

COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE CALDEIRAS COM PALHA E SEM PALHA: UM ESTUDO DE CASO

Willian Henrique Alves da Silva¹

Darlan Marques da Silva²

RESUMO

Um bom desempenho industrial é algo que grande parte das organizações almejam, devido às vantagens que tais organizações podem ter frente aos seus concorrentes e, conseqüentemente, com isso, podem aumentar a sua longevidade. No segmento agroindustrial, em relação ao processo de eficiência energética, não é diferente, sendo assim, o desenvolvimento deste trabalho foi realizado em uma usina produtora de energia elétrica e etanol a partir da matéria-prima cana-de-açúcar, usina essa localizada no município de Quirinópolis, sudoeste de Goiás. A empresa possui alta tecnologia de processos e softwares, que auxiliam no monitoramento e historia todas as variáveis e processos pelo COI (Centro de Operações Industriais), o que aumenta a confiabilidade dos dados a serem retratados no estudo. O objetivo deste trabalho consiste em um estudo de caso em duas caldeiras, e busca comparar a eficiência de combustão de ambas, sem a biomassa da palha como suplemento, e com inserção da palha no sistema. Assim, pode-se verificar a eficiência energética no quesito de melhoria ou não, com o novo combustível, por meio de balanços de massa, com gráficos gerados pelo software *Process Book* (PI), que monitora, continuamente, online, as variáveis da combustão e através desses recursos, analisou-se os resultados obtidos. Como demonstrado no levantamento de dados, a eficiência térmica mostrou-se muito importante para a geração de energia elétrica, pois quanto maior o rendimento de uma caldeira, menor o consumo específico de tal energia e, conseqüentemente, maior a eficiência dos processos. Nas duas últimas safras analisadas, a presença de palha como suplemento das caldeiras não se mostrou relevante, desde que o consumo específico projetado para as caldeiras ((Kg_{vapor}/Kg_{bagaco})) fosse obedecido, resultando em um faturamento de aproximadamente R\$ 15.942.596,02 milhões.

Palavras-chave: Caldeiras. Eficiência de Combustão. Palha. Energia Elétrica.

¹ Graduando em Engenharia de Produção pela Universidade de Rio Verde, Campus Rio Verde, GO.

² Orientador, mestre em Engenharia de Produção.

1. INTRODUÇÃO

Diante da escassez de chuvas e da crise energética no início do século XXI, no ano de 2002 foi instituída a lei nº 10.438/2002, que dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, e cria o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) e a CDE (Conta de Desenvolvimento Energético). O PROINFA teve como objetivo a expansão e a participação de produção de energia elétrica do produtor independente, ou seja, por meio de fontes alternativas renováveis (pequenas hidrelétricas, usinas eólicas, usinas termelétricas de biomassa); já a CDE possui dois objetivos, um deles é o desenvolvimento energético dos Estados e o outro a promoção da integração do serviço de energia elétrica em território brasileiro (ANEEL, 2017).

Atualmente, o Brasil está passando por um momento de evolução quando o assunto é produção de energia elétrica por fontes alternativas. Essas fontes, chamadas também de renováveis, estão contribuindo de forma gradativa para o crescimento da matriz de balanço energético nacional. A energia eólica, por exemplo, em maio de 2016 cresceu 53%, comparada com o mês de 2015. As fontes hidráulicas (Hidroelétricas), no mesmo período, tiveram um crescimento de 10,4% (BRASIL, 2016-a).

As fontes hidráulicas ainda continuam sendo a principal fonte de produção no país, representando 61,3% da produção total, acompanhadas dos combustíveis fósseis (17%), biomassa (8,7%), e eólica (5,9%). O governo tem como objetivo expandir em 23% a participação de fontes renováveis na matriz, até o ano de 2030 (BRASIL, 2016-b).

A energia elétrica produzida por usinas termoelétricas é mais cara que a energia produzida por usinas hidroelétricas, no entanto, para suprir a demanda no país, o governo utiliza como alternativa as fontes térmicas. A falta de chuva nas bacias faz com que o governo recorra às usinas térmicas, vindo, conseqüentemente, a aumentar a conta dos usuários (bandeiras amarelas e vermelhas) na conta do consumidor (NDONLINE, 2017).

Assim, vale lembrar que o uso do bagaço da cana-de-açúcar é utilizado como biomassa para alimentação de caldeiras e é, também, é a fonte renovável mais utilizada pelas usinas termoelétricas, a qual possui grande potencial futuro para expansão de outras unidades no país. Porém, atualmente, tal fonte é apontada por levantamentos da *Survey of Energy Resources 2007*, publicado pelo *World Energy Council* (Conselho Mundial de Energia) e representa cerca

de 15% do consumo de energia primária, valor considerado muito baixo por se tratar de um recurso sustentável (ANEEL, 2007).

A palha como é conhecida no setor sucroalcooleiro é denominada entre folhas verdes, folhas secas e ponteiros da cana-de-açúcar. A palha em sua composição equivale entre 15 a 30% da massa da cana-de-açúcar verde e é comparável à energia do bagaço das gramíneas. Essa biomassa pode ser substituída em termos pelo próprio bagaço, mas o ideal é que ela seja utilizada como suplemento e não como fonte principal (ALVES, 2011).

Em meio a esse assunto, o intuito deste trabalho é comparar a eficiência de combustão de uma caldeira sem a biomassa da palha, como suplemento, e a inserção dessa palha no sistema. Também, objetiva-se verificar se a eficiência energética melhorou ou não, com o novo combustível, por meio de balanços de massa, com gráficos gerados pelo software *Process Book* (PI), que monitora, continuamente, online, as variáveis da combustão e via desses recursos, buscar-se-á analisar os resultados obtidos.

Assim, o presente trabalho foi estruturado da seguinte forma: no tópico 1, destaca-se a contextualização das fontes energéticas como um ponto crucial na economia brasileira, com foco na crescente participação das usinas sucroalcooleiras; no tópico 2, indaga-se sobre o processo de produção de vapor e a sua combustão; no terceiro tópico, demonstra-se a metodologia adotada para a construção da pesquisa; no quarto, discute-se as análises e discussões sobre o assunto; e não menos importante, no quinto e último tópico, apresenta-se as conclusões que puderam ser tiradas a partir do estudo.

2. CALDEIRAS

Caldeiras ou geradores de vapor como são conhecidas, são equipamentos cuja finalidade é a produção de vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando diversas fontes alternativas de energia como, por exemplo, a biomassa (SANTOS *et al*, 2006). O vapor produzido pelas caldeiras é utilizado em indústrias para alimentação de turbo geradores, evaporadores e destilarias.

Conclui-se que a energia armazenada pelas fontes de combustíveis é transferida para a água e, conseqüentemente, para o produto final em forma de energia térmica. Esse vapor é direcionado para o processo de evaporação do caldo, destilarias, e ao realizar a troca de calor retorna como condensado para a caldeira, novamente em seu estado líquido, tornando-se um

processo fechado (SALUM, 2011). O princípio básico do funcionamento de uma caldeira é demonstrado abaixo pela Figura 1.

Figura 1 – Esquema de um funcionamento básico de uma Caldeira Monodrum Caldema



Fonte: Fornecido pela empresa em estudo (2017).

As caldeiras são de suma importância nas agroindústrias e algo que não pode ser negligenciado no espaço industrial, é a combustão. Assim, será destacado na próximo subtópico, fundamentos básicos do processo de combustão.

2.1 COMBUSTÃO DE CALDEIRAS

Ao iniciar a operação de uma caldeira, existem dois processos que podem ser definidos, conforme preconiza (SALUM, 2011):

- Combustão completa;
- Combustão incompleta.

Quando o combustível (biomassa) inserido na caldeira, por meio dos alimentadores, mistura-se ao oxigênio (comburente) na fornalha, fornecido pelos ventiladores, fala-se que a

combustão está completa. Quando a caldeira está com a queima completa, ocorre um determinado valor de produtos, nesse caso, o número é limitado (SALUM, 2011).

Silva Segundo (2014) retrata que a combustão de uma caldeira, pode ser monitorada por meio de dois processos; completo e incompleto. O processo de combustão incompleto é o mais indesejável, em se tratando de balanço energético, já que o combustível utilizado durante a queima não é aproveitado completamente. Esse combustível que não foi aproveitado é liberado pela chaminé em forma de gases, vindo a emitir produtos poluentes (como por exemplo, a fuligem, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂)), nocivos para a atmosfera, os quais contribuem para a poluição do meio ambiente.

Para realizar a perfeita e completa oxidação do combustível, utiliza-se o excesso de ar. Esse método garante que o combustível seja completamente queimado, ou seja, dentro do processo de combustão completa. Porém, quanto maior for o excesso de ar, conseqüentemente maior será o teor de CO₂ e menor será a eficiência térmica da caldeira (SILVA SEGUNDO, 2014).

Ao conhecer a composição do combustível, e por meio da estequiometria da reação, obtêm-se a quantidade ideal de ar para realizar a queima adequada do combustível. O ar ideal, teoricamente fornecido para a queima completa é denominado de “ar teórico” ou “ar estequiométrico”. Usando essas informações na prática, é raro obter-se uma boa queima utilizando apenas o ar estequiométrico, sendo necessário, às vezes, recorrer a outros recursos para evitar a combustão incompleta (SALUM, 2011).

De acordo com Silva Segundo (2014), as reações estequiométricas na combustão de uma caldeira podem ser representadas nas equações (1.a e 1.b):



A combustão incompleta é gradativamente desfavorável, analisada do ponto de vista energético, ambiental e até mesmo de segurança. Além de não conseguir queimar o combustível, ocorrem acúmulos de biomassa na grelha e liberação de diversos produtos nocivos ao meio ambiente, como por exemplo: monóxido de carbono (CO), que liberado em espaços

confinados pode ser letal. Há também liberação de átomos de carbono sob a forma de fuligem (SALUM, 2011).

Ainda de acordo com Salum (2011), quando existe a ineficiência de oxigênio na combustão, outros fatores aparecem devido à escassez desse, e esses fatores contribuem de forma sucinta para o baixo rendimento térmico que a caldeira pode apresentar. Alguns desses fatores podem ser identificados, como: baixa turbulência, baixo tempo de residência da biomassa, nebulização deficiente do combustível, quando se trata de líquidos.

Rodrigues *et al.* (2002) relata que ao se queimar um combustível, é liberado uma grande quantidade de calor, sendo essa quantidade relativamente proporcional ao peso do material que foi queimado.

Peres *et al.* (2007) precede que, quanto maior for a energia contida em um combustível, maior será seu poder calorífico, sendo essa variável de suma importância para a identificação da qualidade do combustível a ser utilizado como fonte de insumo energético de uma caldeira.

O poder calorífico pode ser encontrado de duas formas: poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico superior (PCS). Rodrigues *et al.* (2002) e Peres *et al.* (2007) definem que o poder calorífico inferior, ou seja, a água que foi originada da combustão encontra-se no seu estado de vapor. Para o poder calorífico superior, considera-se a totalização de energia que o combustível contém, levando em consideração a água gerada na combustão mais a desprendida no combustível, ambas no seu estado líquido.

O poder calorífico superior é determinado por meio de um equipamento chamado calorímetro (SANTIAGO, 2007). Do combustível a ser analisado é retirado certa quantidade de amostra, a qual é queimada em uma câmara fechada, adicionado a oxigênio puro, com volume constante e o calor desprendido na combustão é transferido para o calorímetro (FERREIRA, 2006). Como o sistema encontra-se fechado, a possibilidade de conter água no combustível é desprezada, não contabilizando perdas, pois a água presente na amostra é evaporada e condensada novamente.

No setor industrial, o poder calorífico inferior é o que resulta em melhor aplicabilidade, quando se trata de combustão, já quando a combustão é realizada em um sistema aberto, a água que está presente no combustível é dissipada junto, e ao entrar em contato com a combustão, tal água passa do seu estado líquido para o vapor, sendo perdida no processo, na forma de calor (ARONI, 2005). Para calcular o poder calorífico inferior, desconta-se do poder calorífico superior à quantidade de massa de água do combustível.

Um dos fatores de suma importância que influencia diretamente o poder calorífico dos materiais é o teor de umidade. Durante a queima de um combustível com alto teor de umidade, parte da água é evaporada, fazendo com que parte da energia liberada na combustão seja utilizada nessa evaporação. Portanto, quanto maior a umidade, menor será a quantidade de energia fornecida pelo combustível. No caso do bagaço da cana-de-açúcar, a umidade está relacionada diretamente ao rendimento de uma combustão (PELLEGRINI, 2002).

Pellegrini (2002) relata que a temperatura de ignição pode diminuir de 300 °C a 400 °C, quando a umidade do bagaço encontra-se entre 35% a 40%, aumentando, gradativamente, a velocidade da queima, pois ao entrar na fornalha, seu tempo de secagem ocorrerá em tempo menor. Para umidade em torno de 35%, a temperatura da combustão pode ultrapassar de 1.100 °C, gerando um aumento da transferência de calor por radiação, condução e convecção nos tubos da parede da fornalha, serpentinas da área de troca térmica que compõem a caldeira.

Germek (2005) relata que o poder calorífico da palha e o rendimento da geração de vapor têm grande papel na transformação de energia elétrica nos geradores e, conseqüentemente, influência direta da umidade da palha, sendo importante o estudo em questões tecnológicas para a utilização desses combustíveis com fins de cogeração.

Em estudos, Corrêa Neto e Ramon (2002) destacam que a composição do bagaço e da palha são inerentes aos carbonos fixos, voláteis e às cinzas, com destaque aos voláteis, que encontram-se entre 83% - 85,8%, da sua composição final (ver Tabela 1).

Tabela 1 – Composição do bagaço e palha obtidos pela análise imediata

<i>Composição</i>	<i>Bagaço (%)</i>	<i>Palhico (%)</i>		
		<i>Folhas verdes</i>	<i>Folhas secas</i>	<i>Ponteiros</i>
<i>Carbono fixo</i>	13	11.7	10.38	11.6
<i>Voláteis</i>	83	85.2	85.8	84.1
<i>Cinzas</i>	4	3.2	3.3	4.3

Fonte: Corrêa Neto e Ramon (2002).

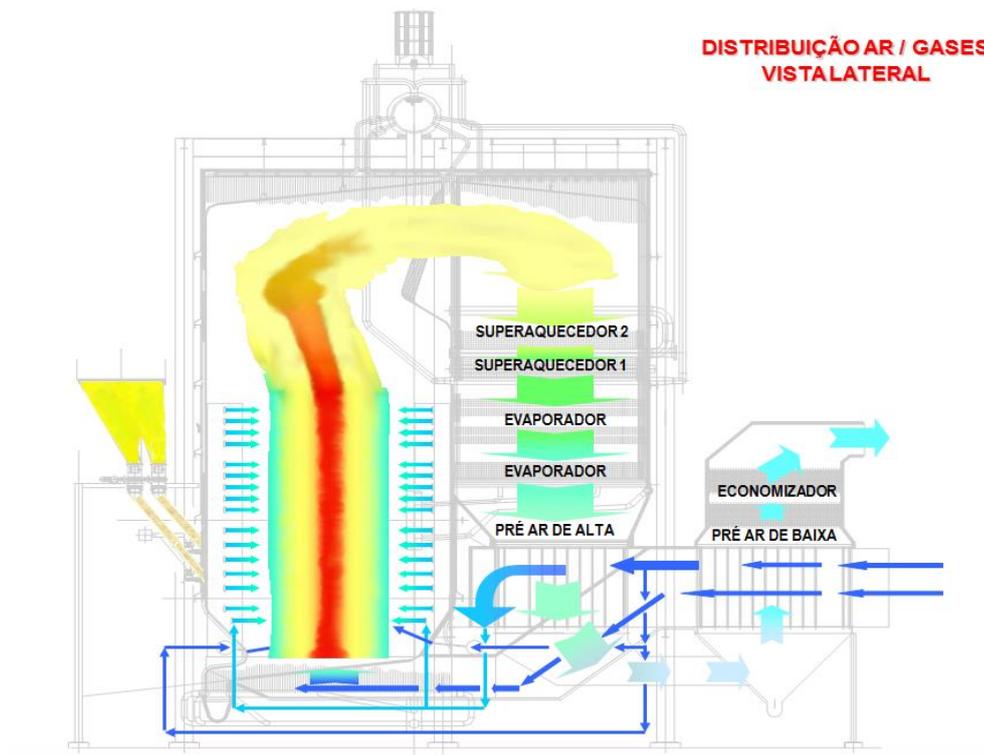
Outra variável importante é a composição química de um combustível, pois suas características influenciam no rendimento energético consideravelmente. Maués (2007) afirma que o bagaço e palha são exemplos bem destacáveis, pois constituem-se, equiparavelmente, à mesma composição química, sendo: carbono (~45%), hidrogênio (~6%), nitrogênio (0,5-1%), oxigênio (~43%) e enxofre (~0,1%). Para obter um alto poder calorífico é necessário que o

combustível apresente grandes quantidades de carbono e hidrogênio, porém grandes quantidades de oxigênio refletem efeito inverso, já que o combustível, quando apresenta grandes quantidades de oxigênio, tende a diminuir o poder calorífico (PEREIRA Jr., 2001).

Cortez *et al.* (2008) descreve que os combustíveis e seu processo de combustão são de suma importância na área de tecnologia atualmente. O processo de combustão dispõe da maior parte de energia utilizada atualmente no mundo, utilizada como, por exemplo, em aquecimento, transporte e geração de energia elétrica (JOSÉ, 2004). Com o crescimento acentuado na oferta de energia calorífica, obtida na maioria dos casos por combustíveis, vem se tornando possível grandes atividades e procedimentos industriais (HILSDORF *et al.*, 2004).

A Figura 2 demonstra a distribuição de ar/gases de uma combustão, ao mesmo tempo o fluxo dos gases gerados na fornalha até a saída da caldeira.

Figura 2 – Vista lateral de uma distribuição de ar/gases e seus componentes de uma caldeira aquatubular



Fonte: Fornecido pela empresa em estudo (2017).

Nessa caldeira, as etapas são:

- 1 - Superaquecedor 2: trocador de calor em que os gases aquecem o vapor saturado vindo do superaquecedor 1, transformando-o em vapor superaquecido.

- 2 – Superaquecedor 1: trocador de calor em que os gases aquecem o vapor vindo do tubulão e elevam sua temperatura para, posteriormente, adentrar ao superaquecedor 2.
- 3 – Evaporador: trocador de calor que aproveita o fluxo dos gases para transformar a água em vapor saturado.
- 4 – Economizador: trocador de calor que através do calor sensível dos gases de combustão que saem da caldeira, aquecem a água de alimentação.
- 5 – Pré-ar: trocador de calor que aquece o ar de combustão e faz a troca de calor com os gases de exaustão da caldeira.

O processo de combustão está intrinsecamente correlacionado com a eficiência, que é o escopo da investigação desta pesquisa, pois quanto maior essa eficiência melhor o desempenho industrial.

2.2 EFICIÊNCIA DE CALDEIRAS

Quando uma caldeira é colocada em operação, é necessário monitorar, constantemente, algumas variáveis para que ela possa desempenhar uma excelente performance que atenda seu investimento em relação à eficiência térmica, por isso utilizam-se balanços de massa e energia, por meio do PI e Excel, juntos, como plataforma para obtenção desses resultados (SALUM, 2011).

Alguns métodos são aplicados para auxiliar no desenvolvimento desses cálculos conforme Salum (2011) e Silva Segundo (2014), que são:

- **Método direto:** esse método contabiliza os fluxos energéticos que estão entrando e saindo da caldeira.

Apesar de ser um método simples, desconsidera-se todas as perdas existentes no processo (ver Equação 2).

$$Q_{entra} = Q_{sai} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

O Q_{entra} , corresponde ao calor ($K_{cal}/Kg_{combustível}$) que é gerado em volume na combustão.

O Q_{sai} , significa o calor ($K_{cal}/Kg_{combustivel}$) que está saindo do volume gerado inicialmente, desconsiderando todas as perdas.

Para realizar o cálculo do rendimento utiliza-se a Equação 3:

$$\eta = \frac{Q_{\acute{u}til}}{Q_{dispon\acute{i}vel}} \quad (\text{Equação 3})$$

na qual:

O Rendimento (η) é o valor encontrado da eficiência da caldeira em relação à energia liberada por meio da combustão da biomassa com o comburente expresso em porcentagem.

O $Q_{\acute{u}til}$ ($K_{cal}/Kg_{combustivel}$) é aquele que realmente é utilizado para transformação da água em vapor saturado ou superaquecido, dependendo do modelo e aplicação da caldeira.

O $Q_{dispon\acute{i}vel}$ ($K_{cal}/Kg_{combustivel}$) é a energia total gerada pela queima do bagaço da cana-de-açúcar mais o ar, ou seja, é o calor oriundo da combustão.

• **Método indireto:** no método indireto são consideradas todas as perdas existentes no processo de combustão de uma caldeira e através desse método é realizado o acompanhamento da eficiência energética:

- Perdas associadas por cinzas³;
- Perdas por convecção e radiação⁴;
- Perdas por vazamentos e purgas⁵;
- Perdas por combustão incompleta⁶.

Esse método é o mais convencional, pois trata de forma mais sucinta das perdas relacionadas ao processo de combustão e mostra os pontos a serem melhorados para a busca do melhor desempenho de operação do equipamento (ver Equação 4).

³ São as perdas associadas ao combustível não queimado que se perde através das cinzas de fundo.

⁴ Representa a perda por radiação e convecção de calor da caldeira para o ambiente. Toda caldeira é isolada para evitar essas perdas, no entanto é impossível evitá-las.

⁵ São as perdas por vazamentos de gases no invólucro das caldeiras. Purgas – limpezas do sistema de grelha e fuligem nas serpentinas dos tubos.

⁶ Quando a combustão não está completa, ou seja, o ar ou combustível está fora de sincronismo, acontecem perdas de calor potencial.

$$\eta = 100 - \sum \frac{Q_{perdas}}{Q_{disponível}} \quad (\text{Equação 4})$$

Sabendo-se que:

O rendimento (η) é o valor encontrado da eficiência da caldeira em relação às perdas de calor e energia disponíveis, liberadas por meio da combustão da biomassa com o comburente e sua unidade é expresso em porcentagem.

Q_{perdas} ($Kcal/Kg_{combustível}$) significa toda energia que não foi aproveitada na combustão, durante a operação da geradora de vapor, devido ao combustível não queimado, vazamentos nos invólucros, sistema de limpeza de grelha e fuligem.

$Q_{disponível}$ ($Kcal/Kg_{combustível}$) é a energia total gerada pela queima do bagaço da cana-de-açúcar mais o ar, ou seja, é o calor oriundo da combustão.

As perdas citadas na equação (4) dizem respeito a todo calor perdido durante o processo de combustão de uma caldeira (SALUM, 2011). Quaisquer métodos utilizados para calcular o rendimento de uma caldeira, o valor sempre será inferior a 100%, ou seja, quanto menor forem as perdas do processo, maior será o rendimento térmico (SILVA SEGUNDO, 2014).

Depois dessa abordagem teórica sobre o assunto, será apresentado, no próximo tópico, os caminhos trilhados para a consolidação desta pesquisa.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado em uma usina produtora de energia elétrica e etanol a partir da matéria-prima cana-de-açúcar, localizada no município de Quirinópolis, sudoeste de Goiás. A empresa possui alta tecnologia de processos e softwares, que auxiliam no monitoramento, historiando todas as variáveis e processos pelo COI (Centro de Operações Industriais), o que aumenta a confiabilidade dos dados retratados no estudo.

Foram realizadas pesquisas bibliográficas em livros, sites e artigos científicos relacionadas com a eficiência da combustão em caldeiras, visando aprofundar e comparar o rendimento da queima com a inserção da palha da cana-de-açúcar na fornalha e sem ela, durante a operação de duas caldeiras. As caldeiras são idênticas e não possuem nenhum equipamento de operação diferente uma da outra.

Yin (2005) descreve que um estudo de caso refere-se a uma estratégia de pesquisa que abrange todo um contexto, ou seja, inicia-se pelo planejamento, coletam-se os dados que serão discutidos e em seguida realiza-se a análise desses dados. Essa pesquisa busca identificar como e o porquê de um evento ou fenômeno contemporâneo serem únicos ou múltiplos, por isso este trabalho se enquadra como um estudo de caso.

As variáveis coletadas de eficiência são PCI, produção de vapor, entalpia, temperaturas de vapor e pressões, ambas realizadas via histórico do processo de geração de vapor por meio do software *PI system*, estruturados através do programa *Microsoft Excel 2010*. O levantamento e equiparação do estudo foram coletados no período das safras 2015 e 2016.

O *PI System* coleta armazena e gerencia dados de uma planta ou processo. Suas fontes de dados se conectam a um ou mais nós de interface. Os nós da interface *PI* coletam dados de suas fontes de dados e escreve-se para o *PI tags* no arquivo de Dados *PI*. Os dados são armazenados no Arquivo de Dados *PI* e são acessíveis nos ativos definidos nesse. Os dados podem ser acessados diretamente no programa (*Process Book*) ou no próprio *Excel*, criando planilhas de monitoramento em tempo real. Devido às vantagens de usabilidade do *PI*, os usuários são encorajados a consumir dados acessando o *PI*, os quais lhes permitem monitorar e aperfeiçoar processos em geral.

O intuito deste trabalho é comparar a eficiência de uma caldeira com a introdução no seu processo de combustão da palha da cana-de-açúcar, e analisar, através de balanços de massa e energia, se foi benéfica ou não a inserção. Assim, procura-se trazer resultados para serem discutidos e discorrer sobre as vantagens e desvantagens, utilizando o método direto, que será retratado no próximo tópico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

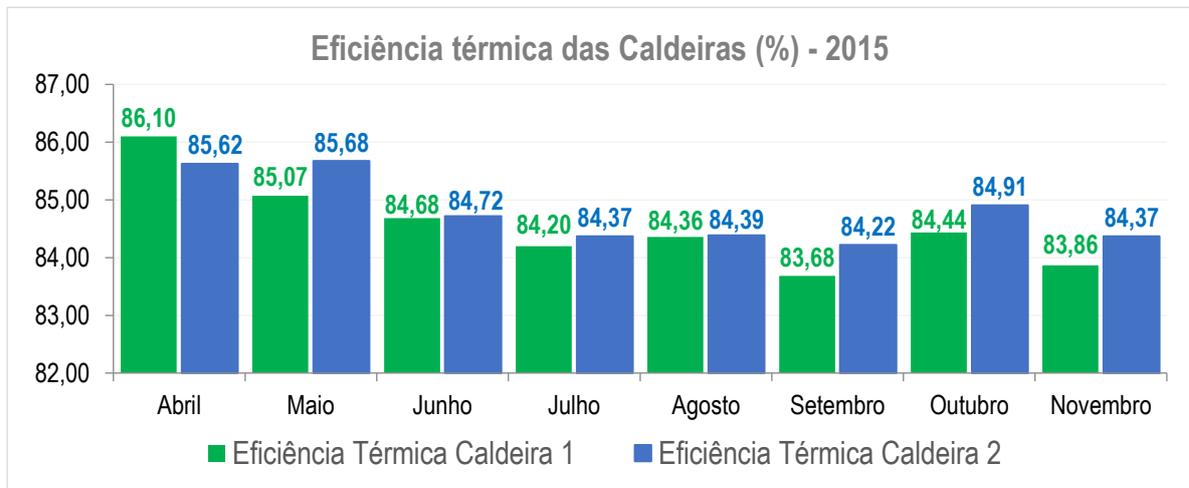
A partir de levantamentos e pesquisas realizadas no histórico de dados da indústria, foram levantados dados de algumas variáveis por meio do *Excel 2010*, e os indicadores que permitiram analisar o resultado deste trabalho sem o sistema de limpeza a seco (palha). Entre esses principais indicadores, estão a eficiência térmica da caldeira (%), umidade do bagaço (%) e o poder calorífico inferior (K_{cal}/cal).

A eficiência térmica de uma caldeira corresponde à energia que realmente é aproveitada, do total da energia que foi disponibilizada no equipamento. Por vez, pode ser representada pelo

poder calorífico inferior (PCI) – energia disponível, ou pelo poder calorífico superior do combustível (PCS) – energia fornecida.

Segundo Kiesow (2015), para a realização de cálculos da eficiência mais próximos do real, desconsidera-se a energia associada aos fluxos de combustível e do ar de combustão, levando em consideração, e como referência, o poder calorífico inferior. A Figura 3 equipara os valores da eficiência térmica das caldeiras na safra de 2015.

Figura 3 – Comparação entre eficiência térmica caldeira 1 x caldeira 2 – Safra 2015



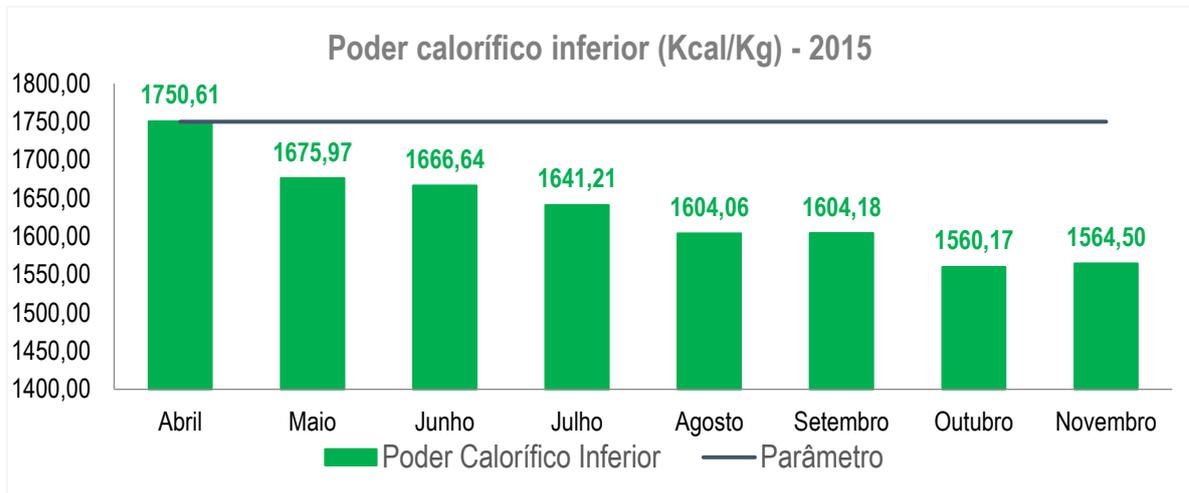
Fonte: Saída do *Excel* 2010 (2017).

No mês de Abril, o valor obtido do PCI foi o maior, quando comparado aos outros meses, pois o valor da umidade do mesmo mês foi o menor como demonstrado na Figura 5. Esse fator é determinante e tem grande impacto negativo quando se trata de energia, pois em consequência a esses valores, as caldeiras tendem a sofrer um enorme consumo de combustível. É possível comprovar essa observação quando analisa-se a eficiência das caldeiras no mês de Abril (Figura 3), que, conforme o PCI, diminui, assim, a eficiência térmica das caldeiras também diminui. Segundo Comin (2010) uma das principais variáveis para se avaliar um determinado combustível é por meio desse indicador, que equivale ao valor desprendido pela combustão de uma determinada quantia unitária de sua massa. De modo simples, pode-se dizer que seria uma parte de calorias ou Joules que é inserida no processo da combustão completa da biomassa por grama ou quilograma.

Payne (1989) retrata que de uma forma rude, a variação de 1% na umidade corresponde a uma variação de 1% no valor do PCI do combustível.

A Figura 4 retrata a média dos oito meses da safra 2015 e, por meio do gráfico, é possível confirmarmos que no mês de abril, o valor do PCI ficou acima do ideal, consequentemente, esse foi o mesmo mês em que a eficiência térmica teve o melhor desempenho.

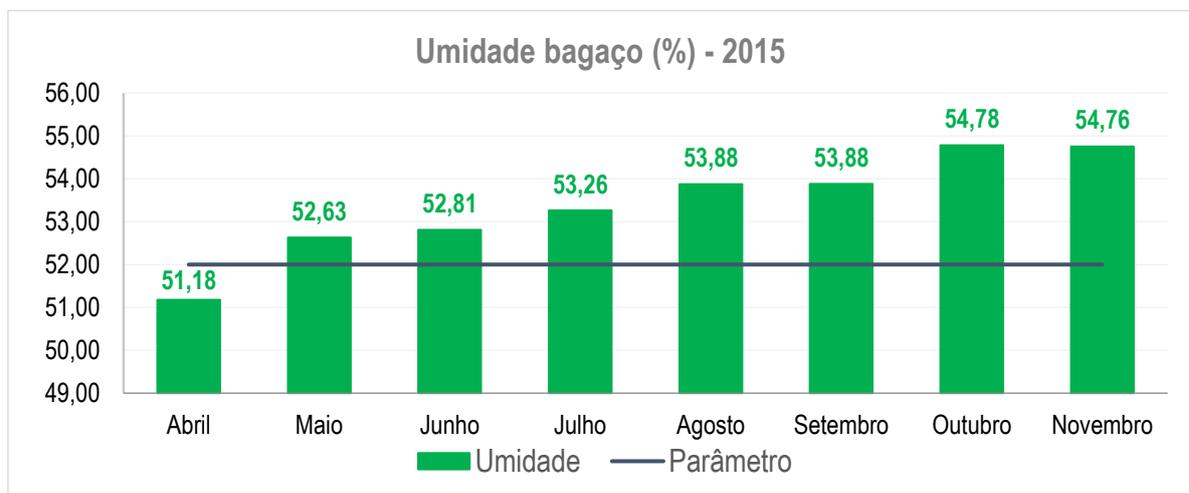
Figura 4 – Poder Calorífico Inferior – Safra 2015



Fonte: Saída do *Excel* 2010 (2017).

Payne (1989) relata que a qualidade do bagaço tem suma importância e é um dos fatores determinantes e indispensáveis de se monitorar. As caldeiras modernas são projetadas para queimar bagaço com 50% de umidade, mas durante a operação podem acontecer oscilações na moenda e essa umidade, em alguns casos, ultrapassar os 52%, o que ocasiona a não secagem da maior parte desse bagaço e, consequentemente, não se consegue queimá-lo em suspensão na fornalha, acarretando-se acúmulos de bagaço sobre a grelha, ver Figura 5.

Figura 5 – Umidade do bagaço – Safra 2015



Fonte: Saída do *Excel* 2010 (2017).

É possível notar que o bagaço da moenda, quando sua umidade aumenta, o valor do PCI tende a diminuir. Essa correlação significa que as variáveis estão ligadas diretamente e que uma interfere na outra. Assim, observa-se que durante a safra de 2015, o único mês que ficou abaixo do parâmetro foi no mês de abril. Vale salientar que a eficiência térmica, PCI e umidade tiveram grande concordância com os resultados obtidos quando comparados com outras literaturas.

A Tabela 2 mostra, de forma macro, a média da umidade durante os oito meses de safra 2015, juntamente com a eficiência, PCI e a relação vapor/combustível.

Tabela 2 – PCI do bagaço, umidade, eficiência térmica e tonelada de vapor/tonelada de bagaço em relação à umidade safra 2015

MÊS/ANO	PCI Kcal/Kg	Umidade (%)	Eficiência Térmica (%)		Relação Vapor/Combustível (Kg vapor/kg bagaço)	
			Caldeira 1	Caldeira 2	Caldeira 1	Caldeira 2
			abr/15	1750,61	51.2	86.10
mai/15	1675,97	52.6	85.07	85.68	1.96	1.98
jun/15	1666,64	52.8	84.68	84.72	1.96	1.96
jul/15	1641,21	53.3	84.20	84.37	1.92	1.92
ago/15	1604,06	53.9	84.36	84.39	1.87	1.87
set/15	1604,18	53.9	83.68	84.22	1.87	1.88
out/15	1560,17	54.8	84.44	84.91	1.80	1.81
nov/15	1564,50	54.8	83.86	84.37	1.82	1.83
MÉDIA	1633.40	53.40	84.55	84.79	1.91	1.92

Fonte: Saída do *Excel* 2010 (2017).

Conforme a Tabela 2, a média dos meses da umidade foi de 53,40%, o que não é o ideal. As usinas sucroalcooleiras realizam a extração do caldo da fibra da cana, e esse procedimento visa buscar o resultado de maneira com que a umidade máxima não ultrapasse os 50%. Mas, infelizmente, nem sempre isso acontece, e o bagaço que vai para o estoque (armazenamento) a céu aberto fica vulnerável a ações climáticas. Logo, vale frisar novamente que a qualidade do bagaço é essencial para um melhor aproveitamento do combustível. Há meses com histórico de umidade próximo dos 55%, isso nos meses de outubro e novembro, o que provavelmente influenciou na combustão, alterando os valores dos parâmetros de conversão de quantidade de combustível em vapor e, conseqüentemente, na produção de energia elétrica. Conforme a umidade do bagaço aumenta, diminui o seu poder calorífico inferior e, com isso, conseqüentemente, diminui também a quantidade de vapor produzido por quilo de bagaço (BORGES *et al*, 2012).

4.1 INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE LIMPEZA A SECO (SLS)

Atualmente, devido ao grande avanço da mecanização na colheita de cana e gradativa diminuição da prática de queima da palha dos canaviais, cresceu, significativamente, a quantidade de palha que adentrará à indústria, juntamente com a quantidade de resíduos minerais que seguem junto à cana. Com isso, para evitar grandes perdas de sacarose no processo industrial, é necessário realizar a segregação dessas impurezas e, atualmente no mercado, o melhor processo existente é o Sistema de Limpeza a Seco (SLS). Segundo especialistas, essa deve ser uma tendência dos avanços da tecnologia da colheita mecanizada no Brasil e ao longo dos anos deve ter aumento significante (JÚNIOR, 2009).

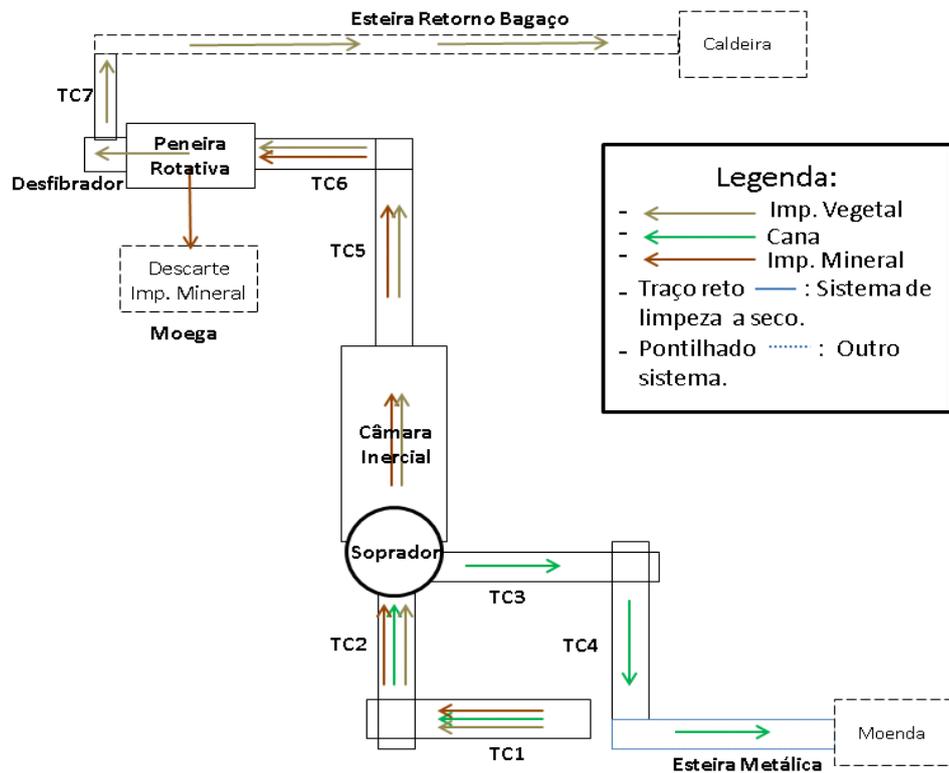
A matéria-prima, quando picada, possui características de atrair impurezas com maior frequência, de modo que, quando a usina transporta a cana picada, essa perda de açúcar pode chegar à ordem dos 5%, tornando inviável e proibitiva essa medida.

Júnior (2009) relata que uma tonelada de cana-de-açúcar pode chegar a ter em média 150 quilos de sacarose, sendo 2% desse volume perdidos no processo de lavagem da cana. E entre 4% e 6% também perdidos durante o processamento da cana em moendas e difusores.

Com esse avanço de tecnologia de limpeza a seco, grande parte dessas perdas pode ser evitada, por meio de dois fatores determinantes para obtenção desses resultados. O primeiro, ao se remover a impureza vegetal (palha) e esse material ficar impedido de “roubar” sacarose do caldo durante a extração; e o segundo, quando permite que a usina reduza o tempo de moagem e, conseqüentemente, realiza-se o ajuste para um período maior de maturação da cana, o que renderá maior concentração de sacarose (JÚNIOR, 2009).

No início de 2016, foi realizada a instalação do sistema de limpeza a seco, o qual consiste em separar a cana da impureza mineral e vegetal, por meio da utilização de dois sopradores. O processo envolve o transporte da cana de uma etapa para a outra até que cada item tenha atingido seu destino final, ou seja, a cana é destinada para a moenda, a impureza mineral passa por uma peneira rotativa e armazena-se em uma moega para, posteriormente, ir para o campo novamente, e a impureza vegetal passa por um desfibrador de palha para diminuir a fibra e ser destinada à caldeira. A figura 6 ilustra o processo do sistema.

Figura 6 – Vista superior do processo do sistema de limpeza a seco



Fonte: Fornecido pela empresa em estudo (2017).

Segundo Innocente (2011) para que a palha (palhiço) seja retirada do campo até a indústria e venha a ser aproveitada na produção de energia elétrica, existem três etapas estudadas para esse fluxo acontecer, que são:

1) Sistema de colheita integral: nessa etapa, a cana-de-açúcar é colhida sem ser queimada e com os sistemas de limpeza das colhedoras desligados. A palha e a cana-de-açúcar são juntamente transportadas pelos veículos tradicionais utilizados pelo setor, pois, nesse caso, não existe necessidade na alteração dos veículos, há apenas aumento de volume na carga. A próxima etapa é separar a palha da cana-de-açúcar na indústria. Uma das alternativas mais comuns é por meio de um processo de limpeza a seco que foi desenvolvido pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) de Piracicaba (TAUBE, 2010). Nesse sistema, a limpeza da cana-de-açúcar é feita por meio de uma forte corrente de ar que separa os colmos da palha sem a necessidade de se utilizar água. Segundo Germek (2005), a palha contém particulados de diferentes granulometrias e formas que causam redução na eficiência da combustão, por motivos de obstrução no sistema de alimentação de combustível das caldeiras. Uma das soluções mais plausíveis seria a trituração da palha antes de enviá-la para as caldeiras. No Grupo

Equipav, com sede em Promissão, SP, o sistema para limpeza de cana-de-açúcar a seco é usado desde 2008 e após a separação, a palha passa por uma peneira rotativa que separa toda a terra, que é devolvida para a lavoura novamente; posteriormente, a palha segue para um picador para ser reduzida e, então, é direcionada para as esteiras e transportado o bagaço para as caldeiras (TAUBE, 2010).

2) Recolhimento a granel: nessa etapa de recolhimento da palha, acontece a separação total da cana-de-açúcar no momento da colheita, que é realizada mecanicamente com o extrator das máquinas ligado. Essa palha que se encontra no campo é enleirada e transportada até a usina, de maneira a granel, em veículos tipo “gaiola” que são propositalmente construídos para essa finalidade (GERMEK, 2005).

3) Enfardamento: nesse sistema, como citado no anterior, a cana-de-açúcar é colhida sem a queima prévia e a palha é deixada no campo. A palha é enleirada por ancinho enleirador e, conseqüentemente, enfardada, formando fardos prismáticos. Esses fardos são posicionados em caminhões, por meio de garras carregadoras e transportados para a usina, onde serão descarregados com a pá carregadeira que fica alocada no pátio.

Para alimentar as caldeiras com a palha, os fardos devem ser desmanchados e a palha deve ser desfibrada, tais operações precisam de equipamentos especiais citados no item 1 deste tópico (GERMEK, 2005).

No caso do presente estudo, a palha vinda da colheita mecanizada é transportada por meio do processo de recolhimento integral, ou seja, ela vem junto com a cana-de-açúcar e é separada pelo Sistema de Limpeza a Seco, ou seja, o que aumenta o volume da carga, porém não necessita de custos com transporte necessários para realizar essa logística e, após a separação, cada resíduo segregado vai para seu processo final.

Em junho de 2016 foram realizados alguns testes com o sistema para diagnosticar a eficiência desse (ver Tabela 3 e 4).

O teste foi realizado no dia 22/06/2016 e foram separados os caminhões que iriam participar das análises, com o intuito de garantir a máxima eficiência e favorecer por meio da coleta, uma maior confiabilidade de informações. A Tabela 3 demonstra a cana-de-açúcar vinda do campo, juntamente com as impurezas minerais e vegetais antes de passar pelo processo. Na Tabela 4 é notório que houve uma gradativa diminuição das impurezas, após a cana passar pelo sistema e, durante o teste, chegou-se a uma eficiência calculada de 72,88% com as amostras coletadas.

Tabela 3 – Resultados do teste de impureza vegetal antes do SLS ⁷

DADOS	Cana dos caminhões separados				
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Total
<i>Peso amostra integral (Kg)</i>	66.65	67.98	73.77	64.43	272.83
<i>Peso cana limpa (Kg)</i>	58.29	59.33	65.79	57.94	241.35
<i>Peso palha + terra (Kg)</i>	8.36	8.65	7.98	6.49	31.48
<i>% Terra + Palha</i>	12.54%	12.72%	10.82%	10.07%	11.54%

Fonte: Fornecido pela empresa em estudo (2017).

Tabela 4 – Resultados do teste de impureza vegetal após o SLS

DADOS	Cana limpa após SLS			
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Total
<i>Peso amostra integral (Kg)</i>	71.46	74.99	83.92	230.37
<i>Peso cana limpa (Kg)</i>	68.57	72.86	81.72	223.15
<i>Peso palha + terra (Kg)</i>	2.89	2.13	2.2	7.22
<i>% Terra + Palha</i>	4.04%	2.84%	2.62%	3.13%

Fonte: Fornecido pela empresa em estudo (2017).

Com os dados de 2015 citados anteriormente, e a instalação desse novo sistema foi possível fazer algumas observações entre as duas safras, ou seja, analisar quais foram os resultados obtidos com o novo combustível inserido nas caldeiras.

Outro ponto importante a ser citado é que ambas as caldeiras são idênticas e não possuem nenhum equipamento ou processo distinto da outra, assim, capacidades como vazão, pressões e temperaturas são relativamente iguais, não contribuindo para a diferenciação dos resultados obtidos.

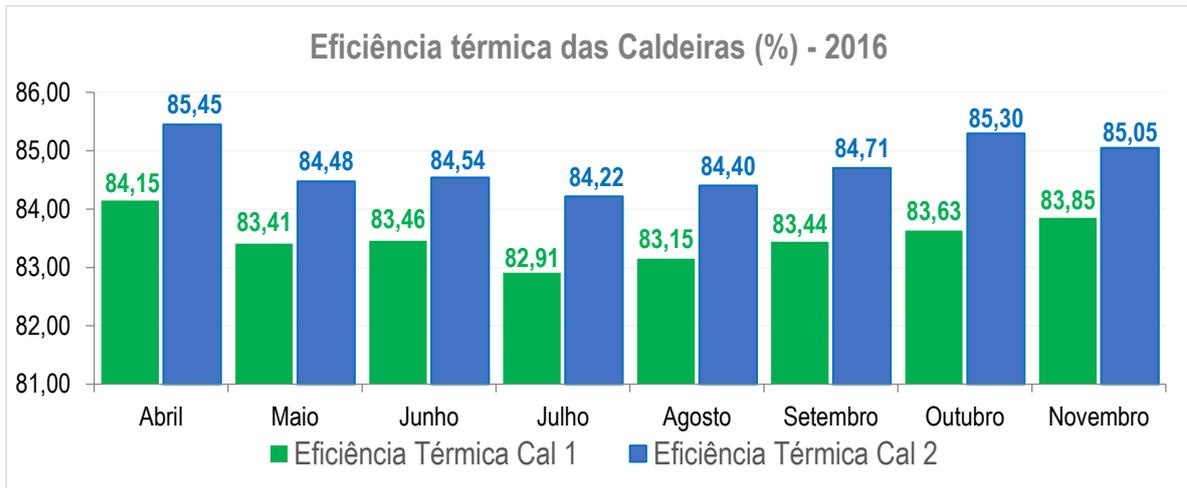
Abaixo nas Figuras 7,8 e 9, é possível acompanhar os resultados obtidos referentes à safra de 2016, e, posteriormente, traz-se as discussões e comparações com relação à eficiência térmica, PCI e umidade.

A safra de 2016, conforme pode-se destacar na Figura 8, durante os oito meses, não houve nenhum valor de PCI acima ou igual ao ideal de 1.700. Em paralelo a esse fator, nota-se, também, na FIGURA 7 que em nenhum mês a eficiência térmica passou dos 86%. Isso contribuiu de forma negativa, pois conforme conhecimento citado no trabalho as caldeiras

⁷ Sistema de Limpeza a Seco

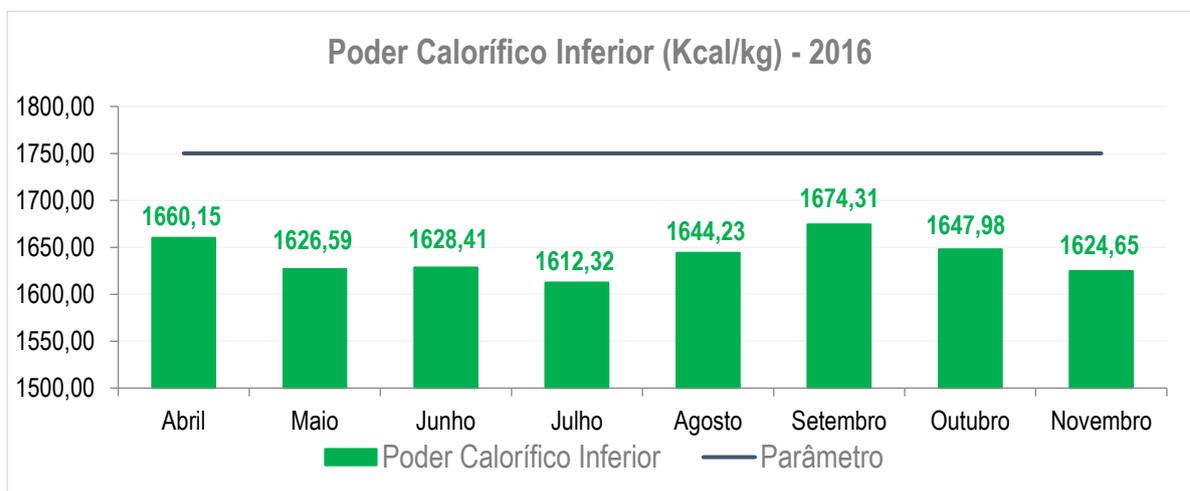
consumiu-se uma porcentagem maior de combustível, para produzir a mesma quantidade de vapor que foi produzida anteriormente com um custo menor. A Figura 9 ilustrará como foi o comportamento da umidade do bagaço.

Figura 7 – Comparação entre eficiência térmica Caldeira 1 x Caldeira 2 – Safra 2016



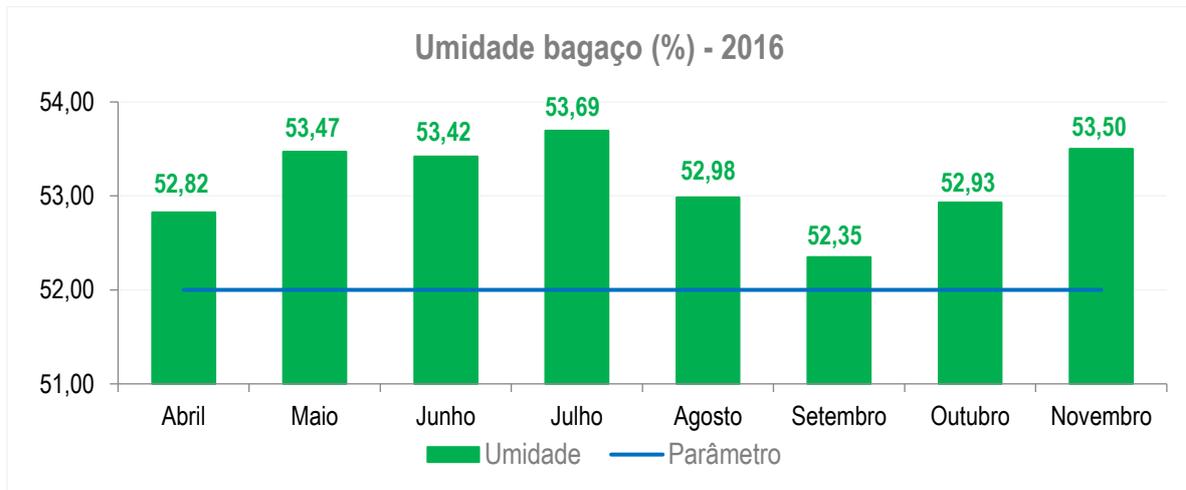
Fonte: Saída do *Excel* 2010 (2017).

Figura 8 – Poder Calorífico Inferior – Safra 2016



Fonte: Saída do *Excel* 2010 (2017).

A umidade da safra 2016 apresentou-se praticamente com a mesma média da safra 2015, não foi possível notar nenhuma diferença gradativa, o que demonstra que a palha não teve influência nessa variável. Assim, chamou bastante a atenção o fato de em todos os meses não se obter nenhum resultado abaixo do parâmetro ideal para as caldeiras.

Figura 9 – Umidade do bagaço – Safra 2016

Fonte: Saída do *Excel* 2010 (2017).

A Tabela 5 mostra de forma macro a média da umidade durante os oito meses de safra 2016, juntamente com a eficiência, PCI e a relação vapor/combustível.

Tabela 5 – PCI do bagaço, umidade, eficiência térmica e tonelada de vapor/tonelada de bagaço em relação à umidade safra 2016

MÊS/ANO	PCI Kcal/Kg	Umidade (%)	Eficiência Térmica (%)		Relação Vapor/Combustível (Kg vapor/kg bagaço)	
			Caldeira 1	Caldeira 2	Caldeira 1	Caldeira 2
			abr/16	1660.15	52.8	84.15
mai/16	1626.59	53.5	83.41	84.48	1.88	1.91
jun/16	1628.41	53.4	83.46	84.54	1.89	1.91
jul/16	1612.32	53.7	82.91	84.22	1.86	1.89
ago/16	1644.23	53	83.15	84.4	1.9	1.93
set/16	1674.31	52.4	83.44	84.71	1.94	1.97
out/16	1647.98	52.9	83.63	85.3	1.92	1.95
nov/16	1624.65	53.5	83.85	85.05	1.89	1.92
MÉDIA	1639.83	53.15	83.50	84.77	1.90	1.94

Fonte: Saída do *Excel* 2010 (2017).

Pode-se observar que os valores da safra/16 não sofreram tanta mudança se comparados com a safra/15, mesmo com o sistema de limpeza a seco, a eficiência térmica se mostrou estável em ambas as caldeiras, sendo a caldeira dois, consideravelmente, sempre maior nas duas condições. O PCI também foi outro indicador que se mostrou estável, não sofrendo nenhuma alteração gradativa. A umidade ficou 0,47% menor na safra/16, sem impactar drasticamente no desempenho das caldeiras.

O consumo específico ($Kg_{vapor} / Kg_{bagaço}$) também não sofreu alteração, porém como mostrado na Tabela 5, nas duas safras, mostrou-se sempre maior na caldeira dois. Vale ressaltar que a palha que vem do SLS tem preferência de alimentação na caldeira dois, por motivos de processo, porém não teve nenhum ganho gradativo com relação à eficiência térmica.

Innocente (2011) relata que usinas que utilizam a palha como complemento do bagaço na alimentação de caldeiras não perceberam alterações significativas na eficiência térmica dessas, entretanto, a quantidade de palha que é composta da mistura ao bagaço não ultrapassa os 20%.

Levando em consideração que a palha inserida nas caldeiras não teve uma grande interferência neste estudo, em relação à eficiência térmica, e se caso estivesse considerado um consumo específico médio realizado de 1,92 ($Kg_{vapor} / Kg_{bagaço}$) em ambas as safras, obter-se-ia a produção de energia, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Bagaço consumido, vapor produzido e consumo específico das safras 15 e 16

<i>Ano</i>	<i>Bagaço Consumido</i> <i>t</i>	<i>Vapor Estimado</i> <i>t</i>	<i>Energia Produzida</i> <i>MWh</i>	<i>Consumo Específico Realizado</i> <i>Kgvapor/Kgbagaço</i>
2015	1.405.316,80	2.698.208,27	474.084,79	1,92
2016	1.383.146,28	2.655.640,89	476.000,34	1,92

Fonte: Saída do *Excel* 2010 (2017).

As caldeiras presentes no estudo tem como valor ideal o consumo específico de projeto 2,12 ($Kg_{vapor} / Kg_{bagaço}$), caso se substitua essa variável das safras 15/16, conforme a comparação realizada na Tabela 6 pelo projeto, chegar-se-á aos seguintes resultados (ver Tabela 7).

Tabela 7 – Bagaço consumido (toneladas), vapor estimado (toneladas), energia estimada e consumo específico de projeto das safras 15 e 16

<i>Ano</i>	<i>Bagaço Consumido</i> <i>t</i>	<i>Vapor Estimado</i> <i>t</i>	<i>Energia Produzida Estimada</i> <i>MWh</i>	<i>Consumo Específico Projeto</i> <i>Kgvapor/Kgbagaço</i>
2015	1.405.316,80	2.979.271,62	523.597,82	2,12
2016	1.383.146,28	2.932.270,11	525.496,44	2,12

Fonte: Saída do *Excel* 2010 (2017).

No estudo foram levados em consideração dois turbo geradores, os quais foram projetados para um consumo de 5,5 t vapor/MW aproximadamente. Por meio do PI *system* foram coletados os dados e obtidos os seguintes resultados: eficiência dos turbos geradores 5,69 t vapor/MW em 2015 e 5,58 t vapor/MW em 2016, dessa forma é possível mensurar um excedente de 49.513,03 MWh e 49.496,10 MWh, em 2015 e 2016, respectivamente. No ano de 2015 o preço do valor do MW fornecido pela área de controladoria ficou na média de R\$ 228,10/MWh, desse modo, o faturamento da usina se atingida a eficiência térmica de projeto, como mensurado na Tabela 7, seria de uma receita próxima dos R\$ 11.293.922,14 milhões e para a safra de 2016 com a média da energia em R\$ 93,90/MWh um lucro de R\$ 4.647.683,79 milhões.

5. CONCLUSÕES

O potencial energético da palha apresentado não demonstrou resultados consideráveis, comparado à combustão das caldeiras na safra de 2015, quando não se usava a palha como combustível e em 2016 quando passou a inseri-la no processo.

Vale ressaltar que diversas variáveis podem interferir de forma direta para a obtenção de resultados mais viáveis como, por exemplo, a umidade da palha, o tamanho da fibra e a forma pela qual tal fibra é alimentada na caldeira. Esses fatores contribuem muito para uma eficácia maior, pois nem sempre é possível conseguir atingir os valores esperados.

Como demonstrado no levantamento de dados, a eficiência térmica mostra-se muito importante para a geração de energia elétrica, pois quanto maior for o rendimento de uma caldeira, menor será o consumo específico de tal caldeira e, conseqüentemente, maior será a eficiência dos processos. Nas duas últimas safras, independente da inserção da palha, se tivesse obtido um consumo específico ($Kg_{vapor} / Kg_{bagaço}$) projetado para as caldeiras, haveria um faturamento de aproximadamente R\$ 15.941.605,93 milhões.

Dado o exposto, sugere-se que o ideal é sempre manter uma umidade do bagaço e palha dentro dos limites estipulados de projeto, aumentando o lucro da empresa e obtendo vantagens frente aos seus concorrentes, pois quanto maior a umidade, maior será o consumo de combustível e menor será o rendimento térmico das geradoras de vapor.

Como possível trabalho futuro, pode-se apontar:

- ✓ Ganho da extração devido ao volume menor de impurezas minerais e vegetais na moenda.

REFERÊNCIAS

- ALVES, M. **Estudo de Sistemas de Cogeração em Usinas de Açúcar e Álcool, com utilização do bagaço e palha da cana**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- ANEEL. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 2007.
- ANEEL (2017) – Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/proinfra/>> Acesso em: 20/05/2017.
- ARONI, A. S. **Avaliação da biomassa e qualidade da madeira do híbrido *Pinus tecunumannii* x *Pinus caribaea* var. *hondurensis* pela técnica de atenuação da radiação gama do 241Am**. 2005. 136 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.
- BORGES, E. A. S.; ROCHA, R. S.; OLIVEIRA, V. A. **A influência da umidade na cogeração de Energia elétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar**. (Bacharelado em Química), Centro Universitário Católico Salesiano *Auxilium*, Lins, 2012.
- BRASIL (2016-a) – Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2016/07/aumento-de-fontes-renovaveis-reduz-geracao-eletrica-por-queima-de-oleo/>>. Acesso em: 19/05/2017.
- BRASIL (2016-b) – Disponível em:<<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2016/09/energia-renovavel-mantem-crescimento-robusto/>>acesso em: 19/05/2017.
- COMIN, M. R. **Geração e comercialização de energia elétrica a partir do bagaço da cana de açúcar**. (Pós-Graduação em Gestão de Tecnologia Industrial Sucroenergética do Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Sócioeconomia Rural do Centro de Ciências Agrárias), Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2010.
- CORRÊA NETO, V; RAMON, D. **Análise de opções tecnológicas para projetos de cogeração no setor sucroalcooleiro**. Brasília, DF: *Sustainable Energy Technology*, 2002. 116 p.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMES, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Ed. da Unicamp, 2008. 728 p.
- FERREIRA, O. C. **Teor de carbono em combustíveis da biomassa**. *Economia e Energia*, Rio de Janeiro, n. 57, p. 41-47, 2006.
- GERMEK, H. A. **Análise de decisão sobre o aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar, posto na unidade industrial, para fins de cogeração**. 2005. 107 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.
- HILSDORF, J. W. et al. **Química tecnológica**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. 340 p.
- INNOCENTE, A. F. **Cogeração a Partir da Biomassa Residual de Cana-de-açúcar - Estudo de Caso**. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Energia na Agricultura). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2011.

JOSÉ, H. J. **Combustão e combustíveis**. Santa Catarina: Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2004. (Apostila Química Tecnológica Geral).

JÚNIOR, R. A. R. **Análise da Viabilidade do Aproveitamento da Palha da Cana de Açúcar para Cogeração de Energia numa Usina Sucroalcooleira**. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Mecânica – Ciências Térmicas). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira – SP, 2009.

KIESOW, R. M. **Desenvolvimento de um sistema para pré-aquecimento de água de alimentação de uma caldeira fumotubular**. Graduação (Trabalho de conclusão da disciplina de Estágio dois, Engenharia Mecânica – Área de concentração - Engenharia Térmica). Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015.

MAUÉS, J. A. **Maximização da geração elétrica a partir do bagaço e palha em usina de açúcar e álcool**. Revista Engenharia, São Paulo, n. 583, p. 88-95, 2007.

NDONLINE (2017) – Disponível em: <<http://www.ndonline.com.br/florianopolis/noticias/falta-de-chuvas-pode-levar-ao-aumento-do-uso-de-termeletricas-diz-comite/>> Acesso em: 20/03/2017.

PAYNE, J. H. **Operações Unitárias na Produção de Açúcar de Cana**. Piracicaba: Nobel; Stab, 1989.

PELLEGRINI, M. C. **Inserção de centrais cogedoras a bagaço de cana no parque energético do estado de São Paulo: exemplos de aplicações de metodologia para análise dos aspectos locacionais e de integração energética**. 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

PEREIRA JR., V. P. **Alternativas para a cogeração de energia em uma indústria de chapas de fibra de madeira**. 2001. 100 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

PERES, S. et al. **Caracterização e determinação do poder calorífico e do número de cetano de vários tipos de biodiesel através de cromatografia**. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE TECNOLOGIA DE BIODIESEL, 2., **Anais ...** 2007, Brasília.

RODRIGUES, L. D. et al. **Uso de briquetes compostos para produção de energia no Estado do Pará**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas.

SANTIAGO, F. L. S. **Estudo da viabilidade técnica e econômica para aproveitamento de cascas de *Eucalyptus* gerados no processo de fabricação de painéis de madeira**. 2007. 89 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

SANTOS, A. H. M. et al. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**. 3ª. Ed. Itajubá: FUPAI, 2006.

SALUM, A. D. **Eficiência Energética em sistema de combustão. Especialização em Engenharia Econômica, Estratégia e Prevenção de Perdas na Indústria-CEPI**, 2011. Pós-Graduação em Engenharia Industrial. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2011.

SILVA SEGUNDO, V. B. DA. **Princípio de Balanços Termo energéticos em Caldeiras Geradoras de Vapor nas Indústrias Sucroalcooleiras**, 2014. Graduação em Tecnologia Sucroalcooleira, Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2014.

TAUBE, J. S. **Palha energética. CanaMix**, n. 23, p. 98-100, 2010. Disponível em: <<http://www.canamix.net/Conteudo/Edicoes/23-marco2010/CM23-TECINDUSTRIAL.pdf>>.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 3 ed. Porto Alegre: Brookman, 2005. 212 p.