



INFLUÊNCIA DA SECAGEM DA BIOMASSA NA EFICIÊNCIA DE CALDEIRA DE COGERAÇÃO ENERGÉTICA

Martha Andreia Brand¹ & Guilherme Giesel²

RESUMO: Este trabalho teve como objetivo a avaliação do efeito da instalação de um secador de biomassa sobre o desempenho de duas caldeiras de biomassa e sobre o consumo de combustíveis auxiliares em uma indústria de celulose e papel. Foram utilizados os registros históricos: de consumo de óleo BPF 3A, piche e biomassa nas caldeiras; da produção de vapor; e dos teores de umidade da biomassa na entrada e saída de um secador rotativo, no período de 2012 a 2015. O secador promoveu uma redução de 9,5% no teor de umidade da biomassa utilizada para geração de energia na indústria, em relação ao ano anterior, antes da instalação do equipamento. A diminuição do teor de umidade na biomassa obtida no secador tipo rotativo propiciou benefícios diferenciados nos dois equipamentos analisados. Na caldeira mais antiga (CF8), a redução do teor de umidade no combustível contribuiu para aumentar a produção de vapor. A secagem não alterou a eficiência energética da biomassa (toneladas de vapor / toneladas de biomassa), mas contribuiu para a redução no consumo de combustíveis auxiliares na caldeira. Na caldeira mais moderna (CF9), o uso da biomassa com menor teor de umidade não promoveu variação significativa na produção de vapor, mas contribuiu para o aumento de sua eficiência energética, sem haver redução significativa no consumo de combustíveis auxiliares. As especificidades operacionais em cada caldeira analisada também contribuíram para o comportamento diferenciando entre os dois equipamentos com relação ao uso de biomassa com menor teor de umidade.

PALAVRAS-CHAVES: secador rotativo; eficiência energética; teor de umidade.

INFLUENCE OF BIOMASS DRYING IN ENERGY COGENERATION BOILER EFFICIENCY

ABSTRACT: This work aimed to evaluate the effect of a biomass dryer on the performance of two biomass boilers and on the auxiliary fuels consumption in a pulp and paper industry. Historical records from 2012 to 2015 from the following variables were used: consumption of BPF 3A oil, tar and biomass in the boilers; steam production; biomass moisture content at the entrance and exit of a rotative dryer. The dryer promoted a reduction of 9.5% in the moisture content of the biomass used for power generation, prior to installation of the equipment. The reduction of the biomass moisture content obtained in the rotative drier provided differentiated benefits to both analyzed equipments. In the older boiler (CF8), reducing the moisture content in the fuel contributed to increase steam production. The drying process did not change the biomass energy efficiency (tonnes of steam / ton of biomass), but contributed to auxiliary fuels consumption reduction. In the most modern boiler (CF9), the use of biomass with lower moisture content did not promote significant variation in steam production, but contributed to the increase of its energy efficiency, without a significant reduction in the consumption of auxiliary fuels. The operational specificities in each analyzed boiler also contributed to the behavior differentiating between the two equipments in relation to the use of biomass with lower moisture content.

KEYWORDS: rotative dryer; energy efficiency; moisture content.

1 INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis como o petróleo, carvão mineral, gás natural ainda são as principais fontes de energia no mundo. Entretanto, além da estimativa de que estas fontes de energia devem se esgotar nos próximos 40 ou 50 anos, os danos ambientais provocados pelas emissões provenientes destas fontes têm impulsionado a humanidade a aumentar a utilização de fontes de energia

renováveis, ambientalmente menos nocivas, tais como a solar, eólica e biomassa (SAIDUR et al., 2011).

A biomassa é considerada um combustível com emissão neutra de CO₂ e quando utilizada como substituta de combustíveis fósseis traz benefícios ambientais, no que se refere a redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE) (ALAMIA; STRÖM E THUNMAN, 2015). Na forma sólida, este recurso energético responde atualmente por 9,5% do abastecimento mundial de energia e por 22,9% da demanda energética brasileira (BRASIL, 2016).

A indústria de celulose e papel, a partir da demanda combinada de eletricidade e vapor de baixa e média

¹ e ² Universidade do Estado de Santa Catarina. Departamento de Engenharia Florestal. E-mails: a2mab@cav.udesc.br ; ggiesel@klabin.com.br

pressão, e tendo como recurso energético a disponibilidade de cascas e resíduos de madeira do processamento industrial (SOARES et al, 2006) é um bom exemplo da utilização de biomassa como combustível (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Este combustível é composto por quantidades variáveis de água, celulose, hemicelulose, lignina e pequenas quantidades de lipídios, proteínas, açúcares simples, amidos, e constituintes inorgânicos (SAIDUR et al., 2011).

Jenkins; Baxter e Miles (1998) em seu estudo sobre propriedades da combustão da biomassa, afirma que este recurso energético é semelhante aos outros tipos de combustível quanto a avaliação de suas propriedades. No que tange ao uso da biomassa como combustível, as características que influenciam seu desempenho energético são: o tamanho e forma das partículas; porosidade; massa específica básica e a granel; teor de cinzas; teor de umidade; poder calorífico superior e líquido; teor de extrativos; composição elementar (C, H, O e N); composição estrutural (celulose, hemicelulose e lignina); condutividade térmica e mecânica; propriedades elétricas e acústicas (JENKINS; BAXTER E MILES, 1998; DEMIRBAS, 2005).

O teor de umidade é a característica de qualidade mais importante no combustível, uma vez que em excesso produz grandes flutuações na produção de energia da caldeira (BORIOUCHKINE; ZAKHAROV E JÄMSÄ-JOUNELA, 2012). Os valores desta propriedade, na biomassa, em geral são altos, situando-se entre 50 e 65% (base úmida), dependendo do tipo ou parte da planta e da estação do ano (RYU et al., 2006; BRAND; DE MUÑIZ, 2010; DE FUSCO; JEANMART E BLONDEAU, 2015).

A umidade elevada em um combustível reduz sua eficiência energética, uma vez que na combustão, a água precisa ser evaporada (DE FUSCO; JEANMART E BLONDEAU, 2015) e a energia necessária para esta evaporação é perdida no processo de geração de energia (LI et al, 2012).

Para Luk et al. (2013), quando a biomassa é utilizada como combustível, o teor de umidade reduz o seu poder calorífico líquido (PCL) devido ao aumento da perda de calor não recuperável transportado pelos gases produzidos durante a combustão. Um teor elevado de umidade reduz então a eficiência da caldeira.

No entanto, a redução da umidade por meio da secagem do combustível também requer o uso intensivo de energia, que segundo Chua et al. (2001) pode consumir até 15% da energia total disponível. Li et al. (2012) ressaltam ainda que este tratamento prévio pode impactar significativamente nos custos do funcionamento global do sistema de geração de energia.

Além da avaliação econômica, associada ao desempenho do combustível, alguns autores também relacionam benefícios ambientais decorrentes do uso de biomassa com menor teor de umidade, principalmente

relacionados às emissões atmosféricas dos produtos da combustão.

Jenkins; Baxter e Miles (1998) relataram que os poluentes primários gerados pela combustão de biomassa podem ser, em grande parte, controlados pela regulação correta do fornecimento do ar primário e secundário na câmara de combustão e pelo controle do teor de umidade do combustível. Os autores apontam como poluentes primários os materiais particulados, monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, gases ácidos. Outros poluentes gerados no processo podem ser: metais pesados, compostos orgânicos voláteis e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, sendo os dois últimos provenientes da combustão incompleta.

A redução no teor de umidade da biomassa leva a redução na emissão de hidrocarbonetos provenientes da combustão incompleta. Entretanto, não há correlação inequívoca entre o teor de umidade e estas emissões, uma vez que o tipo de equipamento e sua forma de operação também afetam estas emissões (WIMMERSTEDT, 1999).

Para geração de energia a partir da biomassa, as caldeiras de grelha foram dominantes na indústria de papel e celulose nas décadas de 1970 e 1980 e embora este tipo de equipamento admita diferentes níveis de umidade no combustível, opera de forma ideal utilizando biomassa contendo entre 30 e 40% de umidade. Associado a isto, o alto preço do petróleo provavelmente também contribuiu para o investimento em secadores de biomassa naquele período (HOLMBERG, 2007).

O custo da energia foi o grande fomentador dos investimentos em biomassa. Para Demirbas (2005), no ponto onde o custo de produção da energia a partir de combustíveis fósseis exceder o custo a partir da biomassa, a energia a partir de combustíveis fósseis custará mais caro do que a mesma quantidade de energia fornecida por meio da conversão da biomassa.

Porém, após a crise do petróleo, os preços da energia caíram e os investimentos em secadores deixaram de ser tão rentáveis, e se voltaram para o desenvolvimento de tecnologias de combustão mais eficientes. Porém, a partir dos anos 2000, além do preço dos combustíveis, a preocupação com emissões atmosféricas também se tornou um motor para a implementação de secadores de biomassa (HOLMBERG, 2007).

Muitos tipos de secadores ou processos de secagem estão disponíveis para a indústria. Estes equipamentos utilizam técnicas de secagem direta ou indireta e fluxo de gases, ar ou vapor como agentes de secagem (Fagermäns et al., 2010). Os agentes de secagem mais utilizados são os produtos da combustão da própria biomassa em fornos ou caldeiras. Os tipos de secadores mais utilizados são os rotativos, onde o equipamento em si é composto por um tambor rotativo que pode conter pás por todo o perímetro interno para aumentar o tempo de residência do material em seu interior (LORA; NOGUEIRA, 2003).

Considerando estes aspectos, este trabalho teve como objetivo a avaliação do efeito da instalação de um secador de biomassa sobre o desempenho de duas caldeiras de biomassa e sobre o consumo de combustíveis auxiliares em uma indústria de celulose e papel.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi baseado em uma série histórica de dados de uma indústria de celulose e papel, situada no Estado de Santa Catarina. A empresa mantém em operação duas caldeiras aquatubulares, com grelha, dimensionadas para a queima de biomassa denominadas: “Caldeira de Força 8” (CF8) e “Caldeira de Força 9” (CF9). Para a secagem da biomassa utilizada na geração de energia, a indústria possui um secador rotativo de biomassa denominado “Secador de biomassa”.

A CF8 foi instalada em 1993, com capacidade nominal para gerar 100 t/h de vapor à temperatura de 500°C, pressão de 85 kgf/cm², e capacidade térmica nominal de 93,74 MWh. A CF9 foi instalada em 2010, com capacidade nominal para gerar 60 t/h de vapor à temperatura de 420°C, pressão de 45 kgf/cm², e capacidade térmica nominal de 61,87 MWh.

O secador de biomassa foi instalado em setembro de 2014, com capacidade nominal de 85 t/h de biomassa com teor de umidade de 60%, geração térmica de 23.000.000 kcal/h, temperatura dos gases na entrada da câmara de secagem de 650°C e redução no teor de umidade da biomassa em 15%.

A biomassa utilizada neste sistema é composta por uma mistura variável de resíduos de casca de eucaliptos e pinus, cavacos de pinus com casca e resíduos florestais que apresentam poder calorífico superior (PCS) médio de 4600 kcal/kg. As caldeiras utilizam também combustíveis auxiliares para manter a geração de energia de acordo com os parâmetros desejados. Estes combustíveis auxiliares são o óleo combustível derivado de petróleo tipo BPF 3A, que apresentou poder calorífico inferior (PCI) médio de 9650 kcal/kg e um piche de origem vegetal, composto basicamente por uma mistura de ácidos graxos e ácidos resinosos que apresentou poder calorífico médio de 8600 kcal/kg. A caracterização

energética dos combustíveis foi realizada em laboratório credenciado para realização das análises, periodicamente, no período de estudo. A determinação do teor de umidade da biomassa antes e após a passagem pelo secador foi realizada segundo a norma NBR 14929 (ABNT, 2003).

Neste estudo foram utilizados os registros históricos do teor de umidade da biomassa que foi queimada nas caldeiras; da composição da biomassa (proporção de cada tipo de resíduos na mistura); do consumo de óleo BPF 3A, piche, biomassa e produção de vapor nas caldeiras de força CF8 e CF9; e teor de umidade da biomassa antes e após passagem pelo secador de biomassa. Estes dados foram obtidos a partir das planilhas de registros operacionais dos respectivos equipamentos, no período de 2012 a 2015. Foram excluídos os períodos onde houveram paradas para a manutenção dos equipamentos e os três primeiros meses de operação do secador de biomassa. Neste período, o equipamento estava em fase de ajustes iniciais. Para as comparações foram utilizadas as médias anuais das variáveis em estudo, considerando como tratamentos os períodos antes e após a instalação do secador de biomassa. Nas médias, assim obtidas, foram aplicados os testes F (ANOVA) e Tukey a fim de verificar se as diferenças encontradas eram significativas ao nível de 5% de probabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O secador promoveu uma redução de 9,5% no teor de umidade da biomassa utilizada para geração de energia na indústria, em relação ao ano anterior, antes da instalação do equipamento. Em 2015, a média do teor de umidade da biomassa foi de 58,7%, antes da entrada da biomassa no secador, valor coerente para a operação de secadores rotativos. Porém, os valores de umidade encontrados na biomassa pós-secagem estão acima do valor indicado no projeto do equipamento para uma alimentação de biomassa com teor de umidade inferior a 60%. Secadores rotativos de biomassa operam com teores de umidade médios da biomassa pós-secagem entre 10 e 45% (Li et al., 2012). O valor médio de umidade encontrado na saída do secador de 48,2% está, portanto, acima do usual para este tipo de equipamento (Tabela 1).

Tabela 1 - Teor de umidade na base úmida da biomassa que entrou no sistema de queima das caldeiras no período de 2012 a 2015.

| Período | Desvio Padrão | Coefficiente de Variação (%) | Média (%) |
|---------|---------------|------------------------------|-----------|
| 2012 | 1,7 | 3,0 | 56,5 a |
| 2013 | 1,6 | 2,7 | 58,3 b |
| 2014 | 1,9 | 3,3 | 57,7 ab |
| 2015 | 2,5 | 5,2 | 48,2 c |

Nota: Médias seguidas da mesma letra, não diferem significativamente entre si (Tukey P>0,05).

A literatura descreve vários aspectos e variáveis que podem influenciar no desempenho deste tipo de equipamento, levando à entrega de biomassa com teor de umidade acima do previsto. Características da biomassa como porosidade e dimensões do material afetam o tempo necessário para secagem (FYHR; RASMUSON, 1997) e por consequência para um mesmo tempo de secagem, o teor de umidade após secagem pode variar para materiais com características diferentes.

Estudos relacionados à secagem da madeira relatam que existem três equações necessárias para prever as propriedades de secagem e que, portanto, afetam seu desempenho: Temperatura do Fluxo de Secagem; Temperatura da madeira e Taxa de Secagem. Além disso, a curva de secagem, na qual são consideradas a temperatura do fluxo de secagem e a taxa de secagem, também pode ser utilizada para estabelecer o tempo de residência do material no secador (LI et al., 2012).

A análise estatística demonstrou que houve variação entre os valores médios de teor de umidade antes da instalação do secador (2012, 2013 e 2014). No entanto, todos os valores médios anuais foram elevados, superiores a 55%, considerado como o valor máximo, nas especificações da caldeira CF8, e próximos do valor de 60%, valor máximo especificado para a CF9, para a operação dentro dos limites desejados para produção de energia. Assim, as alterações na origem da biomassa utilizada nos últimos anos, em especial no que tange a proporção de resíduos florestais e de cavacos de terceiros (Figura 1), não impactou de forma significativa na média anual do teor de umidade.

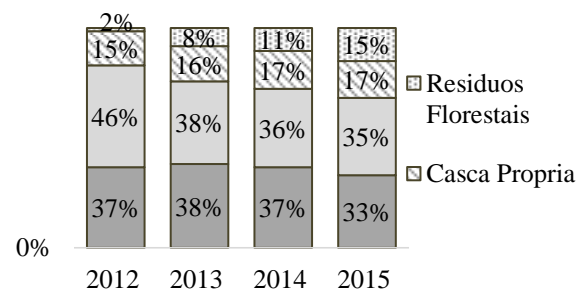
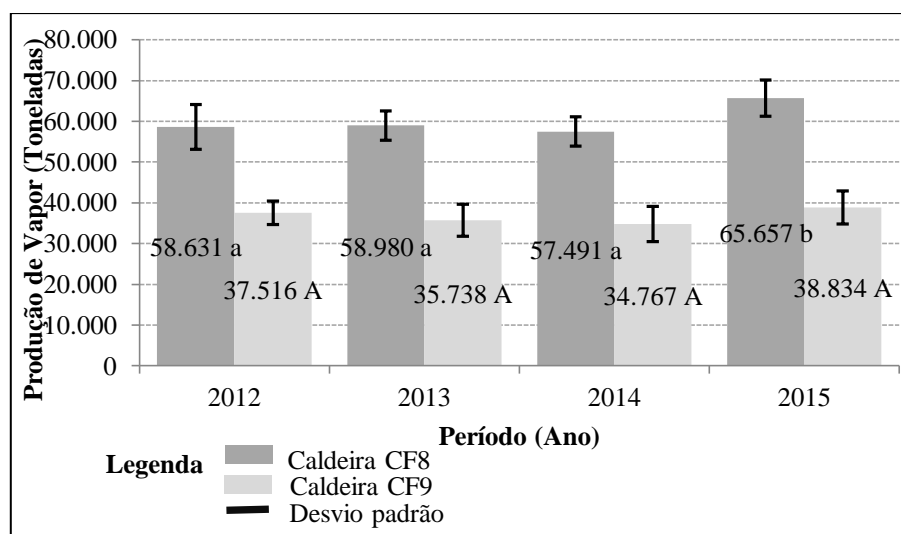


Figura 1 - Composição da biomassa utilizada para geração de energia em uma indústria de celulose e papel, entre 2012 a 2015, no Estado de Santa Catarina

Apesar da biomassa utilizada no sistema em estudo ser composta por cerca de 70% de cavacos de madeira (Figura 1), o crescimento do uso de resíduos florestais na composição da biomassa é um aspecto que tem sido observado na região de estudo. Isto se deve ao aumento do preço e da demanda das outras categorias de biomassa, como casca e cavacos com casca (resíduos de origem industrial), que também são utilizados por outras empresas da região, também para a geração de energia.

Assim, as empresas que possuem florestas estão alterando seus sistemas de manejo e colheita de forma a aumentar a quantidade de biomassa produzida, que será destinada a geração de energia, tanto em queimadores próprios, como para venda a terceiros.

Na caldeira CF8 se observa, que após a instalação do secador de biomassa, houve um aumento na produção média mensal de vapor em 12%, quando comparado o ano de 2015 com a média do período de 2012 a 2014 (figura 2).



Nota: Médias seguidas da mesma letra, não diferem significativamente entre si (Tukey $P > 0,05$).

Figura 2 - Produção de vapor nas caldeiras CF8 e CF9 durante o período de 2012 a 2015 em uma indústria de celulose e papel em Santa Catarina

Segundo Boriouchkine; Zakharov e Jämsä-Jounela (2012), a redução no teor de umidade da biomassa contribui para a redução da perda de energia na secagem do combustível, levando ao aumento da temperatura dos gases gerados durante a combustão.

A temperatura mais alta dos gases de combustão leva a um potencial aumento na produção de vapor (BORIOUCHKINE; ZAKHAROV E JÄMSÄ-JOUNELA, 2012; DE FUSCO; JEANMART E BLONDEAU, 2015).

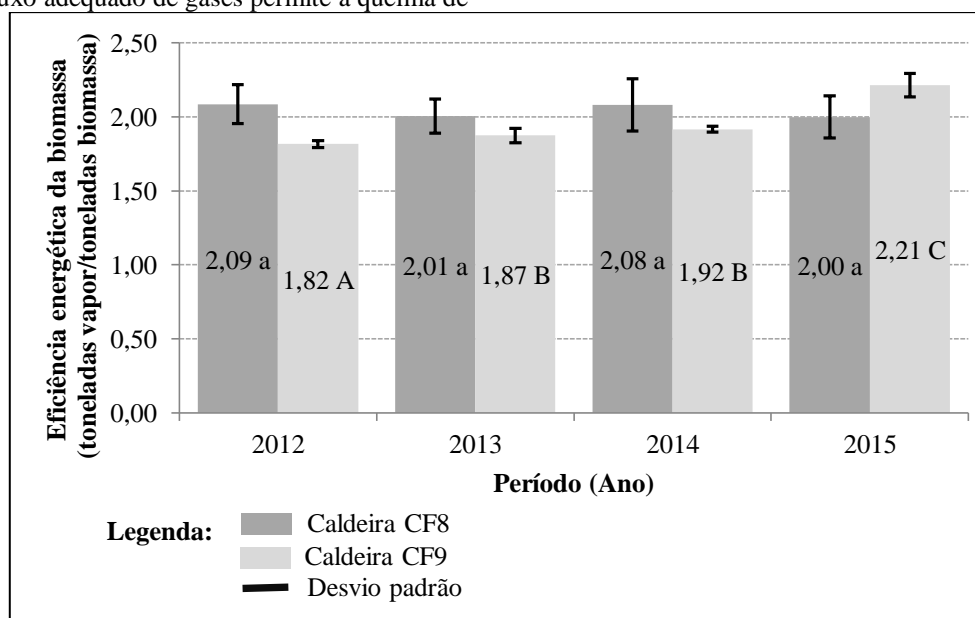
Dados de projeto da caldeira CF8 indicam que este equipamento foi projetado para operar com combustível principal contendo 55% de umidade. Ao operar com valores de umidade na ordem de 48%, seria esperado também o aumento na eficiência energética do combustível, o que não foi observado (Figura 3). Isto pode ser atribuído ao aumento na velocidade de queima do combustível (BORIOUCHKINE; ZAKHAROV E JÄMSÄ-JOUNELA, 2012). Este fato permite a queima de maior quantidade de combustível por unidade de tempo, disponibilizando maior quantidade de energia para a geração de vapor.

De Fusco; Jeanmart e Blondeau (2015) também relacionam o teor de umidade com o fluxo de gases na combustão, e com uma combustão mais completa para menores teores de umidade. Assim, uma combustão mais completa e fluxo adequado de gases permite a queima de

maior quantidade de biomassa. Houve um aumento de 18% no consumo de biomassa e por consequência maior geração de energia disponível para a geração de vapor.

Na CF9 não houve aumento estatisticamente significativo na produção de vapor, mas houve aumento de 19% na eficiência energética do combustível (toneladas de vapor / toneladas de biomassa) (figura 3), quando comparado o período após a implantação do secador de biomassa com o observado antes da instalação do equipamento.

O aumento da eficiência energética do combustível e a produção de maior quantidade de energia a partir da mesma quantidade de combustível queimado são benefícios esperados com a redução do teor de umidade na biomassa (LUK et al., 2013; HAQUE; SOMERVILLE, 2013), uma vez que a redução de umidade eleva o poder calorífico da biomassa (DERMIBAS, 2005). Quanto menor o teor de umidade, maior será a redução no consumo da biomassa (LORA; NOGUEIRA, 2003). Além disso, de acordo com os dados técnicos de projeto, A caldeira CF9 foi projetada para utilizar biomassa à uma umidade de 60%. Este valor é superior aos observados na biomassa antes da instalação do secador. Isso indica que o equipamento estava operando nas condições normais de projeto quanto ao nível de umidade do combustível e operou próximo a sua capacidade nominal de produção de vapor durante todo o período do estudo.



Nota: Médias seguidas da mesma letra, não diferem significativamente entre si (Tukey $P > 0,05$).

Figura 3: Eficiência energética da biomassa nas caldeiras CF8 e CF9, durante o período de 2012 a 2015 em uma indústria de celulose e papel em Santa Catarina

Portanto, houve um comportamento diferente para os dois equipamentos analisados quanto ao uso de biomassa com teor de umidade menor. Na CF8 houve um incremento significativo na produção de vapor para um mesmo nível de eficiência do combustível, ao passo que no outro equipamento se obteve aumento significativo na

eficiência para um mesmo nível de produção de vapor. Para justificar este comportamento diferenciado, deve-se considerar que apesar de ambos os equipamentos serem caldeiras de grelhas móveis, vibratória na CF8 e rotativa na CF9 estas apresentam características operacionais distintas.

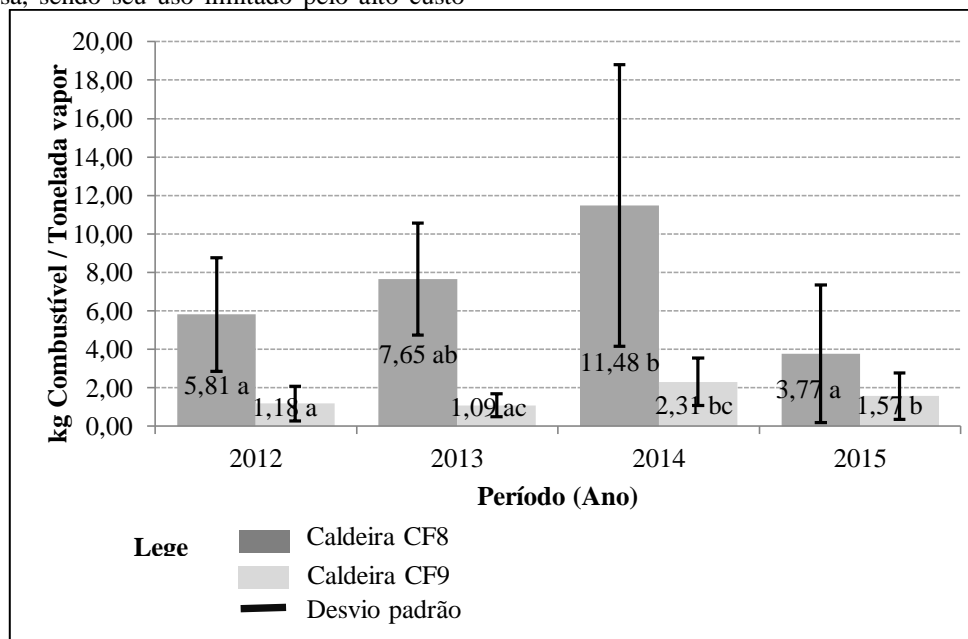
O tempo para combustão completa do leito, e, portanto, melhor aproveitamento do combustível, depende fortemente das condições de funcionamento, tais como fluxo de ar primário, temperatura da câmara de combustão e deslocamento do leito (MILJKOVIĆ; PEŠENJANSKI E VIĆEVIĆ, 2013) de forma que, condições diferentes promoverão também tempos de combustão diferenciados.

O baixo poder calorífico é um dos problemas do uso da biomassa em caldeiras (SAIDUR et al., 2011). Por isso, ambos os equipamentos (CF8 e CF9) utilizam combustíveis auxiliares a fim de manter a produção de vapor dentro dos parâmetros de vazão, pressão e temperatura de vapor necessários à operação normal da indústria. O óleo combustível derivado de petróleo tipo BPF 3A é utilizado em ambos os equipamentos e um piche, de origem vegetal somente na CF8. Estes combustíveis apresentam poder calorífico muito superior ao da biomassa, sendo seu uso limitado pelo alto custo

em relação ao da biomassa, no caso do óleo combustível e no caso do piche pela disponibilidade. As quantidades requeridas de combustível auxiliar não são estáticas, variam de acordo com as condições de queima do combustível principal, sendo desejado o uso da menor quantidade possível.

A elevação do poder calorífico da biomassa propiciada pela redução do teor de umidade levou a redução na necessidade de uso dos combustíveis auxiliares na CF8. Houve uma redução de 47% na média mensal de consumo de óleo combustível e piche na CF8. A média mensal de consumo destes combustíveis passou de 8,0 para 3,8 kg/ t de vapor produzido (figura 4).

Porém, o mesmo não ocorreu na CF9, onde não foi observada diferença estatística entre as médias anuais. Cabe salientar que o consumo de combustível auxiliar neste equipamento é muito inferior ao da CF8 (figura 4).



Nota: Médias seguidas da mesma letra, não diferem significativamente entre si (Tukey $P > 0,05$).

Figura 4 - Consumo específico médio de combustíveis auxiliares nas caldeiras CF8 e CF9, durante o período de 2012 a 2015 em uma indústria de celulose e papel em Santa Catarina

Quando comparado o consumo de combustível auxiliar e o teor de umidade a biomassa das caldeiras CF8 e CF9, observa-se que em ambas, as maiores médias mensais do consumo de combustível auxiliar se deram nos meses onde foram registradas também as maiores médias no teor de umidade dos cavacos (Figura 5 e 6).

O uso intermitente e a variabilidade das características do combustível principal, explicam o alto desvio padrão observado no consumo do combustível auxiliar. Deve ser considerado também que o teor de umidade excessivo na biomassa provoca flutuações na produção da caldeira

(BORIOUCHKINE; ZAKHAROV E JÄMSÄ-JOUNELA, 2012) e dificultam a operação da mesma (HOLMBERG, 2007), levando a uma necessidade maior do uso de combustíveis auxiliares. As variações no teor de umidade da biomassa são inerentes a este tipo de combustível a base de madeira. O teor de umidade da madeira varia de uma parte para outra da árvore, sendo menor no tronco do que na raiz e copa (DERMIBAS, 2005). O teor de umidade também varia de acordo com a época da colheita, estocagem, tamanho e forma do material (BRAND et al., 2011).

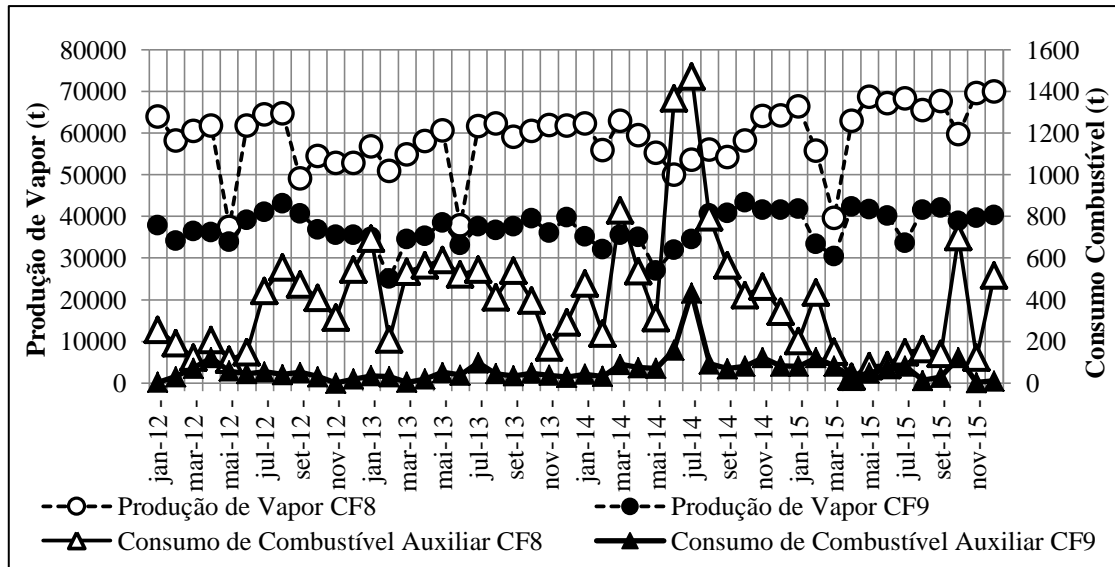


Figura 5 - Flutuações na produção de vapor, consumo de combustíveis auxiliares nas caldeiras CF8 e CF9, durante o período de 2012 a 2015 em uma indústria de celulose e papel em Santa Catarina.

Houve comportamento diferenciado da CF8 em relação aos anos anteriores à instalação do secador de biomassa. Nos meses de junho e julho de 2014 houve um significativo aumento do consumo de combustíveis auxiliares (figura 5), muito acima do praticado em qualquer outro mês do período analisado, o que promoveu a elevação do desvio padrão daquele ano em relação aos demais. A elevação do consumo se explica

em parte pela elevação do teor de umidade dos cavacos observada no mesmo período (figura 6).

Na figura 6 é apresentado o comportamento das médias mensais do teor de umidade dos cavacos para o período anterior a instalação do secador, e também da biomassa na entrada do secador, após sua instalação.

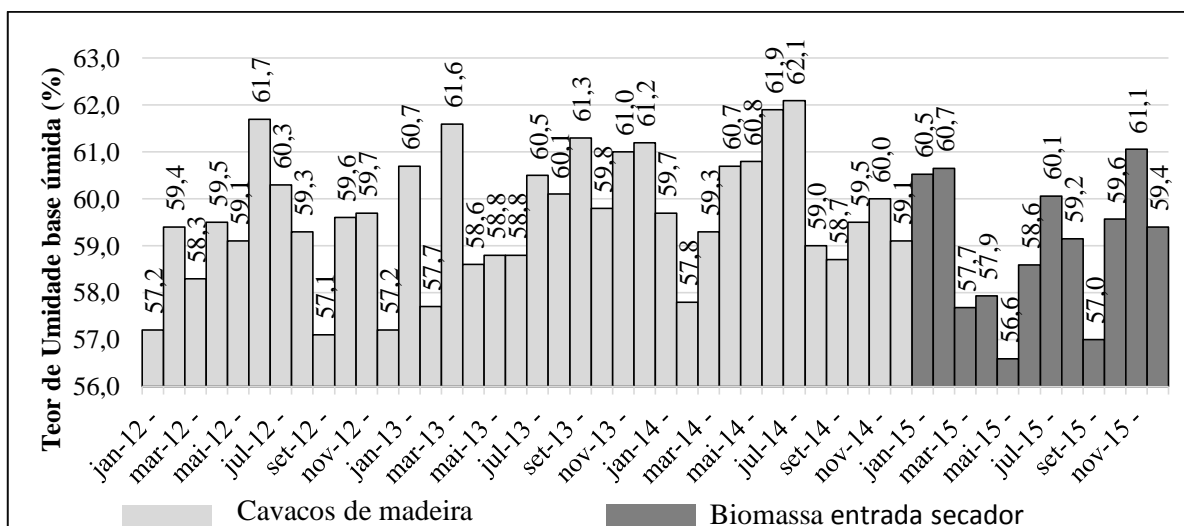


Figura 6 - Médias mensais de umidade nos cavacos de madeira e na biomassa de alimentação do secador de biomassa.

A Figura 7 mostra a relação entre o teor médio de umidade dos cavacos para queima e o consumo de combustível auxiliar nas caldeiras CF8 e CF9. Pode-se observar que nos períodos onde houve maior consumo de combustível auxiliar também foram os que

apresentaram maior teor médio de umidade nos cavacos para queima. A ausência de correlação direta entre o teor de umidade da biomassa e o consumo de combustível auxiliar, indica que além do teor de umidade, outras variáveis devem afetar o desempenho destas caldeiras.

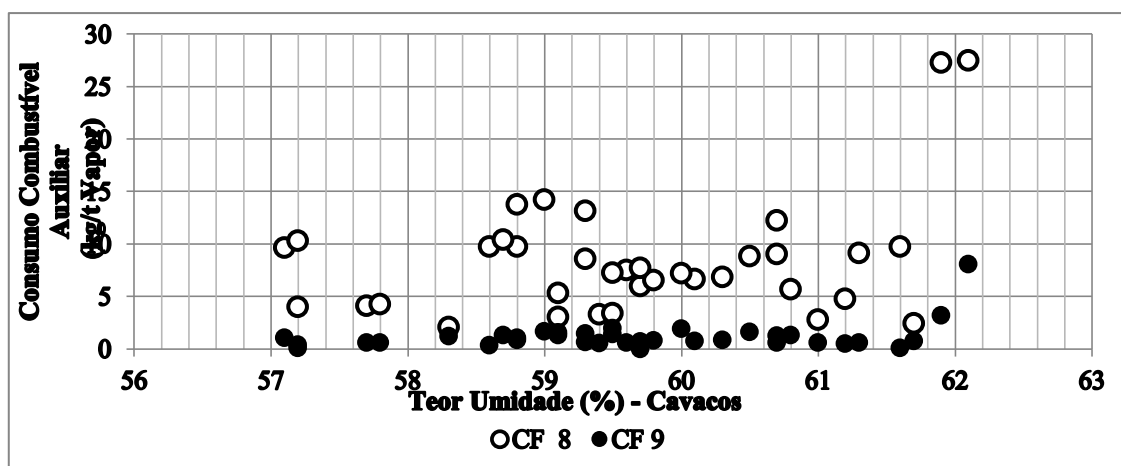


Figura 7 - Relação entre a umidade média dos cavacos para queima e consumo específico de combustível auxiliar.

Variáveis de processo e do combustível que podem afetar a eficiência da caldeira e, portanto, responder pelas flutuações na geração de vapor e no consumo de combustível. Boriouchkine; Zakharov e Jämsä-Jounela (2012), em seu estudo sobre os efeitos dos parâmetros operacionais na queima de biomassa afirmaram que além do teor de umidade, o fluxo de ar primário e o tamanho das partículas afetam a combustão. Lora; Nogueira, (2003) apontam que o ar de combustão é um fator fundamental para a eficiência dos equipamentos que empregam biomassa. O excesso de ar aumenta as perdas de calor com os gases de exaustão, enquanto que havendo falta de ar, a combustão será incompleta desperdiçando energia.

4 CONCLUSÃO

A redução do teor de umidade na biomassa promovida pela instalação de um secador tipo rotativo propiciou benefícios diferenciados para cada um dos equipamentos que utilizam biomassa como combustível principal.

Na CF8, a redução do teor de umidade no combustível resultou no aumento da quantidade de combustível queimado, possibilitando a elevação da produção de vapor. A eficiência energética da biomassa neste equipamento não foi alterada com a redução do teor de umidade. Houve redução no consumo de combustíveis auxiliares, representando redução na queima de óleo combustível e piche.

Na CF9 não foi observada variação significativa na produção de vapor, mas houve um aumento na eficiência energética da biomassa. Não houve redução significativa no consumo de combustíveis auxiliares neste equipamento.

5 REFERÊNCIAS

ALAMIA, A.; STRÖM, H.; THUNMAN, H. Design of an integrated dryer and conveyor belt for woody biofuels. **Biomass and Bioenergy**, v. 77, p. 92-109, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 14929**: madeira: determinação do teor de umidade de cavacos: método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2003.

BORIOUCHKINE, A.; ZAKHAROV, A.; JÄMSÄ-JOUNELA, S-L. Dynamic modeling of combustion in a BioGrate furnace: The effect of operation parameters on biomass firing. **Chemical Engineering Science**, v. 69, n. 1, p.669-678, 2012.

BRAND, M.A.; DE MUÑIZ G.I.B.; QUIRINO W.F.; BRITO J.O. Storage as a tool to improve wood fuel quality. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2581-2588, 2011.

BRAND, M.A.; DE MUÑIZ, G.I.B. Influência da época de colheita da biomassa florestal sobre sua qualidade para a geração de energia. **Scientia forestalis**, v.38, n. 88, p. 619-628, 2010.

CHUA, K.J.; MUJUMDAR, A.S.; HAWLADER, M.N.A.; CHOU, S.K.; HO, J.C. Batch drying of banana pieces—effect of stepwise change in drying air temperature on drying kinetics and product colour. **Food Research International**, v. 34, n. 8, p. 721-731, 2001.

DE FUSCO, L.; JEANMART, H.; BLONDEAU, J. A modelling approach for the assessment of an air-dryer economic feasibility for small-scale biomass steam boilers. **Fuel Processing Technology**, v. 134, p. 251-258, 2015.

DEMIRBAS, A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. **Progress in energy and combustion Science**, v. 31, n. 2, p. 171-192, 2005.

FAGERNÄS, L.; BRAMMER, J.; WILÉN, C.; LAUER, M.; VERHOEFF, F. Drying of biomass for second

generation synfuel production. **Biomass and Bioenergy**, v.34, n. 9, p. 1267-1277, 2010.

FYHR, C.; RASMUSON, A. Some aspects of the modelling of wood chips drying in superheated steam. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.40, n. 12, p. 2825-2842, 1997.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. **Estudos avançados**, v. 21, n. 59, p. 7-20, 2007.

HAQUE, N.; SOMERVILLE, M. Techno-economic and environmental evaluation of biomass dryer. **Procedia Engineering**, v.56, p. 650-655, 2013.

HOLMBERG, H. **Biofuel drying as a concept to improve the energy efficiency of an industrial CHP plant**. Helsinki University of Technology; 2007.

JENKINS, B.; BAXTER, L.L.; MILES, T.R. Combustion properties of biomass. **Fuel processing technology**, v. 54, n. 1, p. 17-46, 1998.

LI, H.; CHEN, Q.; ZHANG, X.; FINNEY, K.N.; SHARIFI, V.N.; SWITHENBANK, J. Evaluation of a biomass drying process using waste heat from process industries: A case study. **Applied Thermal Engineering**, v. 35, p. 71-80, 2012.

LORA, E.E.; NOGUEIRA, L.A. **Dendroenergia Fundamentos e Aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência; 2003.

LUK, H.T.; LAM, T.Y.G.; OYEDUN, A.O.; GEBREEGZIABHER, T.; HUI, C.W. Drying of biomass for power generation: A case study on power generation from empty fruit bunch. **Energy**, v. 63, p. 205-215, 2013.

MILJKOVIĆ, B.; PEŠENJANSKI, I.; VIĆEVIĆ, M. Mathematical modelling of straw combustion in a moving bed combustor: A two dimensional approach. **Fuel**, v. 104, p. 351-364, 2013.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Resenha Energética Brasileira do Exercício 2015. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <+Resenha+Energética+Brasileira+2016+-+Ano+Base+2015+(PDF)/66e011ce-f34b-419e-adf1-8a3853c95fd4;jsessionid=B415252F7145EC1BD6596B2C8137D1B8.srv155?version=1.0>. Acesso em: 26 agos. 2016.

RYU, C.; YANG, Y.B.; KHOR, A.; YATES, N.E.; SHARIFI, V.N.; SWITHENBANK, J. Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments—fuel type, equivalence ratio and particle size. **Fuel**, v. 85, n. 7, p. 1039-1046, 2006.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E.A.; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M.S.; MEKHILEF, S. A review on biomass

as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15, n. 5, p. 2262-2289, 2011.

SOARES, T.S.; CARNEIRO, A.D.C.O.; GONÇALVES, E.O.; LELLES, J.G. Uso da biomassa florestal na geração de energia. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, v. 8, 2006.

WIMMERSTEDT, R. Recent advances in biofuel drying. **Chemical Engineering And Processing: Process Intensification**, v. 38, n. 4, p. 441-447, 1999.