



ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO BAGAÇO DA CANA NA GERAÇÃO DE VAPOR EM UMA USINA SUCROÁLCOOLEIRA

Bruno Henrique Barbosa

Graduando em Engenharia de Produção e Matemática

E-mail: [BrunoHenBar@hotmail.com](mailto: BrunoHenBar@hotmail.com)

Cristiano Sérgio dos Santos

Bacharel em Engenharia de Produção Centro Universitário de Formiga - UNIFOR MG

Samuel de Oliveira

Mestre em Engenharia - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - IFMG

Resumo

Diante de um mercado competitivo, as indústrias sucroalcooleiras buscam cada vez mais aumentar o seu rendimento e sua eficiência industrial, investindo em tecnologias no setor de cogeração de energia, minimizando assim as perdas em seu processo produtivo. O setor de extração do bagaço da cana-de-açúcar ocupa uma posição de destaque e por isso é um dos setores mais exigido pelas empresas do segmento. Diante desta situação, o atual estudo abordou a análise do fator que interfere na eficiência da caldeira através da queima do bagaço e assim adotar medidas de controle com a finalidade de aperfeiçoar a eficiência da caldeira. O estudo foi realizado em uma indústria sucroalcooleira localizada na região do centro oeste do estado de Minas Gerais, com capacidade de produção aproximadamente 3.000.000 toneladas cana/safra. Com a realização do estudo, foram identificados fatores que interferem na extração do bagaço da cana-de-açúcar, acarretando perdas na geração de energia devido à umidade bagaço. O estudo sugeriu a mensuração da perda na eficiência da caldeira e o acréscimo de combustível, devido à umidade do bagaço estar fora dos seus parâmetros ideais, que convertido em MWh ilustrou-se a perda em valores financeiros. **Palavras chave:** eficiência; bagaço da cana; geração de vapor.

ANALYSIS OF ENERGY EFFICIENCY OF SUGARCANE BAGASSE IN STEAM GENERATION PLANT A SUGARCANE

Abstract

Faced with a competitive market, the sugar and alcohol industries increasingly seek to increase their income and their industrial efficiency, investing in technology in the cogeneration sector, thus minimizing losses in its production process. The extraction industry bagasse from sugarcane occupies a prominent position and it is one of the sectors required by companies in the segment. In this situation, the current study addressed the analysis of the factor that interferes with the boiler efficiency by burning bagasse and so take control measures in order to improve the efficiency of the boiler. The study was conducted in a sugar industry located in the region of west central state of Minas Gerais, with a production capacity of approximately 3,000,000 tons cane / harvest. With the study, factors have been identified that interfere with the extraction of bagasse from sugarcane, causing losses in power generation due to moisture bagasse. The study suggested the loss

*Autor para correspondência / Author for correspondence / Autor para la correspondencia:
Bruno Henrique Barbosa - E-mail: [BrunoHenBar@hotmail.com](mailto: BrunoHenBar@hotmail.com)

Data do recebimento do artigo (received): 23/04/2017
Data do aceite de publicação (accepted): 10/05/2018

Desk Review
Double BlindReview

of measurement in the boiler efficiency and fuel increased due to moisture in the pomace to be out of their optimal parameters, which converted into MWh illustrated the loss on financial assets. **Keywords:** efficiency; sugarcane bagasse; steam generation.

ANÁLISIS DE LA EFICACIA ENERGÉTICA DE LO BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR EM LA PLANTA DE GENERACIÓN

Resumen

Delante de un mercado competitivo, las industrias sucroalcoholeras buscan cada vez más aumentar su rendimiento y su eficiencia industrial invirtiendo en tecnologías en el sector de cogeneración de energía, minimizando así las pérdidas en su proceso productivo. El sector de bagazo de caña de azúcar ocupa una posición de destaque y por eso es uno de los sectores más exigidos por las empresas del seguimiento. Delante de esa situación el actual estudio abordó el análisis del factor que interfiere en eficiencia de la caldera a través de la quema del bagazo y así adoptar medidas de control con la finalidad de perfeccionar la eficiencia de la caldera. El estudio fue realizado en una industria sucroalcoholera ubicada en la región del Centro Oeste de Minas Gerais, con capacidad de producción aproximadamente 3.000.000 toneladas de caña zafra. Con la realización del estudio, fueron identificados factores que interfieren en la extracción de caña de azúcar, obteniendo pérdidas en la generación de energía debido a la unidad bagazo. El estudio sugirió la mensuración de pérdidas en la eficiencia de la caldera y el acréscimo del combustible, debido a la unidad del bagazo no se encuentre en sus parámetros ideales, convertido en MWh se ilustró la pérdida en valores financieros.

Palabras clave: eficiencia; bagazo de caña; generación de vapor.

1. INTRODUÇÃO

As indústrias do setor sucroalcooleiro, visando à lucratividade e sustentabilidade, buscam inovações para utilizar toda a sua matéria prima. O bagaço da cana-de-açúcar, que antes era um impacto ambiental e sem destino, hoje é uma fonte de energia renovável e sustentável. Utilizando-se dessa fonte de energia renovável, o setor sucroalcooleiro tem buscado investimentos e inovações para manter-se sustentável no mercado.

Para que o setor consiga sustentabilidade, as usinas estão contando com a eficiência, tempo de aproveitamento industrial (TAI) e com a cogeração de energia elétrica, utilizando-se do bagaço da cana-de-açúcar, que tem sido um diferencial para as usinas que possui este sistema, onde, o valor do MWh, pago pelas concessionárias aqueceu o mercado, devido há crise hídrica que algumas regiões do país têm enfrentado nestes últimos anos.

O uso do bagaço da cana-de-açúcar como combustível, agregou valores a este sistema de cogeração de energia elétrica renovável, por ser 28% da matéria prima gerada, que antes era um impacto ambiental e sem destino, tornou-se o ponto de atenção nas usinas como alternativa energética, pois apresenta vantagens como a redução de resíduos ao meio ambiente se comparado a outros combustíveis. Assim, o trabalho visa o estudo e análise no desempenho termodinâmico de uma caldeira, utilizando o baço de cana e também a análise econômica do seu sistema de recuperação dos gases de exaustão.

O objetivo do trabalho relaciona-se a certos parâmetros ideais no uso bagaço da cana-de-açúcar, com intuito de garantir o poder calorífico ideal na queima, vindo à caldeira atingir sua eficiência energética na produção de vapor.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CANA DE AÇÚCAR E O SETOR SUCROALCOOLEIRO

A plantação da cana-de-açúcar é própria de clima subtropical, tropical e duradoura. Alguns autores tem descrito sua descoberta, porém, a suposição mais aceita é que tenham sido cultivados primeiramente na região do Golfo de Bengala e posteriormente outros povos foram conhecendo e expandindo seu cultivo. A origem da denominação da cana-de-açúcar veio da palavra açúcar derivada da antiga língua da Índia, o sânscrito. (Miranda, Vasconcelos, & Landell, 2008).

Segundo Machado (2003), a cana-de-açúcar é, talvez, o único produto de origem agrícola destinado à alimentação que, ao longo dos séculos, foi alvo de disputas e conquistas mobilizando homens e nações. A planta que dá origem ao produto encontrou lugar ideal no Brasil. Durante o Império, o país dependeu basicamente do cultivo da cana e da exportação do açúcar. Calcula-se que naquele período da história, a exportação do açúcar rendeu ao Brasil cinco vezes mais que as divisas proporcionadas por todos os outros produtos agrícolas destinados ao mercado externo.

Oficialmente, foi Martim Affonso de Souza que em 1532 trouxe a primeira muda de cana ao Brasil e iniciou seu cultivo na Capitania de São Vicente. Lá, ele próprio construiu o primeiro engenho de açúcar. Mas foi no Nordeste, principalmente nas capitanias de Pernambuco e da Bahia, que os engenhos de açúcar se multiplicaram. (Machado, 2003).

Segundo Silva e Faria (2006), a cana de açúcar é uma das gramíneas mais cultivadas nas regiões tropicais e subtropicais, pelo seu grande teor de sacarose e por produzir açúcar, álcool e cachaça, ficou conhecida pela grande exploração socioeconômica.

A revista Nova Cana (2013), mostra que a cana-de-açúcar é uma das principais culturas do mundo, cultivada em mais de 100 países, e representa uma importante fonte de mão de obra no meio rural nesses países. Apesar desta difusão mundial, cerca de 80% da produção do planeta estão concentradas em dez países, como ilustra a FIG. 1 a seguir.

País	Área colhida (10ha)	Produção (10t)	% da área colhida	Produtividade (t/ha)
Brasil	6,153	455,3	30,2	74,0
Índia	4,200	281,2	20,6	67,0
China	1,220	100,7	6,0	82,5
México	0,668	50,6	3,3	75,7
Tailândia	0,936	47,7	4,6	51,0
Paquistão	0,907	44,7	4,6	51,0
Colômbia	0,426	39,8	2,1	93,4
Austrália	0,415	38,2	2,0	92,0
Indonésia	0,370	30,2	1,8	81,6
Estados Unidos	0,364	26,8	1,8	73,6
Outros	4,713	276,2	23,1	58,6
Total	20,372	1.391,4	100,0	68,3

Figura 1 - Os dez maiores produtores de cana de açúcar.

Fonte: NOVA CANA. A produção de cana de açúcar no Brasil (e no mundo). 10 Jan, 2013.

Ainda de acordo com a revista Nova Cana (2013), a produção de cana no Brasil cresceu de forma acelerada após o estabelecimento do Proálcool, em novembro de 1975, passando de um patamar de pouco menos de 100 milhões de toneladas por ano para um novo patamar em torno de 220 milhões de toneladas por ano, em 1986/87. O cultivo da cana só voltou a crescer na safra 93/94, desta vez, motivado pelo aumento das exportações de açúcar. A partir daí, o crescimento da produção tem ocorrido de forma contínua (com exceção do período entre 1998 a 2001, quando houve uma queda gerada pela crise no setor). Com o sucesso dos veículos *flex fuel*, lançados no mercado nacional em 2003, a produção de cana-de-açúcar voltou a ter um crescimento acelerado, para atender ao aumento da demanda de álcool hidratado, se aproximando de 520 milhões de toneladas em 2007.

Apesar das dificuldades, da globalização, da rápida mudança de paradigmas a que está submetida, a indústria açucareira brasileira continua em expansão. Sua produção no final do milênio chegou a 300.000.000 de toneladas de cana moída/ano em pouco mais de 300 unidades produtoras; 17 milhões de toneladas de açúcar e 13 bilhões de litros de álcool. A procura por diferenciação e produtos com maior valor agregado é constante. Novos sistemas de administração e participação no mercado são rapidamente incorporados. O setor não mais se acomoda à resignação do passado e busca novas alternativas, como a cogeração de energia elétrica.

2.2 CALDEIRA

Pela necessidade de se encontrar alternativas na geração de calor, surgiram as máquinas destinadas a gerar vapor e nos dias atuais, pela grande praticidade e versatilidade de sua utilização, o vapor d'água tornou-se indispensável em diversos setores industriais. Uma vantagem na utilização de vapor está na necessidade de se encontrar alternativas na geração de calor, que substituíssem a queima direta de carvão fóssil.

De acordo com a NR-13 item 13.1.1., caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, esse processo ocorre utilizando qualquer fonte de energia, exceto alguns equipamentos, como os refervedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo (Ministério, 2009).

Em uma caldeira, há três partes essenciais, que são: a fornalha ou câmara de combustão, a câmara de água e a câmara de vapor. Os condutos para descarga dos gases e a chaminé não formam parte integral da caldeira, pois constituem construções independentes que são adicionadas ao corpo resistente da mesma, dessa forma não estando expostas à pressão do vapor.

Segundo o Ministério (2009), em relação à classificação das caldeiras, de acordo com a NR-13, conseguimos observar que essas foram classificadas segundo as classes de pressão, em: Categoria A: caldeira cuja pressão de operação é superior a 1960 KPa (19,98 kgf/cm²); Categoria C: caldeiras com pressão de operação igual ou inferior a 588 KPa (5,9 kgf/cm²) e volume interno igual ou inferior a 100 litros; Categoria B: caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores. Ainda quanto à classificação das caldeiras, sabe-se que existem outras maneiras particulares de classificação das mesmas, como por exemplo: quanto ao tipo de montagem, circulação de água, sistema de tiragem e tipo de sustentação.

2.3 BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR

O bagaço da cana, também conhecido como bagaço final, ou simplesmente bagaço, é matéria fibrosa sólida, liberada na saída da última moenda, que após a extração do caldo, dispõe-se aproximadamente em 275,0 kg de bagaço por tonelada de cana. A sua composição física varia muito pouco em relação a sua propriedade mais importante sob o ponto de vista da produção do vapor, que é a sua umidade. De acordo com Hugot (1977), a composição química do bagaço seco pode variar, mas

como estas variações não apresentam grandes diferenças, pode-se admitir as seguintes composições: Carbono 47%, Hidrogênio 6,5%, Oxigênio 44% e Cinzas 2,5%.

O principal item para avaliação de um combustível é o seu poder calorífico, que corresponde ao valor liberado pela combustão de uma quantia unitária de sua massa. Assim podemos dizer que seria a quantia de calor ou Joules resultante da combustão completa do material por grama ou quilograma. Para os combustíveis que possuem hidrogênio em sua molécula e conseqüentemente produzem água na combustão (caso do bagaço de cana-de-açúcar), existem dois poderes caloríficos, a saber: o poder calorífico superior (PCS), que corresponde ao calor liberado considerando que a água formada está sob a forma líquida a 0°C e o poder calorífico inferior (PCI), que corresponde ao calor liberado considerando que a água formada está sob a forma de vapor a 0°C.

O poder calorífico do bagaço torna-se maior à medida que o teor de umidade se reduz, principalmente devido à menor necessidade de calor para vaporizar a água. De acordo com Payne (1989), os resultados obtidos pelo laboratório como a % pol, a umidade e a fibra, são números básicos no controle de uma moenda. É através da análise do bagaço final que vai determinar a porcentagem de pol extraída e a umidade do bagaço que deve ser abaixo de 50% para alimentar as caldeiras. Na FIG. 2 seguinte, tem-se o poder calorífico de alguns produtos.

Produto	PCS – kcal/kg
Serragem	2.500
Nó de pinho	4.00
Carvão de pedra	7.500
Casca de semente de algodão	2.800
Casca de semente de amendoim	3.200
Bagaço da cana (40% umidade)	2.300
Butano	11.800
Gasolina	11.000

Figura 2 - Poder calorífico superior de alguns produtos.

Fonte: Borges, M. T. M. R; Lopes, C. H. (2009). Introdução a Tecnologia Agroindustrial. São Carlos: Eduscar, 2009.

Para Payne (1989), a qualidade do bagaço tem primordial importância e sua umidade constitui o fator mais importante. A maioria das caldeiras é projetada para queimar bagaço a 50% de umidade. Porém, podem ser esperados problemas na queima quando a umidade sobe acima de 52%, como por exemplo, a maior parte do bagaço não seca e não queima em suspensão e se acumula na grelha. O poder calorífico do bagaço torna-se maior à medida que o teor de umidade se reduz, principalmente devido à menor necessidade de calor para vaporizar a água. Dessa forma, os parâmetros como a % Pol, a umidade e a fibra, são números básicos no controle de uma moenda. É através da análise do bagaço final que vai determinar a porcentagem de pol extraída e a umidade do bagaço que deve ser abaixo de 50% para alimentar as caldeiras.

3. MATERIAL E MÉTODO

O presente trabalho é uma pesquisa de campo que ocorreu em uma indústria do ramo sucroalcooleiro situada na região centro-oeste do estado de Minas Gerais, tendo como principais atividades a industrialização de açúcar, álcool, cogeração de energia e ração animal.

A sua análise diz respeito ao estudo da eficiência da caldeira de geração de vapor, utilizando como combustível o bagaço da cana-de-açúcar no setor de geração de energia. A empresa tem como meta manter a umidade do bagaço em 52% para manter a eficiência energética da caldeira, diante desse contexto, o trabalho tem como objetivo apresentar os fatores que interferem na eficiência da caldeira, apresentando medidas de controle para melhorar a umidade do bagaço.

Os dados foram obtidos a partir de um estudo de campo, no período da safra 2015/2016, onde foram coletados os dados da qualidade do bagaço da cana-de-açúcar: porcentagem da fibra da cana, vazão da água de embebição, temperatura da água, Pol (Porcentagem de massa na sacarose), pressão hidráulica das moendas pelo COI (centro de operação industrial), porcentagem da umidade do bagaço através da análise do bagaço final pelo laboratório industrial e medidas de controle na eficiência da extração do bagaço.

Para melhor interpretação dos dados levantados foi feita a utilização de planilhas eletrônicas para a construção de gráficos, visando facilitar o entendimento dos resultados a serem apresentados. Para esta pesquisa foi adotada a técnica quantitativa, pois, foram utilizados fórmulas e cálculos que garantiram resultados precisos sem variação das informações de análises, permitindo uma margem de segurança sobre o estudo elaborado.

A verificação do processo de extração do bagaço de cana-de-açúcar foi realizada a partir do seu preparo, que é o momento antes de seguir para os ternos da moenda para realização da extração de caldo e geração de bagaço. Neste ponto, observou-se a importância do equipamento picador e desfibrador, fazendo-se com que as células da cana se quebrem para facilitar o trabalho dos ternos da moenda.

Após a etapa do preparo da cana-de-açúcar, foi monitorado o processo de extração dos ternos da moenda através da pressão hidráulica, vazão de água da embebição, temperatura, acompanhamento da porcentagem da pol e umidade do bagaço. A FIG. 3 ilustra como é utilizado o sistema da água de embebição no processo de extração do bagaço, a uma temperatura de 50° a 60° C.



Figura 3 - Processo da água de embebição.

Fonte: autores (2016).

A água da embebição é resultante do processo da fabricação do açúcar, onde é depositado em um tanque e controlado sua temperatura, e depois, bombeado a uma pressão de 7,0 kgf/cm² para os ternos da moenda em uma linha mestre. A pressão hidráulica dos ternos de moenda é um dos fatores principais, pois, através das pressões aplicadas nos rolos da moenda se conse-

que um bom resultado de extração da umidade contida no bagaço, operação controlada via COI (centro de operação industrial).

Em relação ao terno da moenda, a FIG.4 ilustra detalhadamente como é feita a distribuição dos rolos, seu sentido de giro, entrada e saída de bagaço e onde é aplicada a pressão hidráulica.

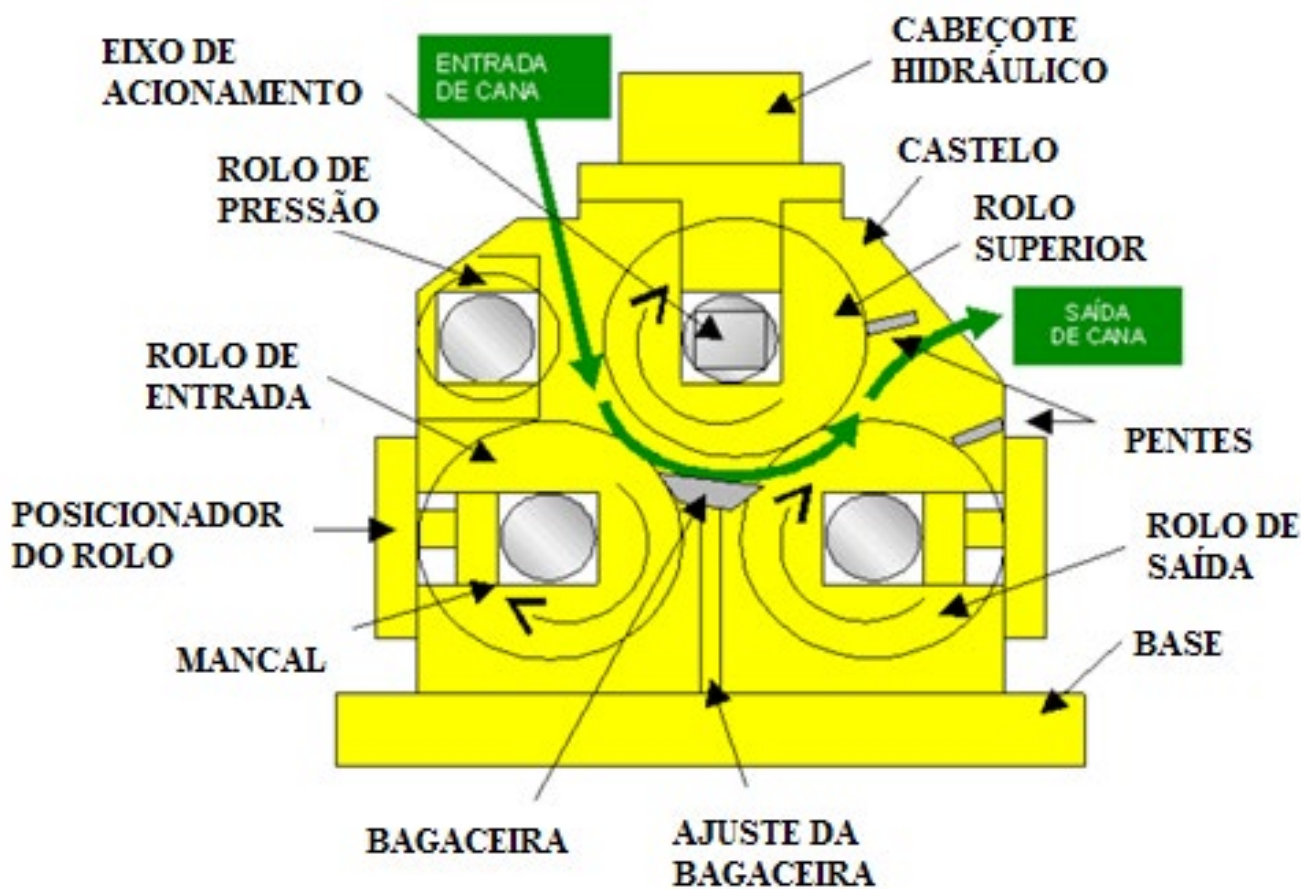


Figura 4 - Terno de moenda utilizado para extração do bagaço.

Fonte: RIBEIRO, Paulo Roberto. A usina de açúcar e sua automação. 2003. Smar Equipamentos Industriais Ltda.

A cana desfibrada entra entre os três primeiros rolos que são: o rolo de pressão, o rolo de entrada e o rolo superior. A camada de bagaço recebe a pressão hidráulica do rolo de pressão, em seguida passa pelos rolos de entrada e superior seguindo entre os rolos superior e de saída. Todos os rolos giram em sentido horário. A função do sistema hidráulico é manter uma pressão constante sobre a camada de bagaço, operação que deve permanecer dentro do nível máximo e mínimo das pressões estipuladas que varia de 3000 a 3600 (PSI).

Após a passagem do bagaço da cana pelo terno da moenda, ele está pronto para ser transportado até as caldeiras onde será utilizado como combustível. Neste ponto, o analista coleta uma amostra de bagaço para realizar a análise de porcentagem da umidade do subproduto da cana, sendo essa atividade realizada e controlada uma vez por turno pelo laboratório industrial. A FIG. 5 a seguir, representa a saída do baço da cana.



Figura 5 - Processo final de extração do bagaço.

Fonte: autores (2016).

Para executar a análise do bagaço são necessários os materiais relacionados a seguir: balança de precisão, estufa Spencer com cesto, sacarímetro automático, tubo de polarização, agitador magnético, digestor, proveta graduada, béquer, vidro de relógio, funil sem haste, proveta sem graduação, funil de tela, papel de filtro e mistura clarificante. O procedimento usado para a realização da análise de porcentagem da umidade do bagaço é através do método de estufa Spencer, que segue as seguintes etapas:

- 1º Pesar 50 g do bagaço previamente homogeneizado no cesto da estufa Spencer;
- 2º Ligar a estufa e deixar em funcionamento por 30 min. a 105° C;
- 3º Desligar, remover o cesto e pesar;
- 4º Recolocar o cesto na estufa Spencer, ligar e deixar em funcionamento por mais 5 min, remover o cesto e tornar a pesar. Se a perda adicional não for maior que 0,1 g secar por mais 5 min.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados das análises serão apresentados de acordo com: % Pol (Porcentagem de massa na sacarose), umidade do bagaço e fibra do bagaço, foram fornecidos pelo laboratório industrial da empresa. Na primeira semana do mês de junho do ano de 2015, foram realizadas coletas dos dados de análise do bagaço em porcentagens, fibra do bagaço, Pol (Porcentagem de massa na sacarose) e umidade que estão apresentados na TAB.1 a seguir.

Tabela 1.

Análise do bagaço de fibras e umidade - 1ª semana.

Coleta	12 - 14 % fibra bagaço	% Pol do Bagaço < 1,70	Umidade do bagaço < 52%	Temperatura agua de embebição (°C)	Vazão de Água (m³/h)
1ª	16	1,75	52,8	55	130
2ª	14,81	1,97	52,5	58	130
3ª	14,44	2,04	53,04	53	130
4ª	14,78	2,09	52,75	50	130
5ª	14,36	2,08	53,4	49	130

6 ^a	13,24	1,96	52,9	54	130
7 ^a	14,92	2,04	53,38	57	130
média	14,65	1,99	53,01	53,7	130

Fonte: autores (2016).

A TAB. 2 a seguir, apresenta a pressão hidráulica que o bagaço foi submetido, relacionado às coletas da TAB. 1 mostrado anteriormente.

Tabela 2.
Pressões hidráulicas - 1^a semana.

Coleta	1° terno (psi)	2° terno (psi)	3° terno (psi)	4° terno (psi)	5° terno (psi)	6° terno (psi)
1 ^a	3 132	2 918	3 845	3 492	3 231	2 906
2 ^a	3 100	2 937	3 408	3 230	3 213	2 893
3 ^a	3 100	3 000	3 324	3 086	3 178	2 906
4 ^a	3 200	3 100	3 300	3 044	2 892	2 892
5 ^a	3 060	3 100	3 600	3200	3 066	2 800
6 ^a	2 900	3 000	3 100	2 830	3 108	2 900
7 ^a	2 990	3 050	3 200	3 300	3 000	3 000
média	3 068	3 015	3 396	3 168	3 098	2 899

Fonte: autores (2016).

Conforme a TAB. 1 e 2 apresentada, o resultado verificado para a média da primeira semana de junho, revelou que a umidade do bagaço está com 53,01%, e a Pol resultou em 1,99 não atingindo dessa forma a meta proposta. Já a fibra do bagaço, manteve-se dentro do esperado com 14,65%, e a vazão de água foi mantida a 130 m³/h. A temperatura da água permaneceu dentro do esperado, sendo o valor obtido 53,7°C. As pressões hidráulicas conseguiram-se manter na média de trabalho do 1° ao 5° terno (3 000 a 3 600 psi), onde apenas o 6° terno ficou abaixo da média. Com isso, observou-se que os resultados das análises permaneceram dentro do padrão, mas o fator que interferiu para que a umidade não atingisse a meta, aparentemente foi o valor da pressão hidráulica no 6° terno. Isso ocasionou em uma perda expressiva no consumo de bagaço usado como combustível na caldeira, pois o bagaço com a umidade abaixo de 52% se consegue atingir uma boa eficiência térmica da caldeira.

A TAB. 3 e 4 a seguir, apresenta os dados referentes à segunda semana do mês de junho de 2005

Tabela 3.
Análise do bagaço de fibras e umidade - 2^a semana.

Coleta	12 - 14 % fibra bagaço	% Pol do Bagaço < 1,70	Umidade do bagaço < 52%	Temperatura agua de embebição (°C)	Vazão de Água (m ³ /h)
1 ^a	12,95	1,93	52,88	56	130
2 ^a	16,93	1,85	52,97	55	130
3 ^a	12,77	2,09	53,48	54	140
4 ^a	14,56	2,32	52,67	51	140
5 ^a	14,58	2,06	52,26	50	140
6 ^a	14,89	2,45	52,88	56	140
7 ^a	15,94	2,18	53,84	55	140
média	14,66	2,12	53,18	53,85	137,14

Fonte: autores (2016).

Tabela 4.
Pressões hidráulicas - 2ª semana.

Coleta	1º terno (psi)	2º terno (psi)	3º terno (psi)	4º terno (psi)	5º terno (psi)	6º terno (psi)
1ª	3 212	3 020	3 650	3 294	3 096	3 400
2ª	3 150	3 140	3 398	3 302	3 289	3 270
3ª	3 100	2 980	3 280	3 067	3 096	3 500
4ª	3 232	3 150	3 500	3 443	3 430	3 220
5ª	3 160	3 200	3 458	3300	2 950	3 380
6ª	3 000	3 030	3 020	2 900	3 150	3 090
7ª	2 910	3 150	3 000	3 500	3 200	3 000
média	3 109	3 095	3 329	3 258	3 173	3 265

Fonte: autores (2016).

Para a segunda semana de junho, através dos dados ilustrados pela TAB. 3 e 4, observou-se que a Pol teve uma alteração resultando a média em 2,12. Para buscar um melhor resultado na extração da Pol, foi alterada a vazão de água de embebição de 130 m³/h para 140 m³/h a partir da 3ª coleta, tendo assim uma média cujo resultado foi 137,14 m³/h. Devido a isso, verificou-se também que a umidade do bagaço obteve um acréscimo referente à semana anterior, resultando em 53,18 %, e as pressões hidráulicas do 1º ao 6º terno da moenda manteve-se dentro da média de trabalho (3000 a 3600 psi), assim a fibra do bagaço da cana continuou dentro do esperado, com 14,66 %, e a temperatura da água manteve-se dentro do estabelecido que é 53,85 °C.

Na terceira semana de junho, a nova coleta de dados do processo de extração obteve um novo cenário conforme ilustra a TAB. 5 e 6.

Tabela 5.
Análise do bagaço de fibras e umidade - 3ª semana.

Coleta	12 - 14 % fibra bagaço	% Pol do Bagaço < 1,70	Umidade do bagaço < 52%	Temperatura água de embebição (°C)	Vazão de Água (m ³ /h)
1ª	15,00	1,98	54,23	54	140
2ª	15,01	1,79	53,95	56	140
3ª	14,89	2,41	54,64	51	140
4ª	14,06	2,91	54,50	53	140
5ª	13,73	2,80	53,94	50	140
6ª	15,09	2,60	54,30	52	140
7ª	16,09	2,42	53,73	55	140
média	14,83	2,60	54,40	53	140

Fonte: autores (2016).

Tabela 6.
Pressões hidráulicas - 3ª semana.

Coleta	1º terno (psi)	2º terno (psi)	3º terno (psi)	4º terno (psi)	5º terno (psi)	6º terno (psi)
1ª	3 250	3 189	3 547	3 293	3 300	0
2ª	3 220	3 379	3 400	3 302	3 280	0
3ª	3 300	3 270	3 340	3 680	3 400	0
4ª	3 400	3 250	3 490	3 430	3 298	0
5ª	3 250	3 300	3 500	3 220	3 100	0
6ª	3 190	3 360	3 600	3 460	3 350	0

7ª	3 290	3 450	3 398	3 278	3 267	0
média	3 271	3 314	3 467	3 380	3 285	0

Fonte: autores (2016).

A Pol aumentou seu valor para 2,6, a vazão de água resultou em 140m³/h, a fibra do bagaço manteve a média com 14,83%, a temperatura da água conservou-se dentro do esperado com 53°C e as pressões hidráulicas manteve-se dentro do estabelecido (3000 a 3600 psi). Porém o bagaço obteve um resultado de 54,4% de umidade, esse valor obtido corrobora-se com a parada do 6º terno por problemas mecânico. Para melhorar esse resultado relacionado à umidade do bagaço da cana, na semana seguinte do processo, foi ajustado a pressão do 5º terno, de forma que ela trabalhasse no seu limite máximo, e assim fosse alcançado um resultado melhor, frente a esta situação atípica. Os dados da 4ª semana, cujo valor do set point do 5º terno foi alterado, está representado na TAB. 7 e 8 a seguir.

Tabela 7.
Análise do bagaço de fibras e umidade - 4ª semana.

Coleta	12 - 14 % fibra bagaço	% Pol do Bagaço < 1,70	Umidade do bagaço < 52%	Temperatura agua de embebição (°C)	Vazão de Água (m ³ /h)
1ª	13,24	2,08	53,50	50	135
2ª	15,20	2,30	53,94	53	135
3ª	12,79	2,15	53,07	56	135
4ª	14,34	2,05	53,50	58	135
5ª	14,78	2,16	52,90	60	135
6ª	12,56	2,20	53,05	57	135
7ª	15,14	2,00	53,58	55	135
média	14,00	2,13	53,22	55,57	135

Fonte: autores (2016).

Tabela 8.
Pressões hidráulicas - 4ª semana.

Coleta	1º terno (psi)	2º terno (psi)	3º terno (psi)	4º terno (psi)	5º terno (psi)	6º terno (psi)
1ª	3 300	3 298	3 600	3 492	3 564	0
2ª	3 390	3 337	3 500	3 290	3 598	0
3ª	3 250	3 245	3 470	3 350	3 600	0
4ª	3 400	3 190	3 421	3 300	3 470	0
5ª	3 190	3 250	3 550	3 400	3 612	0
6ª	3 240	3 300	3 430	3 500	3 550	0
7ª	3 200	3 400	3 400	3 300	3 500	0
média	3 281	3 288	3 481	3 376	3 556	0

Fonte: autores (2016).

Esse resultado apresentado ilustra a amostragem da quarta semana do mês de junho, onde o 6º terno continuou parado, e foram realizadas alterações para buscar um melhor resultado. A vazão de água de embebição foi estabilizada, ficando em 135 m³/h, e o setpoint de pressão do 5º terno que foi alterado para trabalhar um valor acima da sua média, assim, obteve-se o resultado da média de pressão do 5º terno em 3 556 (psi), operando dentro do limite máximo para alcançar um melhor resultado dentro desta situação, a Pol resultou em 2,13, a fibra do bagaço esteve dentro da média com 14%, e a temperatura da água de embebição continuou dentro

do estabelecido (55,57° C. Com essa alteração do 5º turno, a umidade do bagaço melhorou se comparado à semana anterior, indo para um valor de 53,22%.

Após a manutenção do 6º turno e seu retorno ao processo, a quinta semana apresentou resultados mais satisfatórios, conforme mostra a TAB. 9 e 10 a seguir.

Tabela 9.

Análise do bagaço de fibras e umidade - 5ª semana.

Coleta	12 - 14 % fibra bagaço	% Pol do Bagaço < 1,70	Umidade do bagaço < 52%	Temperatura água de embebição (°C)	Vazão de Água (m³/h)
1ª	14,15	1,56	53,09	53	130
2ª	13,56	1,78	52,28	56	130
3ª	14,87	1,66	53,06	51	130
4ª	14,43	1,49	52,35	49	130
5ª	12,97	1,50	53,03	55	130
6ª	15,00	1,61	52,65	56	130
7ª	13,04	1,80	53,01	55	130
média	14,00	1,62	52,78	53,57	130

Fonte: autores (2016).

Tabela 10.

Pressões hidráulicas - 5ª semana.

Coleta	1º turno (psi)	2º turno (psi)	3º turno (psi)	4º turno (psi)	5º turno (psi)	6º turno (psi)
1ª	3 200	3 291	3 500	3 300	3 296	3 390
2ª	3 100	3 297	3 408	3 390	3 480	3 450
3ª	3 150	3 300	3 245	3 150	3 280	3 287
4ª	3 290	3 200	3 380	3 200	3 100	3 430
5ª	3 300	3 450	3 467	3 210	3 200	3 280
6ª	3 100	3 290	3 260	3 990	3 190	3 410
7ª	3 100	3 189	3 389	3 200	3 0680	3 100
média	3 177	3 288	3 378	3 205	3 230	3 335

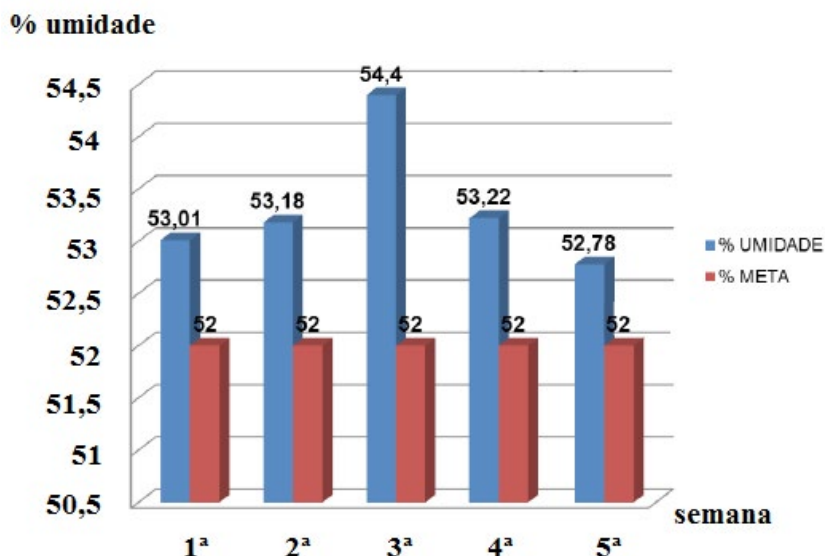
Fonte: autores (2016).

Através da TAB.9 e 10, verificou-se que no período analisado o processo de extração estava em operação normal, sendo alcançada a meta de extração da Pol que resultou em 1,62. A fibra da cana manteve-se com 14% e a vazão e temperatura da água de embebição manteve seus parâmetros, que é de 130 m³/h e 50°C a 60°C respectivamente, e a pressão hidráulica dos ternos se manteve conforme o *setpoint* de pressão de cada turno (3000 a 3600 psi), porém a umidade não atingiu a meta, fechando seu resultado em 52,78%. Com isso observou-se que a perda de eficiência da caldeira esteve abaixo nas cinco semanas de amostra. Percebe-se que o resultado da análise da umidade do bagaço, feita uma vez por turno prejudica nas regulagens a serem feitas nas pressões hidráulicas dos ternos, pois são equipamentos de grande porte e leva tempo para se ajustar.

O GRAF. 1 revela os resultados das umidades no período em estudo.

Gráfico 1.

Porcentagem de umidade do bagaço da cana no período de estudo.



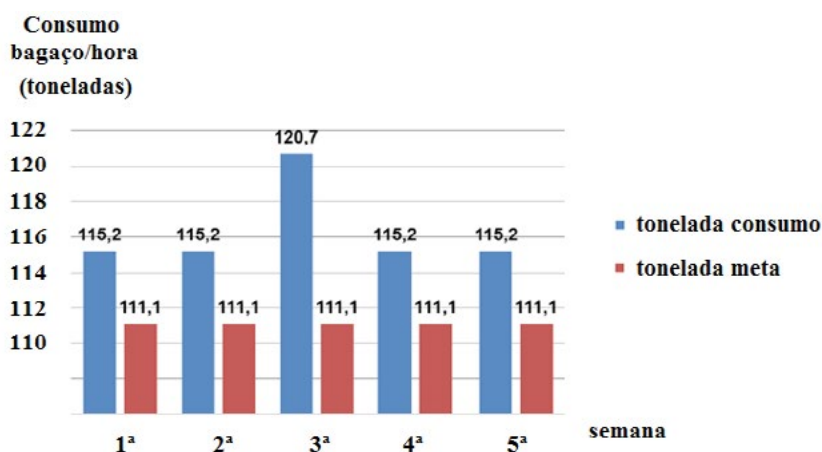
Fonte: autores (2016).

Após análise do GRAF. 1, observou-se que a umidade do bagaço manteve-se acima da meta estabelecida pela empresa, na primeira e segunda semana mantendo-se as mesmas condições operacionais o resultado superou em 1% a meta estabelecida, enquanto que na terceira semana o resultado 53,18%, foi devido a um problema mecânico com o 6° terno, elevando assim o valor da umidade. Realizado regulagens na vazão de água de embebição para 135m³, set point de pressão do 5° terno para 3600 (psi), conseguiu-se um melhor resultado na quarta semana de junho, com isso a média da semana resultou-se em 53,22%. Na quinta semana de análise o processo manteve-se estável encerrando a média da umidade em 52,78%, melhor resultado obtido nas cinco semanas de coleta dos dados. Neste período mantiveram-se os mesmos ajustes da pressão hidráulica dos ternos da moenda e da vazão de água.

A importância para esses dados se faz a partir da necessidade de otimizar o consumo do bagaço de cana na caldeira, cujo principal objetivo é a produção de energia elétrica. O GRAF. 2 a seguir, refere-se aos dados de consumo de bagaço de cana, para a produção de energia no período em estudo.

Gráfico 2.

Consumo do bagaço da cana por hora na caldeira (em toneladas).



Fonte: autores (2016).

A meta proposta para o consumo do bagaço da cana, utilizado na caldeira, é de 111,1 toneladas por horas. O GRAF. 2 revelou que a meta proposta não foi atingida, chegando a superar um valor de 4,1 toneladas por hora na primeira, segunda, quarta e quinta semana. Na terceira semana o consumo de bagaço de cana foi um valor acima dos demais, tendo um aumento de 9,6 toneladas de bagaço por hora. Conclui-se que esse consumo acima da meta proposta tem relação direta com a umidade do bagaço, cujo valor não atingiu a meta que era de 52%. A terceira semana foi a mais discrepante, visto que para ela, a umidade do bagaço estava bem acima do valor, comparado as outras semanas.

O principal parâmetro para a avaliação de um combustível é o seu poder calorífico, que corresponde a quantidade de energia liberada pela combustão de uma quantia unitária de sua massa. Para os combustíveis que possuem hidrogênio em sua molécula e consequentemente produzem água na combustão, existem dois tipos de poderes caloríficos, o poder calorífico superior (PCS), que corresponde ao calor liberado considerando que a água formada está sob a forma líquida e o poder calorífico inferior (PCI), que corresponde ao calor liberado considerando que a água formada está sob a forma de vapor. Dessa forma, é possível analisar a eficiência da caldeira em estudo, frente ao consumo do bagaço de cana no período analisado. A TAB. 11 a seguir, elaborada por Pera (1990) revela alguns dados sobre o bagaço da cana e seu poder calorífico, onde kgv é quilograma-vapor e kgb é quilograma-bagaço.

Tabela 11.
Pressões hidráulicas - 5ª semana.

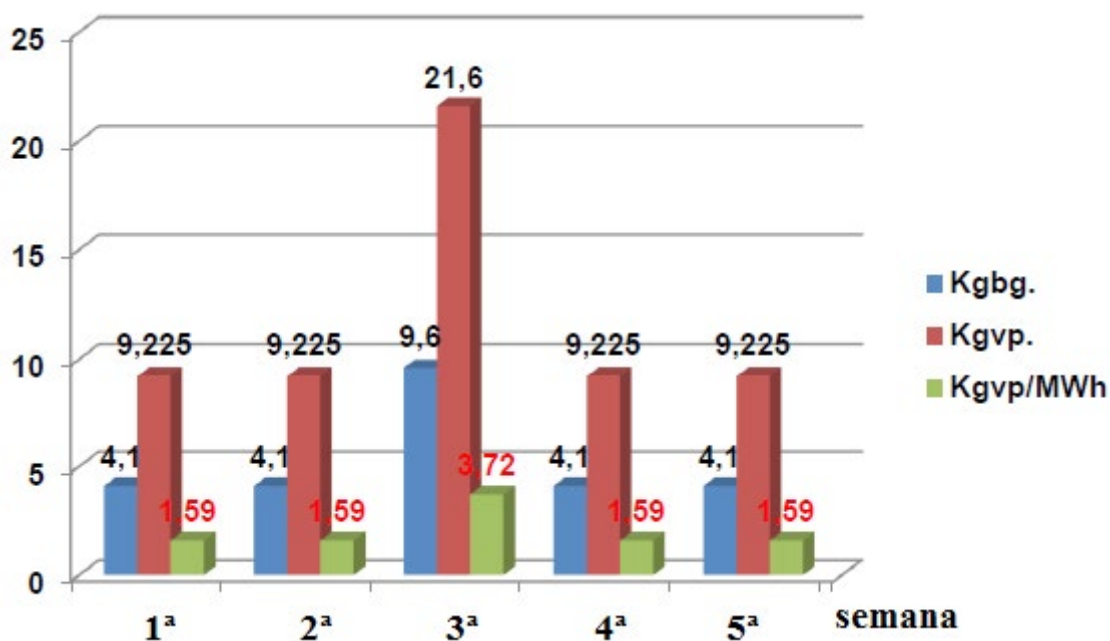
Umidade do bagaço	PCS Kcal/kg	kgv/kgb	Acréscimo consumo Bagaço (%)
49	2 282	2,48	0
51	2 192	2,34	6,0
52	2 167	2,25	9,1
53	2 103	2,17	12,2
55	2 013	2,07	19,8
57	1 924	1,93	28,5

Fonte: PERA, H. **Geradores de Vapor: Um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia.** 2ª Ed. São Paulo: Fama, 1990.

Na primeira e segunda semana do período analisado, com a umidade do bagaço entre 53,18% e 53,02%, houve um aumento de 4 100 kg de bagaço por hora em cada semana, o equivalente a 9,225 kg de vapor/hora gerado, e na terceira semana com a umidade do bagaço em 54,4% o aumento foi 9 600 kg de bagaço por hora, o equivalente a 21 600 kg de vapor produzido, na quarta e quinta semana estando a umidade do bagaço entre 53,22% e 52,76%, houve um acréscimo de 4 100 kg de bagaço por hora em cada semana, o equivalente a 9 225 kg de vapor gerado. O GRAF.3 a seguir ilustra a quantidade equivalente de vapor gerado, referente ao acréscimo do consumo de combustível devido à umidade do bagaço, convertendo-se em MWh não produzido.

Gráfico 3.

Relação da perda de energia por excesso do consumo do bagaço da cana por hora.



Fonte: autores (2016).

De acordo com os dados fornecidos pela a empresa, para a caldeira em operação, são necessários 5 800 kg vapor/hora para produzir 1,0 MWh de energia elétrica. Na primeira, segunda, quarta e quinta semana como ilustra o GRAF. 3, houve um acréscimo de combustível de 4 100 kg de bagaço, o que equivale a 9 225 kg de vapor, que transformado em MWh, corresponde a 1,59 MWh não produzido em cada semana. Já na terceira semana, com o acréscimo de combustível em 9 600 kg de bagaço, seu equivalente em vapor foi de 21 600 Kg que convertido em MWh corresponde a 3,72 MWh não produzido.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou apresentar a relevância do bagaço da cana como combustível utilizado no processo de geração de energia elétrica a partir da utilização de caldeiras e turbinas de alta pressão. No estudo realizado, a coleta dos dados para análise da umidade do bagaço da cana, causa grande impacto na produção de energia elétrica. O controle desse parâmetro torna-se essencial para que a eficiência produtiva esteja em alta.

Um dos fatores detectados pela perda na produção de energia elétrica refere-se a coleta dos dados da umidade do bagaço que é fornecido uma vez por turno pelo laboratório industrial da empresa. Por ser feita apenas uma vez por turno, os processos como regulagem da pressão hidráulica dos ternos da moenda acabam por não ter eficiência na qual é necessária para se ter uma boa extração do bagaço reduzindo a umidade e cumprindo a meta estabelecida pela empresa, dessa forma, conclui-se que, para manter a eficiência da caldeira dentro do esperado é necessária uma adequada extração do bagaço, onde, para conservar a umidade dentro dos parâmetros estabelecidos pela empresa, é necessário um acompanhamento das análises com um efetivo maior durante o processo de extração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- HUGOT, E. (1977). Manual da engenharia açucareira. São Paulo: Mestre Jou. v. 1.
- PAYNE, J. H. (1989). Operações Unitárias na Produção de Açúcar de Cana. São Paulo: Nobel. 248 p.
- PERA, H. (1990). Geradores de Vapor: Um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia. (2ª ed.). São Paulo: Fama.
- RIBEIRO, P. R. (2003). A usina de açúcar e sua automação. Smar Equipamentos Industriais Ltda.
- MACHADO, F. B. P. (2003). *Açúcar, a doce terra-História do setor*. Recuperado em 15 Junho, 2015, de <http://ag20.cnptia.embrapa.br/Repositorio/historia_da_cana_000fhc62u4b02wyi-v80efhb2attuk4ec.pdf>
- SILVA, K. S.; FARIA, J. A. F. (2006). Avaliação da qualidade de caldo de cana envasado a quente e por sistema asséptico. *Food Science and Technology*, 15 (26), 754-758.
- MIRANDA, L. L. D.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, G. A. (2008). Cana-de-açúcar. Campinas: Instituto Agrônômico.
- BORGES, M. T. M. R; LOPES, C. H. (2009). Introdução a Tecnologia Agroindustrial. São Carlos: Eduscar.
- BRASIL, Ministério do Trabalho. (2009). Norma Regulamentadora NR-13. Manual de Legislação Atlas. (63ª ed.). São Paulo: Atlas S.A.
- NOVA CANA. (2013). *A produção de cana-de-açúcar no Brasil (e no mundo)*. Recuperado em 10 Junho, 2015, de <<http://www.novacana.com/cana/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo/>>.