Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Estudo do desempenho energético das caldeiras da indústria de polpa celulósica
kraft

Carolina Kravetz

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção
em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2018

Carolina Kravetz
Engenheira Florestal

Estudo do desempenho energético das caldeiras da indústria de polpa celulósica kraft

Orientador:
Prof. Dr. **FRANCIDES GOMES DA SILVA JÚNIOR**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção
em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Kravetz, Carolina

Estudo do desempenho energético das caldeiras da indústria de polpa celulósica kraft / Carolina Kravetz. - - Piracicaba, 2018.

1. 68 p.

2. Dissertação (Mestrado) USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

3. 1. Biomassa 2. Caldeira de biomassa 3. Caldeira de recuperação 4. Eficiência energética 5. Energia 6. Licor negro 7. Parâmetros I. Título

RESUMO

Estudo do desempenho energético das caldeiras da indústria de polpa celulósica kraft

A importância da energia elétrica gerada pelo setor de celulose e papel têm crescido no mercado brasileiro, pois com a crise hídrica que tem causado transtornos financeiros aos diversos setores da economia, muitas empresas têm optado por ter a geração de energia como um novo plano de negócio. Desta forma, para que esta produção cresça são necessários investimentos nessa área. Por isso, é essencial conhecer o processo, bem como os parâmetros envolvidos na produção de energia. Com a finalidade de ampliar os conhecimentos da área de energia dentro do setor de celulose e papel, este trabalho teve como objetivo identificar a relação dos parâmetros das caldeiras de recuperação e biomassa, bem como de seus combustíveis, afim de determinar sua influência na produção de vapor. Para isso, foram utilizados os valores dos parâmetros das caldeiras de recuperação e biomassa, entre eles: consumo de combustível, vazões de ar, temperaturas da água de alimentação e do vapor gerado, como também os valores das características químicas e físicas do licor negro, incluindo poder calorífico superior, teor de sólidos totais, teor de orgânicos e inorgânicos, e da biomassa, densidade aparente, poder calorífico superior, umidade e teor de cinzas. Os parâmetros e as características dos combustíveis foram disponibilizados por uma empresa do setor de celulose e papel do Brasil. Para análise e discussão dos dados foram feitos cálculos de eficiência energética, análise de diagramas de dispersão, correlação de Pearson, elaboração de modelos matemáticos para estimativa de produção de vapor e a determinação dos valores ideais dos parâmetros dos combustíveis, para produção máxima de vapor. A partir das análises de eficiência energética, a caldeira de recuperação manteve uma média de 86%, enquanto que a caldeira de biomassa obteve uma média de 51%. Analisando as relações entre todos os parâmetros, nas caldeiras as variáveis com maior influência na operação foram as vazões de ar, vazão da água de alimentação, o consumo de combustível, temperatura da água de alimentação, temperatura dos gases de saída e a pressão do vapor, enquanto que nos combustíveis a maior influência foi do poder calorífico superior. Dentre os modelos matemáticos analisados para a predição da produção de vapor, apenas o modelo utilizando parâmetros da caldeira de recuperação foi estatisticamente significativo. Através da análise das características dos combustíveis, relacionando-as com o objetivo de obter a máxima produção de vapor, os valores ideais calculados destas características químicas e físicas do licor negro e da biomassa se mantiveram de acordo com a literatura.

Palavras-chave: Biomassa, Caldeira de biomassa, Caldeira de recuperação, Eficiência energética, Energia, Licor negro, Parâmetros

ABSTRACT

Study of energy performance of boilers from kraft pulp industries

The importance of the electric energy generated by the pulp and paper sector has grown in the Brazilian market, because the water crisis has caused financial distress to the various sectors of the economy, and then many companies have chosen to have the power generation as a new business plan. In this way, for this production to grow, investments in this area are necessary. Therefore, it is essential to know the process as well as the parameters involved in energy production. With the purpose of increasing the knowledge of the energy area within the pulp and paper sector, this work aimed to identify the relation of the parameters of recovery and biomass boilers, as well as their fuels, in order to determine their influence in the production of steam. In order to do this, the values of the parameters of the recovery and biomass boilers were used, among them: fuel consumption, air flows, feed water and steam temperatures, as well as the values of the chemical and physical characteristics of the black liquor, including higher calorific value, total solids content, organic and inorganic content, and of biomass, apparent density, higher calorific value, moisture and ash content. The parameters and characteristics of fuels were made available by a Brazilian pulp and paper company. In order to analyze and discuss the data were made energy efficiency calculations, dispersion diagrams analysis, Pearson correlation, mathematical models for estimation of steam production and determination of the ideal values of the fuel characteristics for maximum steam production. From the energy efficiency analyzes, the recovery boiler maintained an average of 86%, while the biomass boiler obtained an average of 51%. Analyzing the relationships among all parameters, the variables with the greatest influence on the operation were air flow, feed water flow, fuel consumption, feed water temperature, outlet gas temperature and steam pressure, while in fuels the greatest influence was the higher calorific value. Among the mathematical models analyzed for the prediction of steam production, only the model using parameters of the recovery boiler was statistically significant. Analyzing the characteristics of the fuels in order to obtain the maximum steam production, the estimated ideal values of these chemical and physical characteristics of black liquor and biomass were kept in agreement with the literature.

Keywords: Biomass, Biomass boiler, Black liquor, Energy, Energy efficiency, Parameters, Recovery boiler

INTRODUÇÃO

O processo kraft é o mais utilizado pelas indústrias produtoras de polpa celulósica de todo o mundo. Este processo se iniciou em 1879, com o químico alemão Carl Dahl e foi difundido devido as suas vantagens, como a produção de fibras menos degradadas, flexibilidade na utilização de espécies, cozimentos mais curtos, polpas com altos níveis de alvura e a recuperação dos reagentes químicos utilizados no processo (FERREIRA, 2013; SENAI, 2013).

O processo kraft consiste na remoção da lignina utilizando uma solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na₂S), chamado licor branco. A associação destes dois componentes químicos permite que a eliminação da lignina seja mais seletiva do que nos demais processos químicos de polpação, já que o sulfeto preserva os carboidratos (celulose e hemiceluloses).

No geral, o processo de polpação kraft inicia-se no digestor, onde são adicionados os cavacos de madeira e o licor branco. Nesta etapa são variados parâmetros como temperatura, tempo, pressão, e ao final a polpa produzida passa por etapas de lavagem, afim de que esta fique livre do licor negro formado durante este processo. A polpa celulósica segue na linha de fibras para as etapas de depuração, branqueamento, secagem e expedição. O licor negro, por sua vez, passa pelo processo de recuperação química, o qual consiste nas etapas de evaporação, caldeira de recuperação, caustificação e forno de cal.

A etapa de recuperação química é responsável pela recuperação dos reagentes químicos, afim de que estes sejam reutilizados na constituição do licor branco de cozimento. Como também, há a geração de energia na forma de vapor e energia elétrica, as quais são empregadas no processo produtivo da celulose.

Contudo, a caldeira de recuperação, em muitas situações, não é capaz de suprir as necessidades da indústria, pois uma grande quantidade de energia é necessária. Por esta razão, as indústrias de celulose também utilizam a caldeira de biomassa, a qual além da produção de energia, elimina os resíduos florestais.

Muitas indústrias de celulose já são caracterizadas como autossuficientes, outras unidades chegam a produzir energia elétrica excedente, a qual pode ser devolvida à rede do sistema elétrico nacional, possibilitando um abatimento da conta final de consumo destas empresas. Por outro lado, as unidades integradas de celulose e papel ainda precisam de energia do sistema nacional, devido à alta demanda energética do processo produtivo do papel.

Algumas unidades industriais produtoras de celulose tem considerado a energia elétrica como um novo produto da empresa. Onde antes visava-se apenas a produção de polpa celulósica, há indústrias do setor que tem investido na produção desta forma de energia. Além disso, diante das incertezas sobre a demanda futura de celulose, a competitividade deste setor estará vinculada à diversidade nos produtos gerados, aplicando o conceito de biorefinaria e realizando os múltiplos aproveitamentos da biomassa em rotas tecnológicas distintas (ALMEIDA, 2013).

A energia elétrica é um dos insumos mais importantes e com o custo mais elevado para o setor industrial. Com as crises hídricas recorrentes, o preço desta energia no mercado tem oscilado frequentemente e tem sido necessário a ativação de termelétricas, o que encarece o custo da energia para o consumidor. O setor de celulose e papel, por sua vez, possui grande vantagem sob as demais indústrias, já que este possui a geração de energia como consequência de seu processo produtivo.

O processo de produção de energia nas indústrias deste setor encontra-se consolidado, porém para alavancar este produto no mercado como um negócio competitivo e lucrativo da empresa faz-se necessário à busca por melhorias nesta produção. A eficiência energética consiste em buscar formas de balancear o uso de matéria-prima e a produção de energia, a qual pode ser calculada através da relação entre a quantidade de energia disponibilizada e a quantidade de combustível que é utilizado.

Para que haja ganhos com a eficiência energética e reduções de custo significativos para a empresa, é necessário entender o funcionamento das variáveis do processo, estudando o desempenho energético das unidades industriais. As melhorias no processo podem estar ligadas aos parâmetros mecânicos das caldeiras, como também relacionado às características dos combustíveis utilizados na produção de energia. No caso das indústrias de celulose, a matriz energética é majoritariamente composta pelo licor negro (subproduto do próprio processo produtivo) e pela biomassa (resíduos florestais).

Quando se discute sobre parâmetros do processo temos principalmente a preocupação com o consumo de combustível e com a vazão de vapor, porém estes estão correlacionados com diversas variáveis. Claramente, as variáveis relacionadas à mecânica das caldeiras, tem influência na produção e na eficiência do processo; as características da biomassa e do licor negro também são de extrema importância para o estudo da produção de energia.

Como o principal foco da indústria é a produção de celulose, a preocupação com as características dos combustíveis das caldeiras acaba sendo considerada secundária. Por esta razão, a análise destes parâmetros é de grande relevância, pois estes combustíveis necessitam ter valores

compatíveis de acordo com as necessidades energéticas, já que se espera agregar ao setor de celulose e papel o reconhecimento de um produtor de energia limpa.

Deste modo, a partir da descrição da importância da energia para o setor de celulose e papel e também da necessidade de entender as relações entre os parâmetros do processo produtivo de energia, este trabalho teve como finalidade identificar os principais parâmetros que influenciam a geração de vapor das indústrias de polpa celulósica kraft a partir das caldeiras de recuperação e biomassa.

CONCLUSÕES

A partir das análises de eficiência energética, a caldeira de recuperação manteve uma média de 86%, enquanto que a caldeira de biomassa obteve uma média de 51%. Neste estudo, a caldeira de recuperação obteve um ótimo desempenho, porém, a de biomassa esteve abaixo do esperado, possivelmente devido à alta umidade do material (54,49%, em média).

Analizando as relações entre os parâmetros, na caldeira de recuperação foi identificado o maior número de correlações. Nas caldeiras foi constatado principalmente a influência das variáveis de vazões de ar, vazão da água de alimentação, consumo do combustível, temperatura da água de alimentação, temperatura dos gases de saída e pressão do vapor. Entre os combustíveis, o poder calorífico foi a variável com maior influência.

Dentre os modelos matemáticos analisados para a predição do vapor, apenas o modelo utilizando parâmetros da caldeira de recuperação foi significativo estatisticamente, e assim foi considerado um modelo adequado. Segue abaixo a regressão para predizer a vazão de vapor da caldeira de recuperação, a qual contém os parâmetros de consumo de licor negro (C_{ln}), a vazão da água de alimentação (V_a), a pressão do vapor (P_v) e a temperatura da água de alimentação (T_a):

$$\text{vazão de vapor} = -57649 + 2,214C_{ln} + 0,1808 \times V_a + 582 \times P_v + 28,58 \times T_a$$

A partir do software Minitab 17®, os valores ideais de licor negro e biomassa visando a máxima produção de vapor foram:

- Licor negro:
 - Poder calorífico superior: 12,71 MJ/kg
 - Teor de sólidos totais: 74,82%
 - Teor de inorgânicos: 44,91%
 - Teor de orgânicos: 54,99%
- Biomassa:
 - Poder calorífico superior: 18,88 MJ/Kg
 - Densidade 132,68 Kg/m³
 - Umidade: 46,99 %
 - Teor de cinzas: 3,16%

REFERÊNCIAS

- ADAMS, T.N. Kraft Recovery Boilers. **Tappi press**. Atlanta, GA. 1997.
- ALMEIDA, V. B. de. **Caracterização, Análise e Perspectivas da Matriz Energética do Setor de Papel e Celulose**. Dissertação de mestrado. FGV. 2013.
- ANEEL. Parte II: Fontes renováveis – Biomassa. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2008.
- BARBELI, M.C. Indústria de papel e celulose: estado da arte das tecnologias de cogeração de energia. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**. v.3. n. 3. 2008.
- BERNI, M. D., BAJAY, S.V., GORLA, F.D. Oportunidades de eficiência energética para a Indústria. **CNI – Confederação Nacional da Indústria**. 2010.
- BIERMANN, C.J. **Handbook of pulping and papermaking**. Second edition. 1996.
- BRITO, J.O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In: **Congresso Florestal Brasileiro**, 7, Curitiba, 1993. Anais...São Paulo: SBS/SBEF, 1993. v.3, p.280-2.
- BRITO, J.O. e BARRICHELO, L.E.G. Química da Madeira. Apontamentos – Curso Engenharia Florestal ESALQ/USP. 1985.
- BORGNAKKE, C. SONNTAG, R.E. **Fundamentos da Termodinâmica**. São Paulo Edgard Blucher, 2009.
- BOWYER, J.L., SHMULSKY, R., HAYGREEN, J.G. Forest Products & Wood Science. 5th edition. Blackwell Publishing. 2007.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M. Bioestatística – Princípios e Aplicações. Porto Alegre: Artmed, 2003.
- CARDOSO, M., OLIVEIRA, E.D. de, PASSOS, M.L. Licor negro de eucalipto kraft proveniente de indústrias brasileiras: características químicas, físicas e seu processamento na unidade de recuperação. **Revista O Papel**. Maio, 2006.
- CERNE**. Desperdício de energia atinge R\$ 61,7 bi em três anos. 2017. Disponível em: <<http://cerne.org.br/desperdicio-de-energia-atinge-r-617-bi-em-tres-anos/>>. Acesso em 30 nov 2017.
- CGEE**. Eficiência Energética: recomendações de ações de CT & I em segmentos da indústria selecionados - Celulose e Papel. Série Documentos Técnicos. n. 20. 2013.
- ELETROBRÁS**. Eficiência energética no uso de vapor. 2005.
- ELETROBRÁS**. Manual prático – Eficiência energética em sistemas de vapor. 2013.
- EPE**. Anuário Estatístico de Energia Elétrica. Versão workbook – dados preliminares. 2017b.
- EPE**. Balanço energético nacional. Relatório Final. 2017a.
- EPE**. Anuário Estatístico de Energia Elétrica. 2013.

- EPE.** Avaliação da Eficiência Energética na Indústria e nas Residências no Horizonte Decenal (2010-2019). Série Estudos da Demanda. 2010.
- FERREIRA, D. J. de O. **Modelagem de caldeira de recuperação química kraft.** Tese de doutorado. USP. 2013.
- FERREIRA, I.T.M., SCHIRMER, W.N., MACHADO, G.de O., GUERI, M.V.D. Estimativa do Potencial Energético de Resíduos Celulósicos de Fabricação de Papel Através de Análise Imediata. **Revista Brasileira de Energias Renováveis.** v. 3. 2014. p. 284-297.
- FOELKEL, C. Utilização da biomassa do eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade. **Eucalyptus Online Book & Newsletter.** 2016.
- FOELKEL, C. Qualidade da Biomassa Florestal do Eucalipto para Fins Energéticos. **Eucalyptus Online Book & Newsletter.** 2015.
- FOELKEL, C. Um Guia Referencial sobre Ecoeficiência Energética para a Indústria de Papel e Celulose Kraft de Eucalipto no Brasil. **Eucalyptus Online Book & Newsletter.** 2010.
- GANDRA, A. Custo da energia elétrica para pequena e média indústria caiu 10,7% em 2016. **Agência Brasil.** 2017. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2017-02/custo-da-energia-eletrica-para-pequena-e-media-industria-caiu>>. Acesso em 14 de nov 2017.
- INTERNATIONAL PAPER.** Caldeira de Biomassa: Autossuficiência energética e sustentabilidade do negócio. 2015.
- MACIEL, M. A. **Sustentabilidade energética industrial.** Monografia. UFLA. 2008.
- MIELI, C. de A. **Sistemas de avaliação ambiental na indústria de celulose e papel.** Tese de doutorado. UFV. 2007
- MORAES, F.de A.B. Uso de caldeira de biomassa e turbo gerador. **Revista da Madeira.** ed. 135. Maio, 2013. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1671&subject=Caldeiras&title=Uso%20de%20caldeira%20de%20biomassa%20e%20turbo%20gerador>. Acesso em 15 nov 2017.
- PINHEIRO, P.C.da C e VALLE, R.M. **Controle de Combustão: Otimização do Excesso de ar.** II Congresso de Equipamentos e Automação da Indústria Química e Petroquímica. Anais: Automação Industrial São Paulo, ABIQUIM. Rio de Janeiro, RJ. Agosto, 1995. p. 157-162.
- PIOTTO, Z. C. **Eco-eficiência na Indústria de Celulose e Papel - Estudo de Caso.** Tese de doutorado. USP. 2003.

- SÁNCHEZ, C.G. e BIZZO, W.A. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Cap. 11 – Estequiometria das Reações de Combustão e Gaseificação. Editora Átomo. 2010.
- SANTOS, P.G. C. dos. **Desenvolvimento de um queimador em leito fluidizado borbulhante para queima de biomassa. Adaptação a caldeira pré-existente**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2009.
- SENAI. Celulose – Área Celulose e Papel. Série Informações Tecnológicas. 2013.
- SIXTA, H. **Handbook of pulp**. WILEY-VC Verlag GmbH & Co. v.1. 2006.
- STATISTICAL SOFTWARE. **Minitab 17**. Computer software. State College, PA: Minitab, Inc. 2010.
- VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **Perspectivas para a geração de excedentes de energia elétrica no segmento de papel e celulose com a utilização de sistemas de gaseificação/turbina a gás**. Tese de doutorado. USP. 2006.