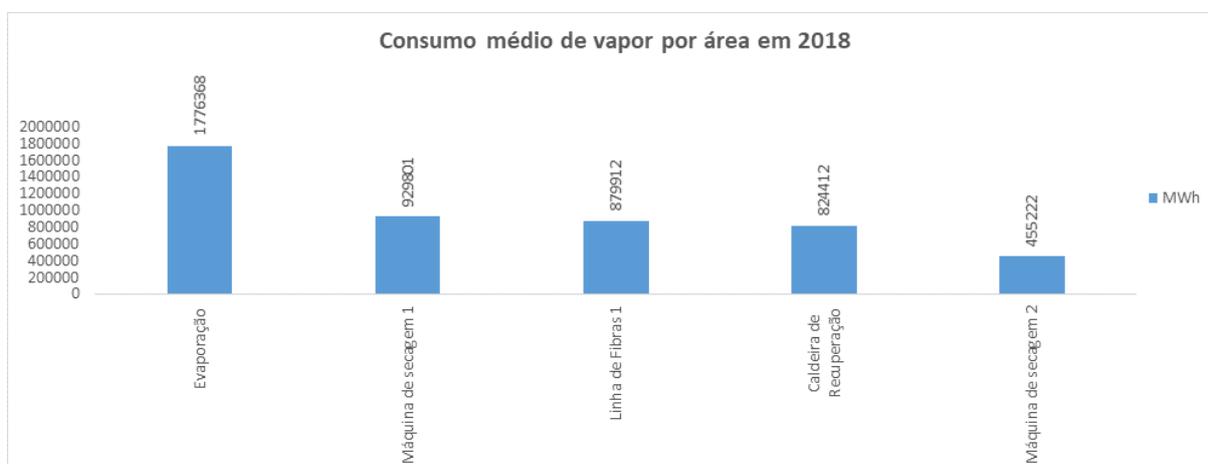


Figura 5 – Processos que mais consomem vapor (energia térmica) da unidade fabril estudada

A figura 6 apresenta a geração de vapor total, da caldeira de recuperação e da caldeira de biomassa ao longo do tempo, na unidade MWh térmico.

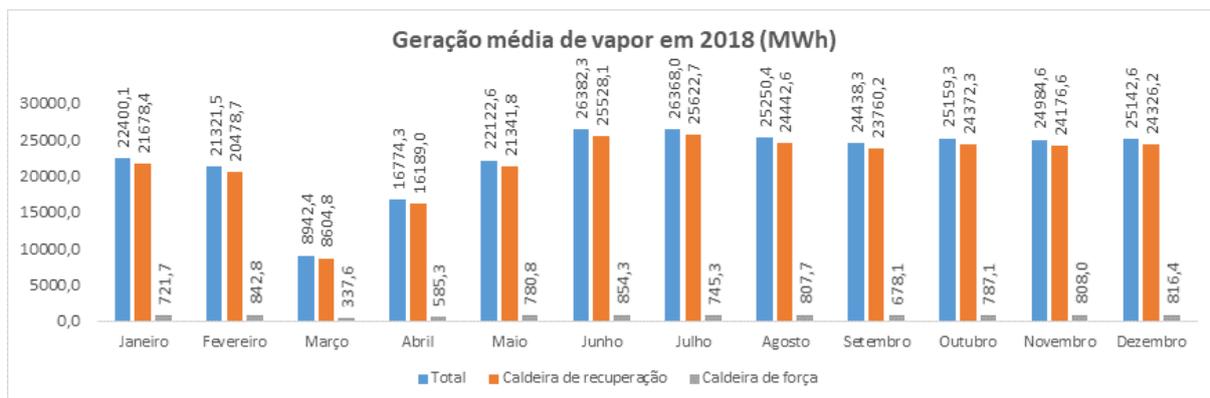


Figura 6 – Geração de vapor total, da caldeira de recuperação e da caldeira de biomassa

A figura 7 apresenta a geração de energia total, da turbina 1 e da turbina 2 ao longo do tempo.

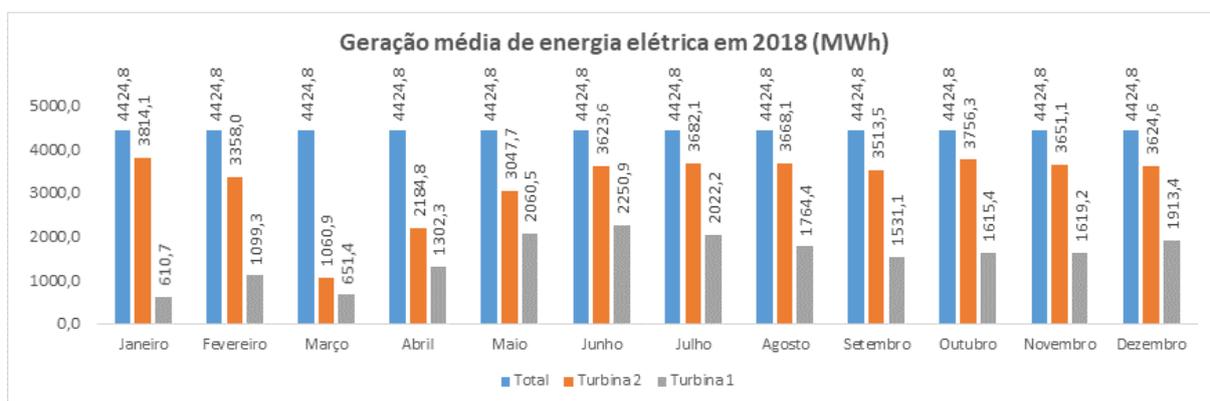


Figura 7 – Geração de energia total, da turbina 1 e da turbina 2

A figura 8 apresenta a tela esquemática de monitoramento de energia.

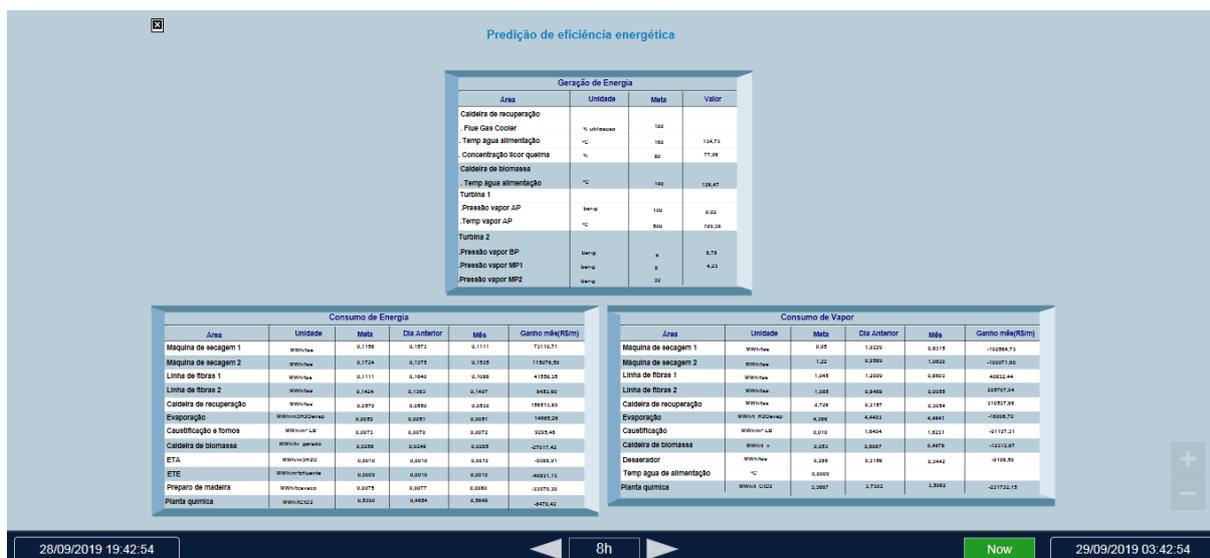


Figura 8 – Tela esquemática de monitoramento de energia

“Flue gás cooler” é o processo de recuperação da energia térmica dos gases de chaminé da

caldeira de recuperação, utilizado para aquecimento de água de alimentação para reaproveitamento energético. Ele possui quatro câmaras e o seu percentual de utilização está relacionado a sua disponibilidade operacional. A temperatura de água de alimentação foi outra variável caracterizada como importante do ponto de vista energético, ela sofre aquecimento com vapor no tanque desaerador e numa segunda etapa internamente nas duas caldeiras. As pressões de vapor de baixa pressão e médias pressões da turbina de contrapressão também estão diretamente relacionadas com a eficiência da geração de energia.

A figura 9 apresenta uma tela esquemática de predição de energia.



Figura 9 – Tela esquemática de predição de energia

5. Conclusões

Com o sistema de monitoramento “on-line” de vapor e energia as perdas são mais visíveis para uma correção mais rápida dos desvios. Com o sistema de predição de energia há uma maior previsibilidade da geração de energia para atendimento a contratos e uma maior antecipação da visibilidade na necessidade ou sobra de energia para atividades comerciais.

6. Referências Bibliográficas

ALMEIDA, V. B. **Caracterização, análise e perspectivas da matriz energética do setor de papel e celulose**. São Paulo, 66 p., 2013. Dissertação (Mestrado) – Fundação Getúlio Vargas.

BACHMANN, D.L.; Benchmarking Energético na Indústria de Celulose e Papel. **Revista O Papel**, São Paulo, v.70, n.7, p. 72-76, 2009.

FOELKEL, C. **Um guia sobre ecoeficiência energética para a indústria de papel e celulose**. Disponível em: < http://www.eucalyptus.com.br/eucalyptos/PT19_EcoeficienciaEnerg.pdf > Acesso em: 23 set. 2019.

FRANCIS, D.W.; TOWERS, M.T.; BROWNE, T.C. **Energy cost reduction in the pulp and paper industry.** Disponível em: < <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21552944> > Acesso em: 23 set. 2019.