

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG**  
**CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**  
**CRISTIANO SÉRGIO DOS SANTOS**

**ESTUDO DE CASO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA GERAÇÃO DE VAPOR**  
**ATRAVÉS DO USO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM UMA USINA**  
**SUCROALCOOLEIRA NO CENTRO OESTE MINEIRO**

**FORMIGA - MG**

**2015**

CRISTIANO SÉRGIO DOS SANTOS

ESTUDO DE CASO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA GERAÇÃO DE VAPOR  
ATRAVÉS DO USO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM UMA USINA  
SUCROALCOOLEIRA NO CENTRO OESTE MINEIRO

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao curso de Engenharia de Produção do  
Centro Universitário de Formiga – MG, como  
requisito parcial para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia de Produção.  
Orientador: Prof. Ms. Samuel de Oliveira

FORMIGA - MG

2015

Cristiano Sérgio dos Santos

ESTUDO DE CASO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA GERAÇÃO DE VAPOR  
ATRAVÉS DO USO DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR EM UMA USINA  
SUCROALCOOLEIRA NO CENTRO OESTE MINEIRO

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao curso de Engenharia de Produção do  
Centro Universitário de Formiga – MG, como  
requisito parcial para obtenção do título de  
bacharel em Engenharia de Produção.  
Orientador: Prof. Ms. Samuel de Oliveira.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Ms. Samuel de Oliveira

Orientador

---

Prof. Neylor Makalister Ribeiro Vieira

UNIFOR-MG

Formiga, 13 de novembro de 2015.

Dedico essa conquista á minha família que sempre acreditou que eu seria capaz de chegar até aqui, principalmente a minha esposa que, não mediu esforços para que esta conquista fosse realizada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me proporcionar à sabedoria, me conduzir e me dar forças para superar todas as dificuldades encontradas durante esses cinco anos.

Agradeço a minha esposa Andreia, filhos Davi e Maria Clara pelo apoio, para que eu pudesse realizar esse sonho. A minha mãe, ao meu sogro e sogra por ter sido a grandes ajudadores nas horas das dificuldades, onde não mediram esforço para me ajudar.

Aos meus orientadores Samuel e Eugênio, pela paciência, por me ajudar a organizar minhas ideias e principalmente, por me incentivarem e me ajudar a acreditar que eu seria capaz de chegar até aqui.

Aos meus colegas de classe pelo tempo que passamos juntos e por terem sido companheiros durante esses anos e ao meu amigo.

Agradeço de coração a todos os amigos, colegas e irmãos na fé que estiveram ao meu lado durante esses cinco anos e torceram para que hoje eu pudesse estar realizando esse sonho.

"Confia no Senhor de todo o seu coração, e não te estribes no seu próprio entendimento. Reconhece-o em todos os teus caminhos, e ele endireitará as tuas veredas." (Prov. 3:5-6).

## RESUMO

Diante de um mercado competitivo, as indústrias sucroalcooleiras buscam cada vez mais aumentar o seu rendimento, bem como a eficiência industrial e investindo em tecnologias no setor de cogeração de energia, minimizando 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 pela empresa. Perante essa situação, o atual estudo sugeriu-se a identificar o 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 estar acima de 52%. A sugestão do estudo foi revelar a perda da 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 e propor medida de controle para obter uma extração do bagaço dentro do esperado.

Palavras-chave: Cogeração de energia. Cana-de-açúcar. Eficiência da caldeira.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Os dez maiores países produtores de cana de açúcar. ....	16
Figura 2 - Evolução da produção brasileira de cana, açúcar e etanol. ....	17
Figura 3 - Representação de uma caldeira aquatubular .....	20
Figura 4 - Tipos de paredes de água. ....	23
Figura 5 - Tipos de paredes de água .....	24
Figura 6 - Evolução das vendas de caldeiras de bagaço de cana pela empresa caldema. ....	28
Figura 7 - Foto da caldeira aquatubular monodrum .....	30
Figura 8 - Poder calorífico superior de alguns produtos. ....	32
Figura 9 - Pci do bagaço com diferentes umidades e teor de sacarose .....	32
Figura 10 - Comparativo do poder calorífico superior do bagaço de cana de açúcar x umidade .....	34
Figura 11 - Processo da água de embebição. ....	37
Figura 12 - Terno de moenda usado para extração do bagaço .....	38
Figura 13 - Processo final de extração do bagaço. ....	39



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Procedimento usado para a realização da análise de porcentagem da umidade do bagaço.....	40
Tabela 2 - Análise do bagaço de fibras de bagaço e umidade.....	41
Tabela 3 - Pressões hidráulicas (psi) .....	41
Tabela 4 - Monitoramento dos dados da qualidade de extração bagaço. ....	42
Tabela 5 - Pressões hidráulicas (psi) .....	42
Tabela 6 - Monitoramento dos dados da qualidade de extração bagaço. ....	43
Tabela 7 - Pressões hidráulicas (psi) .....	43
Tabela 8 - Monitoramento dos dados da qualidade de extração bagaço. ....	44
Tabela 9 - Pressões hidráulicas (psi) .....	44
Tabela 10 - Monitoramento dos dados da qualidade de extração bagaço. ....	45
Tabela 11 - Pressões hidráulicas (psi) .....	45
Tabela 12 - Monitoramento dos dados da qualidade de extração bagaço .....	46
Tabela 13 - Pressões hidráulicas (psi) .....	46
Tabela 14 - Valores analíticos do bagaço. ....	48
Tabela 15 - Folha de pagamento para um analista júnior. ....	51

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Umidades no mês de junho e julho de 2015.....	47
Gráfico 2 – Consumo de bagaço em toneladas por hora.....	48
Gráfico 3 – Quantidade de vapor gerado convertido em MWh não produzido.....	49
Gráfico 4 – Perdas de MWh convertidos em reais.....	50
Gráfico 5 – Perdas ocorridas nas seis semanas de amostragem.....	52

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1	Problema.....	13
1.2	Justificativa .....	13
1.3	Hipótese.....	14
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
2.1	Objetivo geral .....	14
2.2	Objetivos específicos .....	14
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>15</b>
3.1	História da cana-de-açúcar .....	15
3.2	Setor sucroalcooleiro .....	16
3.3	Caldeira.....	18
3.4	Caldeira aquatubular .....	19
3.5	Principais componentes de uma caldeira aquatubular .....	21
3.5.1	Tubulão .....	21
3.5.2	Coletor inferior .....	22
3.5.3	Fornalha .....	22
3.5.4	Paredes de água .....	22
3.5.5	Superaquecedor .....	24
3.5.6	Economizador.....	25
3.5.7	Pré-aquecedor de ar.....	25
3.5.8	Ventiladores e exaustores .....	25
3.6	Caldeira aquatubular monodrum .....	26
3.7	Bagaço da cana-de-açúcar .....	30
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
4.1	Empresa .....	35
4.2	Coleta de dados.....	35
4.3	Técnicas e métodos .....	36
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>37</b>
5.1	Verificação do processo de extração do bagaço de cana-de-açúcar .....	37
5.2	Preparo.....	37

<b>5.3</b>	<b>Extração .....</b>	<b>37</b>
<b>5.4</b>	<b>Análise do bagaço pelo método do digestor a frio .....</b>	<b>39</b>
<b>5.5</b>	<b>Coletas de dados da extração do bagaço da cana-de-açúcar.....</b>	<b>40</b>
<b>5.6</b>	<b>Método de trabalho para que a umidade do bagaço fique dentro dos parâmetros ideais.....</b>	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>52</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O setor sucroalcooleiro tem buscado investimento e inovações para manter-se sustentável no mercado. Em meio às dificuldades encontradas, tanto pela falta de chuva, causando quebra nos canaviais, o custo de produção alto e a falta de incentivo fiscal pelo governo tem colocado o setor em situações de desconforto, com isso, algumas usinas fecharam e outras estão embernadas.

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 de cogeração, onde, o valor do MWh, pago pelas concessionárias aqueceu o mercado, devido há crise hídrica em algumas regiões do país, enfrentado nestes últimos anos.

De acordo com Barata<sup>1</sup> (2006 apud ARNÃO, 2007, p.40), o sistema de cogeração de energia elétrica do setor sucroalcooleiro é composto de caldeira, turbina a vapor e gerador de energia elétrica. O setor sucroalcooleiro utiliza-se de caldeira aquatubular para a produção do vapor. Essa caldeira usa como combustível o bagaço de cana, que é um subproduto do processo de fabricação de açúcar e álcool. No setor sucroalcooleiro brasileiro os máximos parâmetros de operação são: 6,7Mpa, 500°C e 300 t/h de vapor.

Este estudo visa contribuir nesta área com a análise do desempenho termodinâmico da caldeira de bagaço e a análise econômica do seu sistema de recuperação dos gases de exaustão.

O uso do bagaço da cana-de-açúcar como combustível, agregou valores a este sistema de cogeração de energia elétrica renovável, usado nas caldeiras aquatubulares de alta pressão, 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.

O trabalho concentra-se em um estudo do bagaço da cana-de-açúcar para identificar como manter seus parâmetros ideais, garantir o poder calorífico ideal na

---

<sup>1</sup> Barata, J. **Comunicação Pessoal**: Caldema Equipamentos Indústrias Ltda. 2006.

queima, vindo à caldeira atingir sua eficiência energética na produção de vapor, sua importância no setor sucroalcooleiro, na geração de energia elétrica.

### **1.1 Problema**

Como manter a umidade do bagaço da cana-de-açúcar dentro dos parâmetros ideais, para garantir a eficiência da caldeira?

### **1.2 Justificativa**

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.

Atualmente, destacam-se as caldeiras de alta pressão que utilizam o bagaço da cana-de-açúcar como combustível para a geração de vapor. Estas caldeiras são muito eficientes, proporcionando um ótimo desempenho e vida útil. É um investimento caro para adquirir um sistema de cogeração de energia elétrica, composto por caldeira, turbina a vapor e gerador, mas estudos falam que esse investimento pode ser pago em cinco safras só com a cogeração de energia.

Para que possa concluir este prazo e evitar surpresas inesperadas, como perda no combustível e desgaste do equipamento ou deformação do equipamento, é necessário qualificar os operadores, fazer uma boa manutenção do equipamento, monitoramento do bagaço da cana-de-açúcar e suas características.

O uso do bagaço da cana-de-açúcar em caldeiras aquatubulares de alta pressão exige métodos aplicáveis para que o equipamento possa atingir sua eficiência energética.

A justificativa da escolha do tema se baseia na perda relativa em que a empresa sucroalcooleira no centro oeste mineiro vem sofrendo com a umidade alta do bagaço da cana-de-açúcar, diminuindo a eficiência energética da caldeira e aumentando o consumo do combustível para gerar a mesma quantidade de vapor em que o sistema necessita para geração de energia.

O presente estudo torna-se relevante por apresentar técnicas de trabalho que contribuam para que a umidade do bagaço esteja dentro dos parâmetros ideais, buscando a eficiência no processo e alcançando a lucratividade.

### **1.3 Hipótese**

Espera-se que através dos dados conseguidos e das análises do processo de extração do bagaço, fossem identificados os fatores que interferem na eficiência da caldeira, onde, através deste estudo de campo nos revelaste as perdas ocorridas através da alta umidade do bagaço.

## **2 OBJETIVOS**

Os objetivos se dividem em geral e específicos da seguinte forma:

### **2.1 Objetivo geral**

Apresentar métodos de trabalho que possam contribuir para que a umidade do bagaço-de-cana de açúcar permaneça dentro dos parâmetros ideais, buscando eliminar os desperdícios e atingindo a eficiência da caldeira.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Descrever o tipo de caldeira aplicada no setor sucroalcooleiro, utilizado no processo de cogeração de energia;
- Apresentar os impactos gerados no processo de geração de vapor, devido à umidade do bagaço elevada;
- Propor métodos que visam trabalhar com a umidade dentro dos parâmetros ideais.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo será abordado todo o processo da queima do bagaço de cana-de-açúcar em caldeira no setor sucroalcooleiro, o impacto na cogeração de energia elétrica com ênfase na umidade do bagaço e métodos adotados para manter o mesmo dentro dos parâmetros.

#### 3.1 História da Cana-de-açúcar

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.

Cristóvão Colombo, genro de um grande produtor de açúcar na Ilha Madeira, introduziu o plantio da cana na América, em sua segunda viagem ao continente, em 1493, onde hoje é a República Dominicana. Quando os espanhóis descobriram o ouro e a prata das civilizações Azteca e Inca, no início do século XVI, o cultivo da cana e a produção de açúcar foram esquecidos. 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.

Segundo a revista Nova Cana (2013), 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 mostra a FIG. 1 a seguir.

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

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

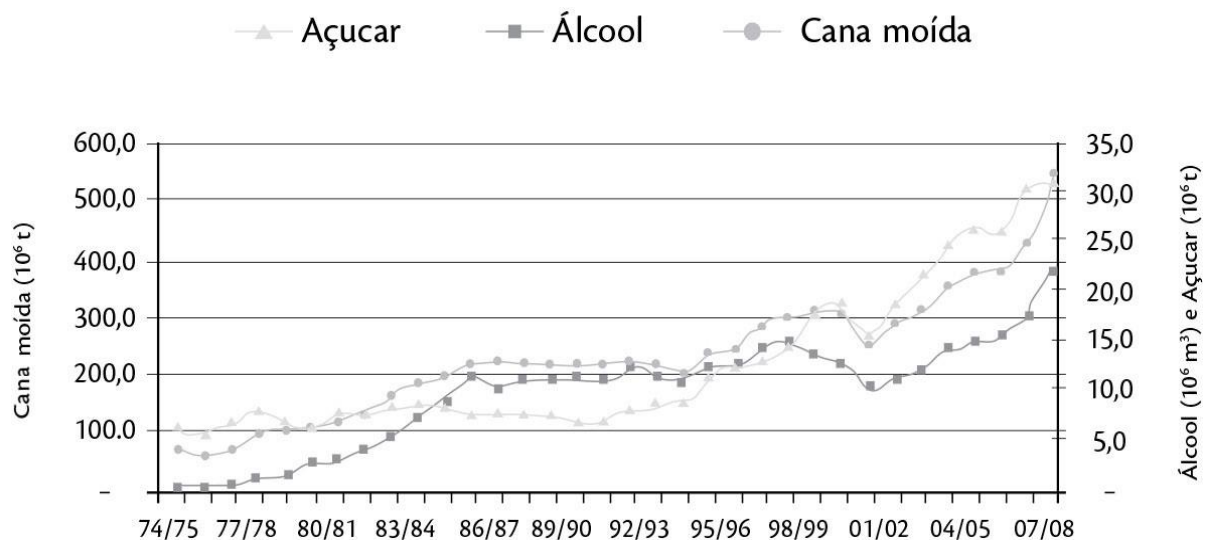
Fonte: FAO, 2008.

### 3.2 Setor Sucroalcooleiro

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. A FIG. 2 mostra a evolução brasileira da produção de cana, açúcar e etanol.

Figura 2 - Evolução da produção brasileira de cana, açúcar e etanol.



Fonte: IBGE, 2008.

Esse incremento recente causado pelo aumento da demanda interna por álcool hidratado e expectativa de ampliação da exportação impulsionou a expansão de aproximadamente 100 novas unidades produtoras nos últimos anos, principalmente no oeste do estado de São Paulo.

De acordo com a revista Nova Cana (2013), as usinas brasileiras se beneficiaram porque possuíam o álcool como salvaguarda. 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.

### 3.3 Caldeira

Pela necessidade de se encontrar alternativas na geração de calor surgiram às máquinas destinadas a gerar vapor.

De acordo com Bazzo (1995), esse surgimento aconteceu no início do século XVIII e foi promovido através da necessidade de se encontrar alternativas na geração de calor, que substituíssem a queima direta de carvão fóssil. Nos dias atuais, pela grande praticidade e versatilidade de sua utilização, o vapor d'água tornou-se indispensável em diversos setores industriais.

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 (MINISTERIO, 2009).

Para Alves (2002), todos os tipos de caldeiras sempre possuem três partes essenciais, que são: a fornalha ou câmara de combustão, a câmara de água e a câmara de vapor.

Corroborando o mesmo menciona que, 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/cm<sup>2</sup>);
- Categoria C: caldeiras com pressão de operação igual ou inferior a 588 KPa (5,9 kgf/cm<sup>2</sup>) e volume interno igual ou inferior a 100 litros;

- Categoria B: caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores.

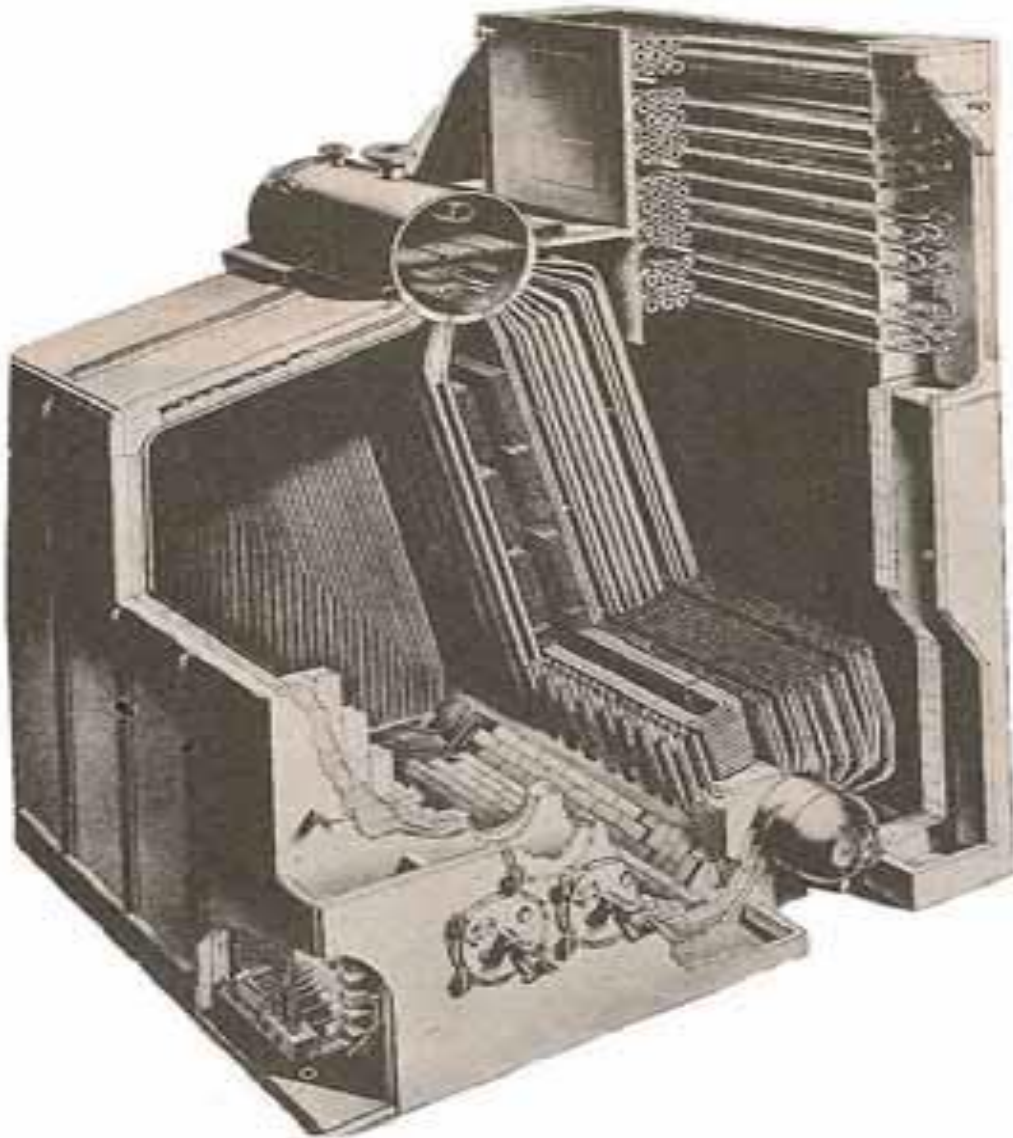
Ainda quanto à classificação das caldeiras, sabe-se que existem outras maneiras particulares de classificação das mesmas, como por exemplo: quanto ao tipo de montagem, circulação de água, sistema de tiragem e tipo de sustentação.

Alves (2002) relata também que, os geradores são divididos em: Caldeiras flamo tubulares, Caldeiras aquatubulares e Caldeiras elétricas. Segundo o mesmo, numa unidade termelétrica de cogeração de energia o tipo de caldeira usada é a aquatubular.

### **3.4 Caldeira Aquatubular**

De acordo com Torreira (1995), gerador de vapor é um trocador de calor complexo que produz vapor a pressão superior à atmosférica a partir da energia térmica de um combustível e de um elemento comburente (ar). O mesmo é constituído por diversos equipamentos associados, perfeitamente integrados, para permitir a obtenção do maior rendimento térmico possível. Neste contexto podemos compreender que esta definição abrange todos os tipos de geradores de vapores, sejam esses os que vaporizam a água, mercúrio ou fluidos térmicos como as mais simples unidades geradoras de vapor de água, que são comumente conhecidas por caldeiras de vapor. A FIG.3 seguinte nos mostra uma caldeira aquatubular.

Figura 3 - Representação de uma caldeira aquatubular



Fonte: Pera,1990

De acordo com Martinelli Júnior (1998), existem as chamadas Caldeiras Tubos de Água, as mesmas se caracterizam pelos tubos situarem-se fora dos tubulões da caldeira (tambor), constituindo com estes um feixe tubular. As Caldeiras Tubos de Água diferenciam-se das flamotubulares (os tubos das flamotubulares vaporizadores estão submersos em água. Dessa forma, no interior dos tubos vaporizadores escoam os gases da combustão em direção à chaminé), pois a água circula no exterior dos tubos e os gases quentes encontram-se em contato com sua superfície externa. Assim, operam a média e alta pressão, resultando em alta produção de vapor.

Quanto à necessidade, as caldeiras aquatubulares são utilizadas quando há necessidade de altas pressões e alta demanda de vapor. São caldeiras mais complexas em relação às flamotubulares, e necessitam de equipamentos auxiliares para seu funcionamento (ventiladores, exaustores, bombas, alimentadores).

Segundo Torreira (1995), devido sua estrutura interna ser dividida em coletores e tubos de pequeno diâmetro, tem como características: suportarem altas pressões, vaporização específica maior e possuir melhor transmissão de calor em relação às caldeiras flamotubulares.

Ainda segundo Torreira (1995), nas caldeiras aquatubulares a água e o vapor circulam no interior dos tubos vaporizadores, e a superfície externa dos tubos está em contato com os gases da combustão, conforme FIG. 3. O rendimento térmico é de 80 % a 82 % ou maiores em caldeiras que possuem superaquecedores, economizadores e aquecedores de ar.

### **3.5 Principais Componentes de uma Caldeira Aquatubular**

Referente aos componentes de uma caldeira Aquatubular, podemos entender através da CHD Válvulas (2005), que as partes principais de uma caldeira do tipo são: tubulão superior (ou tambor de vapor), tubulão inferior (ou tambor de lama), feixe tubular, parede de água, fornalha e superaquecedor, sendo que outros equipamentos denominados como auxiliares ou periféricos ajudam a boa operação de uma caldeira, os quais são: economizador, pré-aquecedor de ar, soprador de fuligem, ventiladores e exaustores.

#### **3.5.1 Tubulão**

Sobre o tubulão podemos concluir que o mesmo é um corpo cilíndrico de aço localizado na parte superior da caldeira que recebe a água de alimentação já tratada para ser distribuída para as paredes de água e feixes de tubos. As caldeiras podem ter um ou mais tubulões interligados por feixes de tubos. Podemos entender então que, à medida que a água vai passando pelos feixes de tubos e parede de água, ela vai evaporando, retornando ao tubulão no estado de vapor saturado. (CHD VÁLVULAS, 2005).

### **3.5.2 Coletor Inferior**

O coletor inferior pode ser entendido como um corpo cilíndrico de aço localizado na parte inferior da caldeira, de menor diâmetro que o tubulão, e que tem como função auxiliar na distribuição de água pelos tubos da caldeira. (CHD Válvulas, 2005).

### **3.5.3 Fornalha**

Segundo Pera (1990), fornalha seria a denominação genérica que se dá para o local onde se queima o combustível.

Sobre a classificação da mesma, é observado que essa pode ser feita em duas categorias: fornalhas de queima sobre suporte e fornalhas de queima em suspensão.

As fornalhas de queima sobre suporte englobam as fornalhas que queimam combustíveis sólidos (carvão, lenha) a granel, grosseiramente divididos, picados e britados. As mesmas são subdivididas em dois grupos: de suporte estático e suporte movimentado. Assim, simplificando nas fornalhas de suportes estáticos, o combustível introduzido permanece praticamente em repouso até sua combustão completa e já as fornalhas de suporte movimentado distinguem da anterior por possuir alimentação contínua e mecanizada de combustível. (PERA, 1990).

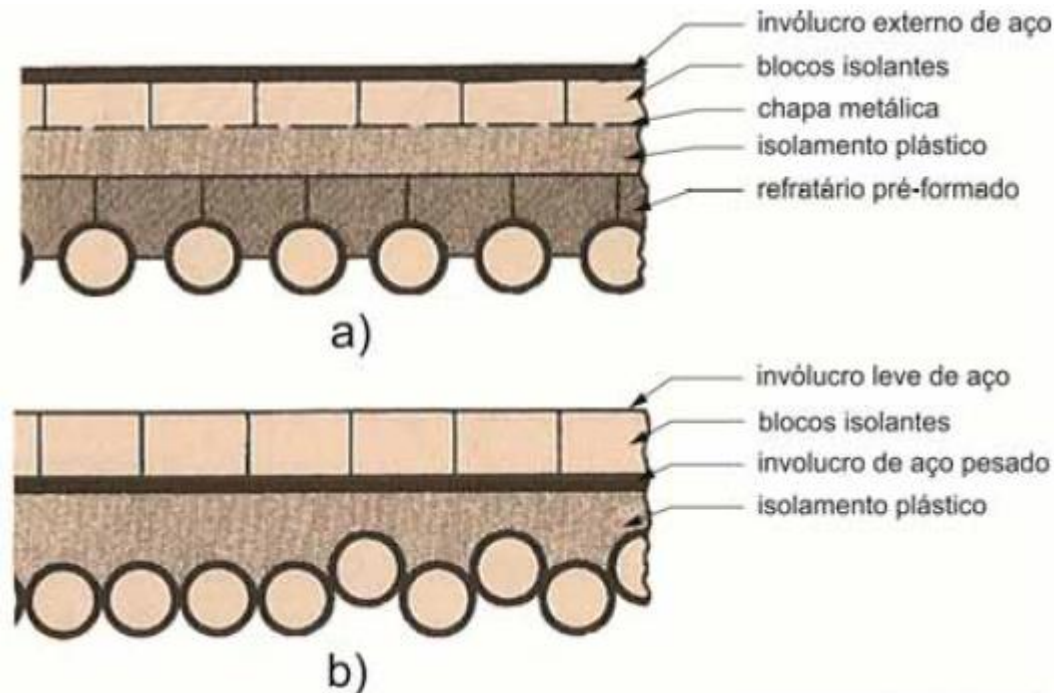
De acordo com Lora e Nascimento (2004), as fornalhas de queima em suspensão queimam combustíveis líquidos, gasosos ou sólidos pulverizados. Neste sentido é entendido que a queima de combustível líquido e gasoso é efetuada através de queimadores e os combustíveis sólidos como carvão mineral, são previamente preparados em moinhos, onde são realizados os processos de moagem e de secagem, a fim de obter a granulometria desejada para a queima. Posteriormente o combustível sólido é transportado pneumáticamente até a câmara de combustão utilizando o ar primário.

### **3.5.4 Paredes de Água**

Segundo Torreira (1995), as grandes caldeiras possuem fornalhas resfriadas por água (paredes de água) que podem absorver até 60 % do calor transmitido. As

paredes de água que absorvem o calor são tubos verticais que interligam o coletor superior com o inferior fazendo o revestimento da parte interna da fornalha. Várias formas construtivas de paredes de água são mostradas na FIG. 4. parte A.

Figura 4 - Tipos de paredes de água.



Fonte: Torreira, 1995.

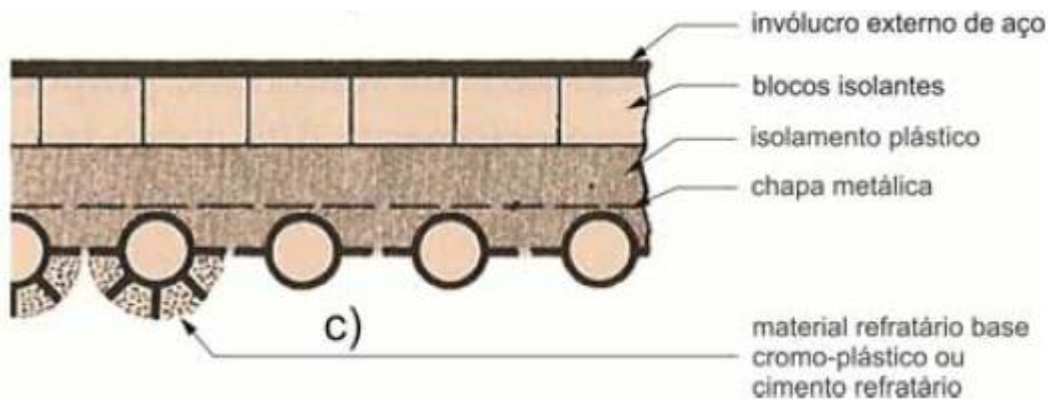
Dessa forma podemos observar na FIG. 4 parte A, o projeto de parede de água quando é exigido um moderado resfriamento. Observa-se que neste tipo de projeto os tubos encontram-se espaçados uns dos outros apoiado em um refratário com pré-formas dos tubos. O refratário encontra-se revestido por mais dois isolantes.

Na FIG. 4 parte B, observa-se os tubos dispostos tangencialmente, podendo em alguns casos serem dispostos alternadamente. Esta disposição permite obter uma superfície com elevada absorção de calor.

Já na FIG. 5, observam-se tubos aletados que em alguns projetos as aletas podem ser revestidas com material refratário base cromo ou cimento. Para se obter uma melhor vedação da fornalha, às vezes efetua-se a solda das aletas adjacentes.



Figura 5 – Tipos de paredes de água



Fonte: Torreira, 1995.

### 3.5.5 Superaquecedor

Sobre o superaquecedor, podemos dizer que é um trocador de calor que tem função de aquecer a temperatura do vapor saturado transformando-o em vapor superaquecido.

Segundo Bizzo (2003), o vapor gerado pela a caldeira, recebe a classificação de vapor saturado, onde, é extraído do tubulão superior e entra em um trocador de calor instalado dentro da própria caldeira. Os superaquecedores podem ser classificados como de convecção, ou seja, recebe calor somente por convecção térmica, ou de radiação, e neste caso, estão localizados dentro da própria câmara de combustão, ou na saída desta, de maneira que receba calor por radiação da chama ou da grelha.

O superaquecimento da temperatura varia de acordo com a carga da caldeira, já que a troca de calor não é seguida de mudança de fase como na vaporização. A troca de calor dentro do superaquecedor é função da velocidade do vapor dentro dos tubos e da velocidade dos gases na zona de convecção.

Superaquecedores de convecção aumentam a temperatura do vapor com o aumento da carga da caldeira, pois os coeficientes de troca de calor tendem a aumentar com as maiores velocidades dos gases e também do vapor dentro dos tubos. Já os superaquecedores por radiação tem a temperatura de saída diminuída com o aumento da carga da caldeira, e isso se deve a alta capacidade de absorção de calor das paredes da fornalha.

### **3.5.6 Economizador**

O economizador tem como função aumentar a temperatura da água de alimentação antes de entrar no tubulão. Para que seja obtido esse aumento de temperatura da água de alimentação, utiliza-se de um trocador de calor denominado o termo "economizador". Esse economizador utiliza-se da temperatura dos gases de exaustão para elevar a temperatura da água de alimentação. Esse artifício é utilizado para aumentar a eficiência térmica da caldeira, reduzir o custo de operação ou economizar combustível através da recuperação extra da energia dos gases de combustão (Bazzo, 1995).

### **3.5.7 Pré-aquecedor de Ar**

Sobre o pré-aquecedor pode ser entendido que ele tem como função elevar a temperatura do ar de combustão antes de injetá-lo na fornalha. Para o pré-aquecimento do mesmo, utiliza-se de um trocador de calor, tendo como fluido a temperatura mais alta os gases de exaustão e o fluido a temperatura mais baixa o ar de alimentação.

Segundo Bizzo (2003), os pré-aquecedores podem ser classificados em tubulares, regenerativos ou rotativos e de placa. Assim como os economizadores os pré-aquecedores diminuem a temperatura dos gases de exaustão, com isso tem-se um aumento na eficiência térmica da caldeira. Corroborando e exemplificando, Pera (1990) fala que a redução de cada 20° C na temperatura dos gases de exaustão significa um aumento do rendimento da caldeira da ordem de 1%.

Segundo Macedo (1983), no Brasil, as caldeiras de bagaço de cana começaram a apresentar pré-aquecedores de ar a partir do ano de 1973.

### **3.5.8 Ventiladores e Exaustores**

Os ventiladores são responsáveis pelo fornecimento de ar necessário para a combustão. Como a maioria das caldeiras possuem economizadores e pré-aquecedores, é necessário o uso de exaustores para auxiliar no processo de

retirada dos gases de exaustão devido à perda de carga que ocorre da passagem dos gases de exaustão pelo economizador e pré-aquecedor de ar.

### 3.6 Caldeira Aquatubular Monodrum

Segundo Peres (1982) na década de 30 à 40 as caldeiras fogotubulares eram substituídas nas usinas do Brasil por caldeiras aquatubulares, importadas principalmente da Inglaterra. O autor ainda ressalta que em 1957 foi instalada a primeira caldeira construída em nosso país, de grelhas basculantes com espargedores para bagaço, na Usina Santa Tereza, no estado de Pernambuco, fabricada pela Companhia Brasileira de Caldeiras, sistemas semelhantes começam a ser desenvolvidos pela Dedini e pela Zanini nos anos 67 em diante.

Para Arnão (2007, p.9)

Nos primórdios do Proálcool, em torno de 1975, as usinas de cana-de-açúcar eram muito pouco eficientes do ponto de vista energético. Naquela época as caldeiras produziam vapor saturado em pressões de 1 a 1,4MPa, e apresentavam um consumo de vapor bem acima da média atual 500 kg. de vapor/t. de cana moída. As usinas compravam quase toda a energia elétrica consumida no processo e ainda adquiriam grande quantidade de lenha para complementar o bagaço. Na primeira metade da década de 80, as usinas do estado de São Paulo já geravam mais de 60% da eletricidade que consumiam, e a compra da lenha estava limitada a pequenas quantidades, usadas na partida das caldeiras, no início da safra.

Para Leal<sup>2</sup> (2006 apud ARNÃO, 2007, p.10), a auto-suficiência energética das usinas foi atingida quando a condição do vapor chegou a 2,2MPa e 300°C. Estas caldeiras incluíam pré-aquecedor de ar e algum nível de automação. O autor ainda afirma que, a cogeração de energia apresentava também turbo geradores multiestágios. Neste sentido, nestas condições poucas usinas vendiam energia elétrica. O autor ainda corrobora, que esta situação de equilíbrio perdurou por quase 15 anos: as usinas geravam e consumiam em média, para cada tonelada de cana moída, 12 kWh de energia elétrica, 15 kWh de energia mecânica e 330 kWh de energia térmica (550 kg vapor/ t. de cana); o excedente de bagaço ficava entre 0 e 10% e era comercializado como combustível para outras indústrias, como a de suco de laranja. Neste período, caldeiras acima de 3MPa eram raras exceções

---

<sup>2</sup> Leal, M.R. **Cogeração na Expansão**, Opiniões; Out-dez, 2006.

De acordo com Payne (1989), o projeto de uma caldeira a bagaço usada principalmente para suprir energia à fábrica e vapor ao processo, seria ideal a produção de vapor a uma pressão nominal de 32 Kg/cm<sup>2</sup>. Neste sentido de acordo com o autor, sendo possível a venda de mais energia, seria justificável dobrar a pressão para 64 Kg/cm<sup>2</sup>, em virtude do acréscimo substancial para produção de uma caldeira de pressão acima de 32 Kg/cm<sup>2</sup>.

Segundo a CGEE (2007), com o crescimento na evolução de geração de energia, surgiu às caldeiras monodrum, sendo sua tecnologia novidade no setor sucroeenergético, mas já vem sendo empregada há vários anos. Essa tecnologia é amplamente divulgada na indústria petroquímica, e na geração de energia em termelétricas da Europa e nos Estados Unidos para altos níveis de pressão e capacidade. A CGEE (2007), também afirma que segundo os fabricantes, a tecnologia empregada na construção das caldeiras monodrum (um tubulão) possibilita a adoção de grandes vazões de vapor e pressão superiores a 100 bar, por consequência passou-se a substituir as caldeiras antigas, por caldeiras na faixa de 62 Kgf./cm<sup>2</sup>, permitindo maior geração de energia elétrica, utilizando nas mesmas a mesma quantidade de vapor.

Ainda segundo o CGEE (2007), a nova concepção abrange vários aspectos como a instalação do tubulão de vapor fora do circuito dos gases, e, portanto não exposto às elevadas temperatura dos gases na fornalha, não possui tubos mandrilhados, sem conexão direta com o feixe tubular, sendo a conexão efetuada através de coletores soldados ao tubulão, permitindo dessa forma uma redução de sua espessura, se tornando uma solução adaptável a elevadas capacidades, permitindo operação de partida e paradas mais rápidas quando comparadas com a caldeira de dois tubulão.

A caldeira do modelo AMD - Aquatubular Monodrum® - é a mais recente inovação da Caldema. Este tipo de caldeira foi desenvolvido principalmente para atender as necessidades das Centrais Termoelétricas gerando vapor em médias e altas pressões que queimam biomassa, podendo utilizar óleo e gás como combustíveis auxiliares.

As características construtivas das caldeiras AMD permitem partidas e paradas mais rápidas, pois não há tubos mandrilhados ao tubulão de vapor, o qual fica fora do circuito de gases, não havendo, portanto diferenciais de temperatura entre os tubos e o costado do tambor. A marca Caldema ainda afirma que, entre as

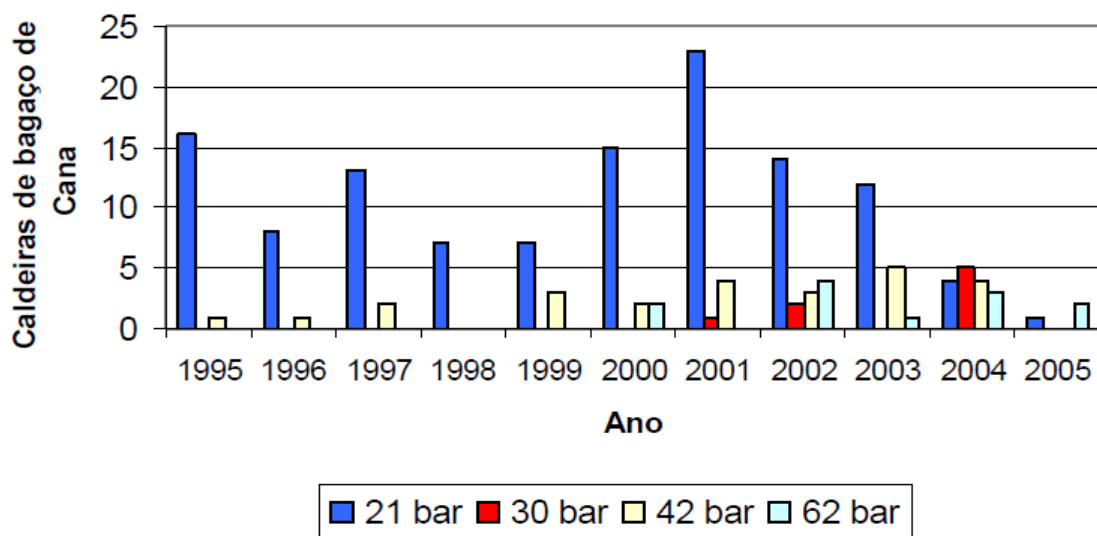
vantagens da Monodrum® estão a não possibilidade de vazamento/desmandrilamento, superaquecedor drenável, o que permite preservação via úmida assim como em caso de incrustação permite executar lavagem química ou ácida, fornalha de queima em suspensão, adequada para altas capacidades de geração com melhor qualidade de queima (CALDEMA, 2012).

Ainda de acordo com a Caldema (2012), a concorrência gerada elevou rapidamente o preço das tarifas de venda de excedente do patamar 10 – 12 US\$/MWh, para cerca de 30 US\$/MWh, viabilizando vários empreendimentos e visando a substituição de caldeiras e turbo geradores obsoletos por novas unidades operando a alta pressão.

Segundo Leal<sup>3</sup> (2006 apud ARNÃO 2007, p.12) estas modernizações foram facilitadas por empréstimos a juros adequados e ofertas e contratos de longo prazo de compra de energia, que serviam de garantias para os empréstimos.

Podemos observar no FIG. 6, a evolução de vendas das caldeiras de bagaço de cana, no setor sucroalcooleiro brasileiro, pela empresa Caldema. Note-se que nos últimos seis anos as vendas de caldeiras de 2,1 MPa e 300°C reduziram-se consideravelmente aparecendo, timidamente, a figura das caldeiras de maiores níveis de pressão e temperatura do vapor.

Figura 6 - Evolução das vendas de caldeiras de bagaço de cana pela empresa Caldema.



Fonte: Arnão, (2007).

<sup>3</sup> Leal, M.R. **Cogeração na Expansão**, Opiniões; Out-dez, 2006.

Consequentemente, surgiram as caldeiras de dois tubulões. Um dos progressos mais importantes no seu desenvolvimento foi à evolução das caldeiras de múltiplos passes no feixe convectivo (lado dos gases) para apenas um passe. O feixe convectivo de múltiplos passes garantiu altos coeficientes de troca térmica; mas o alto conteúdo de não queimados nos gases, nas velocidades de operação dos gases, produziu problemas de erosão nas tubulações.

Segundo Stark<sup>4</sup> (2006 apud ARNÃO, 2007, p.13) este fato restringiu sua aceitação para capacidades acima de 100 t/h e pressões acima de 4,2MPa, onde a perda de pressão no fluxo dos gases é mais significativa. O projeto das caldeiras de 2 tubulões de passe simples foi especificamente desenvolvido para superar os problemas de erosão que aconteciam nas caldeiras de múltiplos passes e para eliminar o refratário estrutural.

No final dos anos 90, as caldeiras de bagaço brasileiras, *bidrum* e de um passe nos gases, atingiram sua máxima expressão construtiva com as caldeiras suportadas inferiormente e superiormente algumas características destas são:

- O ar secundário, introduzido em altas temperaturas, melhorou as condições de combustão produzindo queima parcial em suspensão;
- A presença do economizador permitiu reduzir a temperatura dos gases que saem da caldeira, valores ao redor de 160°C foram atingidos;
- O uso de grelhas como a rotativa, “*Pin Hole*” e vibro-fluidizada tem permitido atender maiores vazões de combustível assim como volume de fornalhas maiores.

Kawano<sup>5</sup> (2006 apud ARNÃO, 2007, p.14) fala que, o problema limitante das caldeiras de 02 tubulões surge quando altos parâmetros de pressão e temperatura assim como vazão de vapor são requeridos. Em outros setores o uso de caldeiras de um tubulão é muito comum, no setor de papel e celulose, por exemplo.

A Empresa CBC Indústria Pesada Ltda, subsidiária da Empresa Mitsubishi no Brasil e principal fornecedor de caldeiras deste setor, produz somente caldeiras de 1 tubulão.

---

<sup>4</sup> Stark P., **General Manager, John Thompson Engineering, Division of Burns and Roe Worley:** Personal Communication, 2006.

<sup>5</sup> Kawano, L. **Comunicação Pessoal**, CBC Heavy Industry S.A. 2006.

Algumas características das caldeiras de 1 tubulão são as seguintes:

- Não há tubos mandrilhados no tubulão,
- Menor espessura do tubulão ,
- O tubulão encontra-se fora do circuito de gases,
- Não existe possibilidade de vazamento/desmandrilhamento,
- Menor diferencial de temperaturas externa/interna – costado do tubulão,
- Não existe possibilidade de deformação por falta de água,
- Partidas e paradas mais rápidas – maior vida útil quando há operação cíclica.

A FIG. 7 a seguir ilustra uma caldeira Aquatubular Monodrum instalada em uma usina sucroalcooleira no centro de Minas Gerais.

Figura 7 - Foto da Caldeira Aquatubular Monodrum



Fonte: CALDEMA, (2012)

### 3.7 BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Uma fábrica de açúcar e álcool é auto-suficiente em energia. Obtém a potência e calor necessário pela queima de seu próprio combustível, o bagaço. Uma fábrica projetada para ser eficiente em energia e operada adequadamente produzirá excesso de bagaço.

De acordo com Hugot (1977), o bagaço final, ou simplesmente bagaço, é matéria fibrosa sólida, liberada na saída da última moenda, após extração do caldo, dispõe-se aproximadamente de 275 Kg de bagaço por tonelada de cana. Ainda de

acordo com o autor, a composição física do bagaço varia muito pouco, sua propriedade mais importante, sob o ponto de vista da produção do vapor, é sua umidade. Ora um trabalho satisfatório da moenda fornece um bagaço com umidade de 50% e um trabalho muito bom um bagaço com 45% de umidade, mesmo com uma moenda muito moderna é difícil chegar a uma umidade menor que 44%. Os índices mais comuns são de 45% a 50% de umidade. Corroborando o autor ainda afirma que, além da água o bagaço contém fibra principalmente constituída por celulose, que forma a fibra do bagaço, podendo variar de 12% as 15% e materiais em solução na água, conseqüente da embebição, constituída de açúcares e impurezas, essas matérias dissolvidas corresponde a um volume pequeno em torno de 2% a 4%.

Hugot (1977), diz que a composição química do bagaço seco pode variar, mas como estas variações não apresentam grandes diferenças, podemos admitir as seguintes composições: Carbono 47%, Hidrogênio 6,5%, Oxigênio 44% e Cinzas 2,5%.

Hugot (1977, p. 935) diz que:

Com uma fibra normal (12% a 14%) e uma usina bem equilibrada e bem concebida, ainda fica um excedente de bagaço (ou de vapor) que pode ser utilizado para outros fins: bombeamento de água de refrigeração, fabricação de subprodutos, destilaria, fornecimento de energia à rede etc.

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 calorías 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:

- Poder calorífico superior (PCS), que corresponde ao calor liberado considerando que a água formada está sob a forma líquida a 0°C e;
- Poder calorífico inferior (PCI), que corresponde ao calor liberado considerando que a água formada está sob a forma de vapor a 0°C.

As duas formas de expressão do poder calorífico podem ser interconvertidas, pois a diferença entre elas é o calor de vaporização da água. Na FIG. 8 seguinte, tem-se o poder calorífico de alguns produtos.



Figura 8 - Poder calorífico superior de alguns produtos.

Produto	PCS – Kcal/ Kg
Lenha (20% de umidade)	2.500/3.000
Serragem	2.500
Cavacos	2.500
Nó de Pinho	4.000
Carvão de Pedra	7.500
Turfa (Japarepaguá)	2.500
Casca de semente de algodão	2.800
Casca de semente de amendoim	3.200
Bagaço da cana (40% umidade)	2.300
Resíduo de couro	2.000
Álcool etílico	7.200
Butano	11.800
Gasolina	11.000

Fonte: Borges e Lopes, 2009.

Segundo Hugot (1977), levando em conta o poder calorífico desses componentes e do teor de umidade do bagaço tem-se:  $PCS = 4.600 - 12s - 46w$  e  $PCI = 4.250 - 12s - 48,5w$ , onde poder calorífico superior e poder calorífico inferior respectivamente em Kcal/Kg. S = teor de sacarose no bagaço (pol) e w=teor de umidade em %. A FIG. 9 que vem a seguir mostra o PCI do bagaço com diferentes umidades e teor de sacarose.

Figura 9 - PCI do bagaço com diferentes umidades e teor de Sacarose

Umidade %	Pol (°S)	PCI (Kgcal/Kg)
49	1	1861
49	2	1850
49	3	1837
50	1	1813
50	2	1801
50	3	1789
51	1	1764
51	2	1752
51	3	1740

Fonte: Borges e Lopes, (2009)

De acordo com Payne<sup>6</sup> (1989 apud COMIN, 2010, p.13) em uma estimativa grosseira, a variação de 1% na umidade acarreta uma variação de 1% no valor como combustível.

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. Podem ser esperados problemas na queima quando a umidade sobe acima de 52%, como: a maior parte do bagaço não seca e não queima em suspensão e se acumula na grelha. Ainda segundo Payne (1989), no caso de grelha rotativa, isto não é tão problemático, mas, com grelha basculante, o bagaço acumula-se em pilhas e gases combustíveis podem ser gerados, os quais entram em ignição periodicamente, com explosão causando pressão positiva na fornalha. O bagaço com folhas verdes seca lentamente, mesmo se a umidade for satisfatória, e causará dificuldade na queima.

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.

Segundo Morais e Silva (2008), o poder calorífico superior em cada nível de umidade, nota-se considerável acréscimo com a diminuição da umidade. Passando a umidade de 50% para 0% consegue-se um incremento energético da ordem de 92%, sendo que 60% são conseguidos reduzindo a umidade para 20%. Então, pode-se dizer que o bagaço de cana de açúcar com umidade em torno de 20% é mais viável de ser utilizado para aproveitamento energético. A FIG.10 mostra uma comparação entre o poder calorífico superior x Umidade.

---

<sup>6</sup> PAYNE, J. H. **Operações Unitárias na Produção de Açúcar de Cana**. São Paulo: Nobel/ STAB, 1989.

Figura 10 - Comparativo do Poder Calorífico Superior do Bagaço de Cana de Açúcar x Umidade

Poder Calorífico Superior (PCS)	Umidade (%)
4.60	0
3.985	10
3.641	20
3.145	30
2.275	50

Fonte: Morais e Silva, 2008.

Payne (1989), também afirma que, o bagaço estocado seca e torna-se um combustível mais eficiente. Contudo, também perde rapidamente seu conteúdo de açúcar, o que significa uma perda de energia. Com uma boa extração na moenda, o teor de açúcar residual no bagaço é da ordem de 3% de energia total disponível.

Assim, em períodos curtos de estocagem (dois a três dias), os efeitos se contrabalançam. Um bagaço com alto teor de açúcar deveria ser queimado de imediato. Convém lembrar, a esse respeito, que com uma extração pobre o bagaço pode mostrar baixo teor de umidade, simplesmente devido à pol. elevada.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Empresa**

A pesquisa científica é, segundo Gil (2008, p.17) “o procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos”. Segundo Silva e Menezes (2001), a pesquisa quantitativa é considerada tudo que se possa definir em números, tendo como ferramenta de auxílio os métodos estatísticos, facilitando assim a análise dos dados coletados na pesquisa de campo ou boletins informativos.

Este 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.

### **4.2 Coleta de dados**

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.

### 4.3 Técnicas e Métodos

Para melhor interpretação dos dados conseguidos que são: “a umidade do bagaço, Pol (Porcentagem de massa na sacarose), temperatura da água de embebição, pressão hidráulica dos ternos da moenda”, foi feita a utilização de *softwares*, como *Microsoft Word* e *Excel* ambos na versão 2007 para realização 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.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Verificação do processo de extração do bagaço de cana-de-açúcar

### 5.2 Preparo

A cana-de-açúcar recebe um preparo 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.

### 5.3 Extração

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. 11 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 11 - Processo da água de embebição



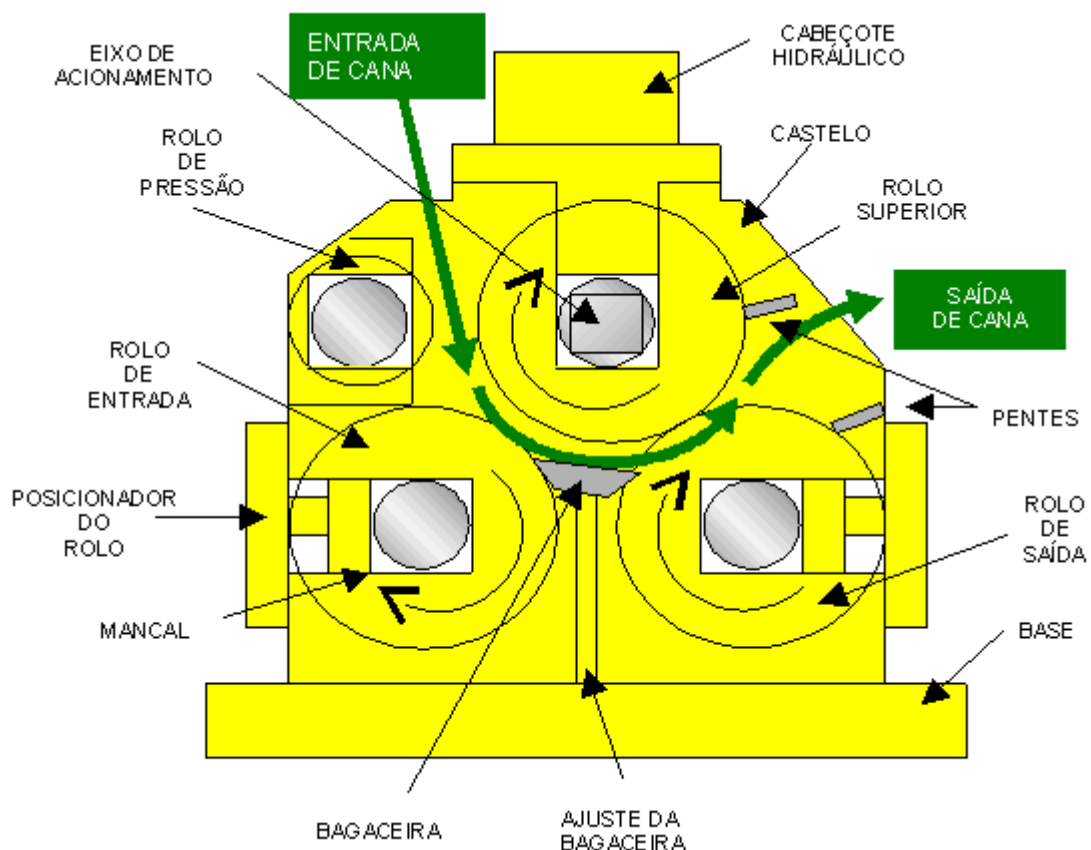
Processo de  
vazão da  
água de  
embebição

A água da embebição é resultante do processo da fabricação do açúcar, onde é depositado em um tanque e controlado sua temperatura, depois bombeado a uma pressão de 7 kgf/cm<sup>2</sup> 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 consegue um bom resultado de extração da umidade contida no bagaço, operação controlada via COI (centro de operação industrial).

A FIG.12 ilustra detalhadamente como é feita a distribuição dos rolos dentro de um terno da moenda, seu sentido de giro, entrada e saída de bagaço e onde é aplicada a pressão hidráulica.

Figura 12 - Terno de moenda usado para extração do bagaço



Fonte: Ribeiro, 2003.

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 á 3600 (PSI).

A FIG.13 ilustra a saída final do bagaço, 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.

Figura 13 - Processo Final de Extração do bagaço.



Bagaço  
final da  
cana-de-  
açúcar

Fonte: Empresa (2015)

#### 5.4 Análise do Bagaço Pelo Método do Digestor a Frio

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, bequer, 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 na empresa estuda é pelo método de estufa Spencer.

- Pesar 50 g do bagaço previamente homogeneizado no cesto da estufa Spencer;
- Ligar a estufa e deixar em funcionamento por 30 min. a 105°C;
- Desligar, remover o cesto e pesar;
- 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.

O que se perde de peso, multiplica por 2 onde indicará a porcentagem de umidade do bagaço. A TAB. 1 seguinte nos mostra os cálculos e os resultados:

Tabela 1 - Procedimento usado para a realização da análise de porcentagem da umidade do bagaço.

Massa	Gramas
Massa do cesto mais a amostra em gramas	300
Massa do cesto mais a amostra após a secagem	274.9
Diferença de Peso em gramas	25.1
Umidade % bagaço	$25.1 \times 2 = 50.2$

Fonte: Tabela elaborada pelo autor, 2015.

### 5.5 Coletas de dados da extração do bagaço da cana-de-açúcar

Os resultados das análises apresentada como: % Pol (Porcentagem de massa na sacarose), umidade do bagaço e fibra do bagaço, foram fornecidos pelo laboratório industrial da empresa.

No 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 na TAB.2 no período de 01/06/15 a 07/06/15.

Tabela 2 – Análise do bagaço de fibras de bagaço e umidade.

Dia	12-14 % fibra bagaço	% Pol do bagaço < 1,70	Umidade do bagaço < 52%	Água de embebição 50 à 60°C	Vazão de água 130m³/h
01/06/2015	16	1,75	52,8	55	130
02/06/2015	14,81	1,97	52,5	58	130
03/06/2015	14,44	2,04	53,04	53	130
04/06/2015	14,78	2,09	52,75	50	130
05/06/2015	14,36	2,08	53,4	49	130
06/06/2015	13,24	1,96	52,9	54	130
07/06/2015	14,92	2,04	53,38	57	130
Média	14,65	1,99	53,01	53,7	130

Fonte: Tabela elaborada pelo autor (2015)

Tabela 3 - Pressões Hidráulicas (psi)

Dia	1º Terno	2º Terno	3º Terno	4º Terno	5º Terno	6º Terno
01/06/2015	3132	2918	3845	3492	3231	2906
02/06/2015	3100	2937	3408	3230	3213	2893
03/06/2015	3100	3000	3324	3086	3178	2906
04/06/2015	3200	3100	3300	3044	2892	2892
05/06/2015	3060	3100	3600	3200	3066	2800
06/06/2015	2900	3000	3100	2830	3108	2900
07/06/2015	2990	3050	3200	3300	3000	3000
Média	3068	3015	3396	3168	3098	2899

Fonte: Tabela elaborada pelo autor (2015)

Conforme a TAB. 2 e 3, verificou-se que a média da primeira semana de junho, mostra que a umidade do bagaço está com 53,01%, a Pol resultou em 1,99 não atingindo a meta, a fibra do bagaço manteve dentro do esperado com 14,65%, a vazão de água conservou os 130m³/h e a temperatura da água permaneceu dentro do esperado com 53,7°C.

As pressões hidráulicas conseguiram-se manter na média de trabalho do 1º ao 5º terno (3000 a 3600 psi), mas já o 6º 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, foi o de não conseguir-se manter a pressão hidráulica no 6º terno. Isso ocasionou em uma perda expressiva no consumo de bagaço usado como combustível na caldeira, onde o

excedente é aproveitado para gerar energia, pois o bagaço com a umidade abaixo de 52% se consegue atingir uma boa eficiência térmica da caldeira.

Na TAB. 4, tem-se o monitoramento realizado da qualidade de extração do bagaço no período de 08/06/2015 a 14/06/2015.

Tabela 4 – Monitoramento dos dados da qualidade de extração bagaço.

Dia	12-14 % Fibra bagaço	% Pol do Bagaço < 1,70	Umidade do Bagaço < 52 %	Água embebição 50°-60°C	Vazão de água 130 m³/h
08/06/2015	12,95	1,93	52,88	56	130
09/06/2015	16,93	1,85	52,97	55	130
10/06/2015	12,77	2,09	53,48	54	140
11/06/2015	14,56	2,32	52,67	51	140
12/06/2015	14,58	2,06	53,26	50	140
13/06/2015	14,89	2,45	52,88	56	140
14/06/2015	15,94	2,18	53,84	55	140
Média	14,66	2,12	53,18	53,85	137,14

Fonte: Tabela elaborada pelo autor (2015)

Tabela 5 - Pressões Hidráulicas (psi)

Dia	1° Terno	2° Terno	3° Terno	4° Terno	5° Terno	6° Terno
08/06/2015	3212	3020	3650	3294	3096	3400
09/06/2015	3150	3140	3398	3302	3289	3270
10/06/2015	3100	2980	3280	3067	3096	3500
11/06/2015	3232	3150	3500	3443	3430	3220
12/06/2015	3160	3200	3458	3300	2950	3380
13/06/2015	3000	3030	3020	2900	3150	3090
14/06/2015	2910	3150	3000	3500	3200	3000
Média	3109	3095	3329	3258	3173	3265

Fonte: Tabela elaborada pelo autor (2015)

Na segunda semana de junho no período de 08/06/2015 a 14/06/2015, foi realizado uma nova coleta de dados conforme ilustra a TAB. 4 e 5, observou-se que a Pol teve uma alteração resultando a média em 2,12. Para buscar um melhor resultado na extração da Pol, foi alterado a vazão de água de embebição de 130m³ para 140m³/h a partir do dia 10 até o dia 14 e a média resultou em 137,14m³/h. Com isso a umidade do bagaço também teve um acréscimo referente a semana anterior, resultando em 53,18 % a média, as pressões hidráulicas do 1° ao 6° terno da moenda manteve-se dentro da média de trabalho (3000 a 3600 psi), a fibra

continuou dentro do esperado, com 14,66 %, a temperatura da água manteve-se dentro do estabelecido (53,85°C).

Na TAB. 6, tem-se o monitoramento realizado da qualidade de extração do bagaço no período de 15/06/2015 a 21/06/2015.

Tabela 6 – Monitoramento dos dados da qualidade de extração bagaço.

Dia	12-14 % Fibra bagaço	% Pol do Bagaço < 1,70	Umidade do Bagaço < 52 %	T ° C água embebição 50°- 60° C	Vazão de água 130m³/h
15/06/2015	15,0	1,98	54,23	54	140
16/06/2015	15,01	1,79	53,95	56	140
17/06/2015	14,89	2,41	54,64	51	140
18/06/2015	14,06	2,91	54,5	53	140
19/06/2015	13,73	2,8	53,94	50	140
20/06/2015	15,09	2,6	54,3	52	140
21/06/2015	16,09	2,42	53,73	55	140
Média	14,83	2,6	54,4	53	140

Fonte: Tabela elaborada pelo autor (2015)

Tabela 7 - Pressões Hidráulicas (psi)

Dia	1° Terno	2° Terno	3° Terno	4° Terno	5° Terno	6° Terno
15/06/2015	3250	3189	3547	3293	3300	0
16/06/2015	3220	3379	3400	3302	3280	0
17/06/2015	3300	3270	3340	3680	3400	0
18/06/2015	3400	3250	3490	3430	3298	0
19/06/2015	3250	3300	3500	3220	3100	0
20/06/2015	3190	3360	3600	3460	3350	0
21/06/2015	3290	3450	3398	3278	3267	0
Média	3271	3314	3467	3380	3285	0

Fonte: Tabela elaborada pelo autor (2015)

Na terceira semana de junho no período de 15/06/2015 a 21/06/2015, em uma nova coleta de dados do processo de extração, observou-se um novo cenário como ilustra a TAB. 6 e 7, a Pol aumentou seu valor para 2,6, a vazão de água resultou com 140m³/h, a fibra do bagaço manteve a media, com 14,83%, a temperatura da água conservou-se dentro do esperado com 53°C, as pressões hidráulicas manteve-se dentro do estabelecido (3000 a 3600 psi), o bagaço resultou-se com 54,4% de umidade, esses valores alterados foi referente a parada do 6° terno por problemas mecânico.

Na TAB. 8 e 9, tem-se o monitoramento realizado da qualidade de extração do bagaço no período de 22/06/2015 a 28/06/2015.

Tabela 8 – Monitoramento dos dados da qualidade de extração bagaço.

Dia	12-14 % Fibra bagaço	% Pol do Bagaço < 1,70	Umidade do Bagaço < 52 %	T ° C água embebição 55° - 60°C	Vazão de água 130m³/h
22/06/2015	13,24	2,08	53,5	50	135
23/06/2015	15,2	2,3	52,94	53	135
24/06/2015	12,79	2,15	53,07	56	135
25/06/2015	14,34	2,05	53,5	58	135
26/06/2015	14,78	2,16	52,9	60	135
27/06/2015	12,56	2,2	53,05	57	135
28/06/2015	15,14	2	53,58	55	135
Média	14	2,13	53,22	55,57	135

Fonte: Tabela elaborada pelo autor (2015)

Tabela 9 - Pressões Hidráulicas (psi)

Dia	1° Terno	2° Terno	3° Terno	4° Terno	5° Terno	6° Terno
22/06/2015	3300	3298	3600	3492	3564	0
23/06/2015	3390	3337	3500	3290	3598	0
24/06/2015	3250	3245	3470	3350	3600	0
25/06/2015	3400	3190	3421	3300	3470	0
26/06/2015	3190	3250	3550	3400	3612	0
27/06/2015	3240	3300	3430	3500	3550	0
28/06/2015	3200	3400	3400	3300	3500	0
Média	3281	3288	3481	3376	3556	0

Fonte: Tabela elaborada pelo autor (2015)

A TAB.8 e 9 ilustra mais uma amostragem da quarta semana do mês de junho, no período 22/06/15 a 28/06/2015 onde o 6° terno continua parado, foi realizado alterações para buscar um melhor resultado, foi estabilizado a vazão de água de embebição em 135m³/h, o setpoint de pressão do 5° terno com 3600 (psi), obteve-se os resultados da media de pressão do 5° terno em 3556 (psi), operando dentro do limite máximo para alcançar um melhor resultado dentro desta situação, a Pol resultou-se em 2,13, a fibra do bagaço esteve dentro da média com 14%, a temperatura da água de embebição continuou dentro do estabelecido (55,57°C), e umidade do bagaço com 53,22%.

No final da ultima semana de junho e inicio da primeira semana de julho no período de 29/06/15 a 05/07/15, foi realizado mais um acompanhamento em campo obtendo os resultados das análises feito pelo laboratório industrial, nesta ocasião todos ternos estava em operação, com o retorno do 6° terno após sua manutenção

concluída, obteve-se os resultados da extração do bagaço, onde a fibra da cana continuou mantendo sua média de 14,4%, a Pol resultou dentro da meta com 1,70, a temperatura e vazão da água de embebição manteve seus parâmetros que é de 130m³/h e 50° a 60° C respectivamente, a umidade do bagaço resultou com 52,99%, conforme ilustra a TAB. 10 e 11 abaixo.

Tabela 10 – Monitoramento dos dados da qualidade de extração bagaço.

Dia	12-14% Fibra bagaço	% Pol do Bagaço < 1,70	Umidade do Bagaço < 52 %	T °C água embebição 50° - 60°C	Vazão de água 130m³/h
29/06/2015	16,01	1,73	52,9	54	130
30/06/2015	14,32	1,75	53,9	59	130
01/07/2015	14,08	1,74	52,84	56	130
02/07/2015	14,14	1,79	53	53	130
03/07/2015	13,35	1,77	52,9	55	130
04/07/2015	14,63	1,70	52,65	56	130
05/07/2015	14,29	1,68	52,8	52	130
Média	14,4	1,70	52,99	55	130

Fonte: Tabela elaborada pelo autor, (2015)

Tabela 11 - Pressões Hidráulicas (psi)

Dia	1° Terno	2° Terno	3° Terno	4° Terno	5° Terno	6° Terno
29/06/2015	3232	3198	3445	3390	3000	3380
30/06/2015	3200	3297	3400	3200	3289	3326
01/07/2015	3100	3150	3300	3189	3290	3400
02/07/2015	3300	3200	3200	3400	3200	3287
03/07/2015	3160	3300	3500	3300	3100	3400
04/07/2015	3000	3350	3340	2990	3000	3410
05/07/2015	2990	3400	3290	3180	3200	3390
Média	3140	3270	3353	3235	3154	3370

Fonte: Tabela elaborada pelo autor, (2015)

Com o retorno do 6° terno melhorou-se bem o processo, mas mesmo assim a umidade do bagaço não esteve dentro do estabelecido. Observou-se que o valor da pressão hidráulica do 6° terno interfere na umidade do bagaço, quando a pressão aumenta a umidade abaixa.

Na TAB. 12 e 13, tem-se o monitoramento realizado da qualidade de extração do bagaço no período de 06/07/2015 a 12/07/2015.

Tabela 12 - Monitoramento dos dados da qualidade de extração bagaço

Dia	% Fibra bagaço	% Pol do Bagaço < 1,70	Umidade do Bagaço < 50 %	T ° C água embebição	Vazão de água m³/h
06/07/2015	14,15	1,56	53,09	53	130
07/07/2015	13,56	1,78	52,28	56	130
08/07/2015	14,87	1,66	53,06	51	130
09/07/2015	14,43	1,49	52,35	49	130
10/07/2015	12,97	1,5	53,03	55	130
11/07/2015	15	1,61	52,65	56	130
12/07/2015	13,04	1,8	53,01	55	130
Média	14	1,62	52,78	53,57	130

Fonte: Tabela elaborada pelo autor (2015)

Tabela 13 - Pressões Hidráulicas (psi)

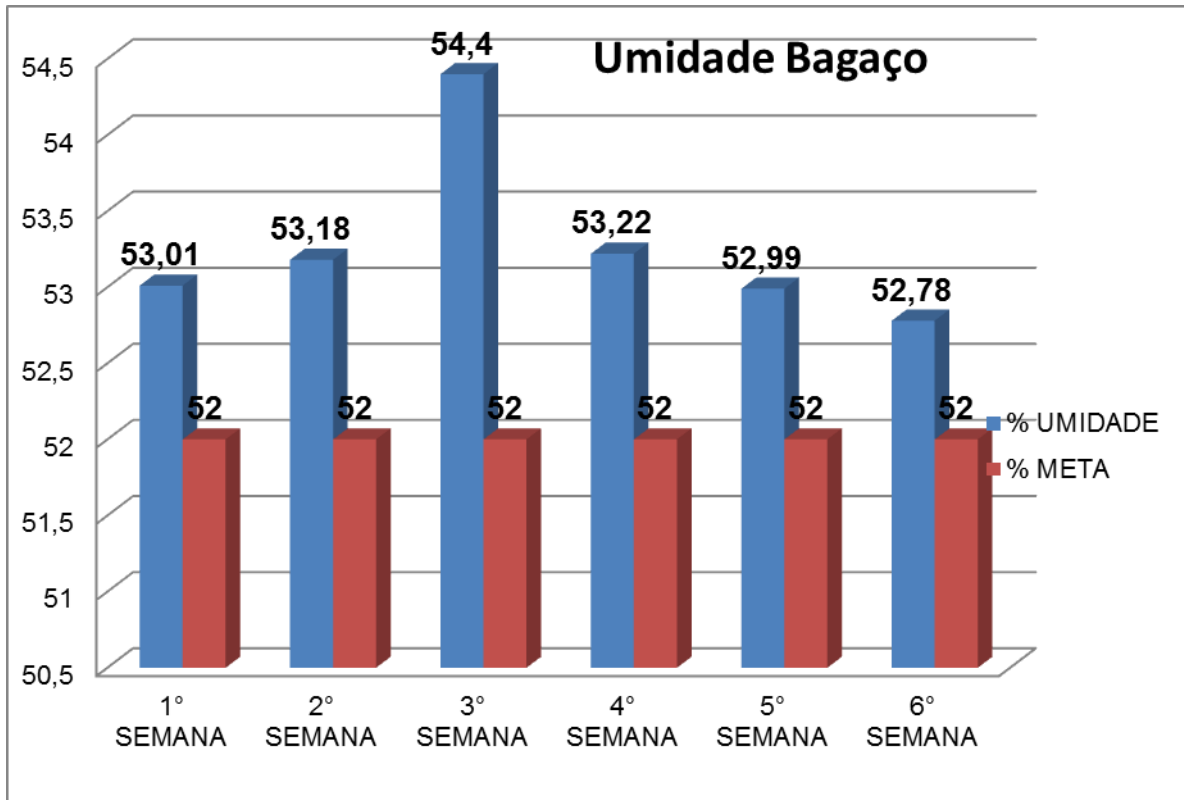
Dia	1° Terno	2° Terno	3° Terno	4° Terno	5° Terno	6° Terno
06/07/2015	3200	3291	3500	3300	3296	3390
07/07/2015	3100	3297	3408	3390	3480	3450
08/07/2015	3150	3300	3245	3150	3280	3287
09/07/2015	3290	3200	3380	3200	3100	3430
10/07/2015	3300	3450	3467	3210	3200	3280
11/07/2015	3100	3290	3260	2990	3190	3410
12/07/2015	3100	3189	3389	3200	3068	3100
Média	3177	3288	3378	3205	3230	3335

Fonte: Tabela elaborada pelo autor (2015)

Através da TAB.12 e 13, verificou-se que no período 06/07/15 a 12/07/15 o processo de extração estava em operação normal, foi alcançado a meta de extração da Pol que resultou em 1,62, a fibra da cana manteve-se com 14%, a temperatura e vazão da água de embebição manteve seus parâmetros, que é de 130m³/h e 50°C a 60°C respectivamente, as pressões hidráulicas dos ternos se manteve conforme o *setpoint* de pressão de cada terno (3000 a 3600 psi), a umidade não atingiu a meta terminando com 52,78%. Com isso observou-se que a perda de eficiência da caldeira esteve abaixo nas seis semanas de amostra, nota-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 demonstra os resultados das umidades no mês de junho e duas semanas do mês de julho 2015.

Gráfico 1 – Umidades no mês de junho e julho de 2015.



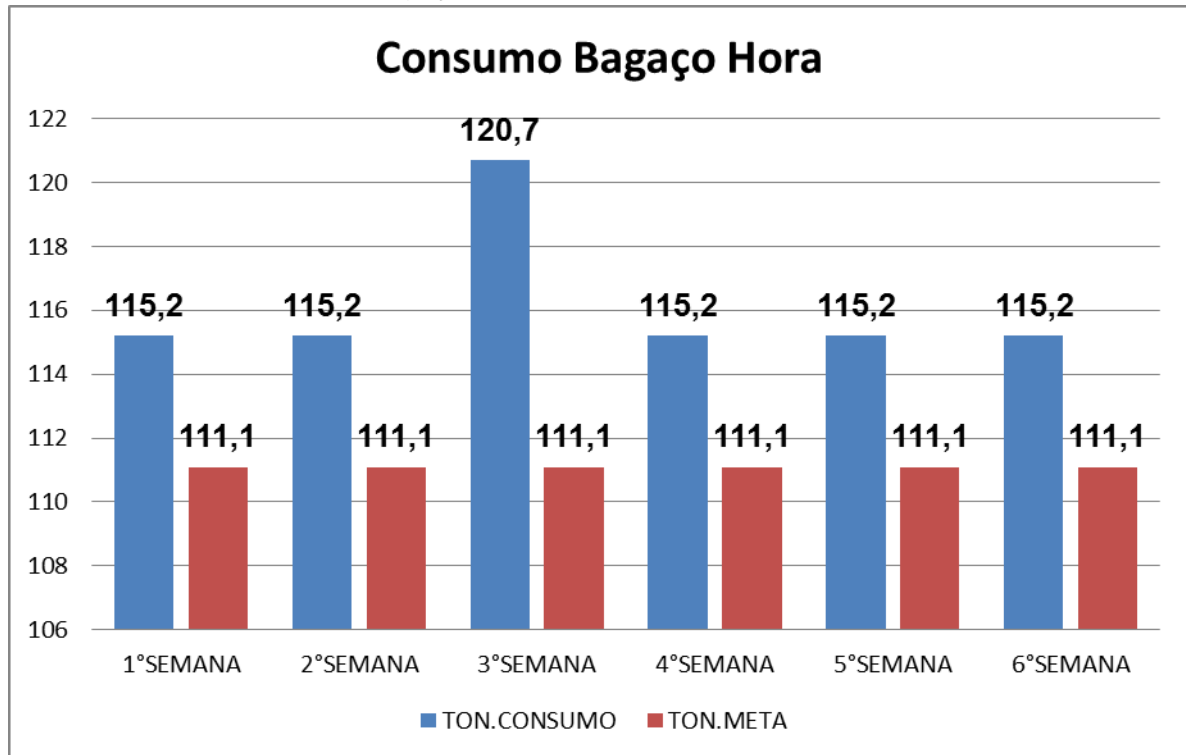
Fonte: Gráfico elaborado pelo próprio autor, 2015.

Analisando o GRAF. 1, observou-se que a umidade do bagaço manteve acima da meta estabelecida pela empresa, na primeira semana de junho resultou-se com 53,01%, na segunda semana manteve as mesmas condições operacionais e resultou em 53,18%, na terceira semana de junho ocorreu um problema mecânico com o 6º terno elevando a umidade para 54,4%, foi realizado regulagens na vazão de água de embebição para 135m<sup>3</sup>, *set point* de pressão do 5º terno para 3600 (psi), conseguindo um melhor resultado na quarta semana de junho no período de 22/06/15 a 28/06/15, com isso a média da semana resultou-se em 53,22%. Na primeira semana de julho no período de 29/06/15 a 05/07/15 o processo manteve-se estável encerrando a média da umidade em 52,99%, na segunda semana de julho no período 06/07/15 a 12/07/15 a umidade terminou com 52,78%, melhor resultado obtido nas seis semanas de coleta dos dados. Neste período manteve-se os mesmos ajustes da pressão hidráulica dos ternos da moenda e vazão de água, observou-se que para ajustar o *set point* de pressão do 6º terno, depende do resultado da análise do bagaço, procedimento adotado pela empresa que quando a umidade altera-se o seu valor, então eleva-se o *set point* de pressão.



O GRAF. 2 ilustra o consumo de bagaço em tonelada por hora, devido o aumento da umidade, prejudicou-se a eficiência da caldeira, que para manter a mesma vazão de vapor elevou-se o consumo de combustível em 4,1 toneladas por hora (primeira, segunda, quarta, quinta semana), e 9,6 tonelada de bagaço na terceira semana, não atingindo a meta de 111,1 toneladas de bagaço hora.

Gráfico 2 – Consumo de bagaço em toneladas por hora.



Fonte: Gráfico elaborado pelo próprio autor, 2015.

A TAB.14, segundo Pera (1990) revela alguns valores analíticos do bagaço como poder calorífico, relação Kg/bagaço, relação vapor/bagaço, acréscimo em porcentagem de consumo de bagaço referente à umidade, com base nestes dados se fez este estudo da perda na eficiência da caldeira, consumindo mais e gerando menos energia.

Tabela 14 - Valores analíticos do bagaço.

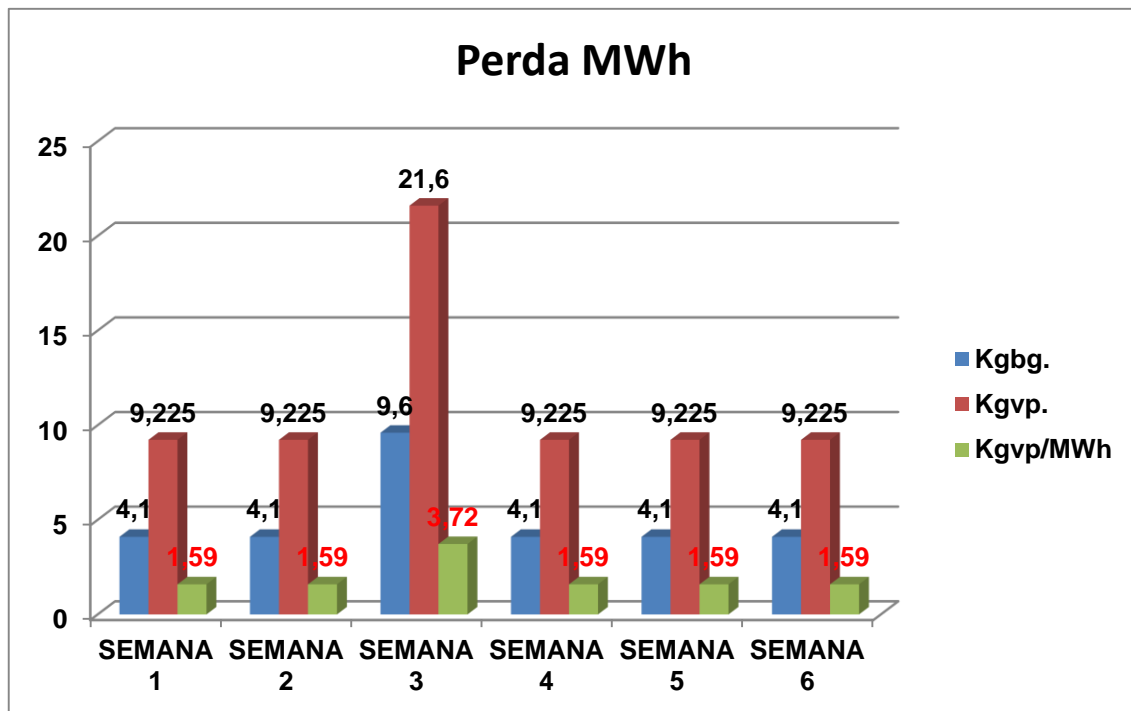
Umidade Bagaço	PCS(BU) Kcal/Kg	Rendimento Ao PCS bu	Kgv/Kgb	Varição Umidade Bagaço %	Acréscimo Consumo Bagaço %
49	2282	68,19	2,48	0	0,0
51	2192	67,02	2,34	2	6,0
52	2167	66,38	2,25	3	9,1
53	2103	65,75	2,17	4	12,2
55	2013	64,37	2,07	6	19,8
57	1924	62,86	1,93	8	28,5

Fonte: Pera (1990)

Na primeira e segunda semana no período de 01/06/15 a 14/06/15, 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, na terceira semana no período 15/06/15 a 21/06/15 com a umidade do bagaço em 54,4% o aumento foi 9600 Kg de bagaço por hora, o equivalente á 21600 Kg de vapor produzido, na quarta, quinta e sexta semana no período de 22/06/15 a 12/07/15 a umidade do bagaço resultou entre 53,22% e 52,76%, houve um acréscimo de 4,100 Kg de bagaço por hora em cada semana, o equivalente á 9,225 Kg de vapor gerado.

O GRAF.3 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 – Quantidade de vapor gerado convertido em MWh não produzido.



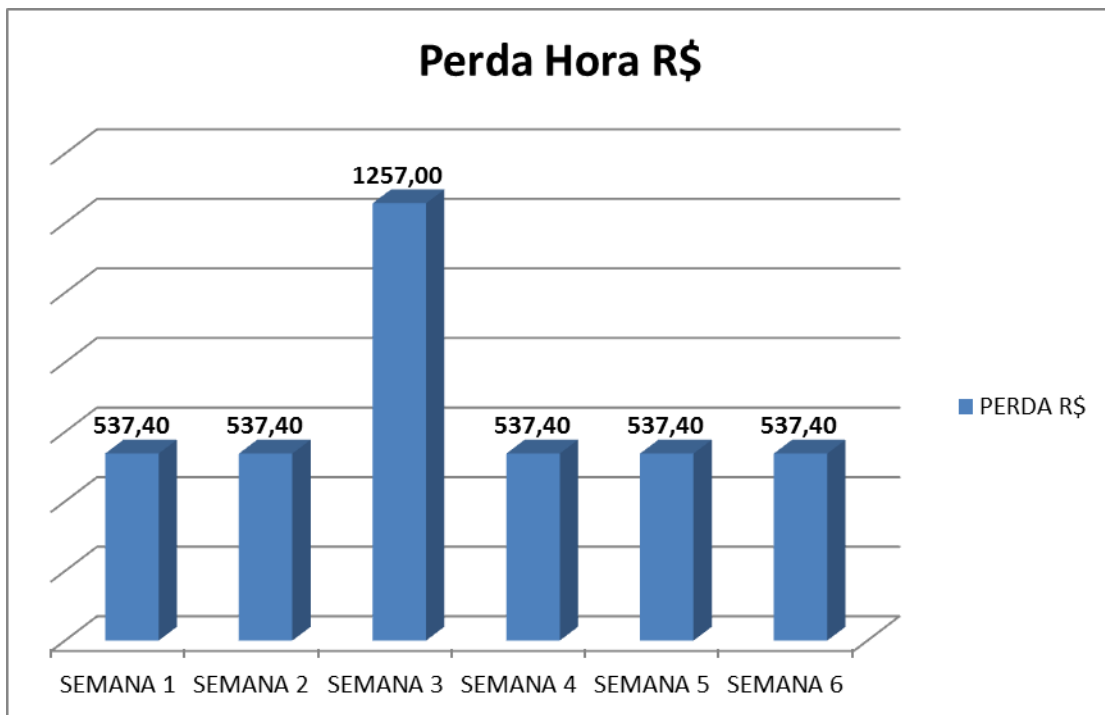
Fonte: Gráfico elaborado pelo próprio autor, 2015.

De acordo com os dados fornecidos pela a empresa, são necessários 5800 Kg vapor por hora para produzir um MWh. Na primeira, segunda, quarta, quinta e sexta semana como ilustra o GRAF. 3, houve um acréscimo de combustível de 4.100 kg de bagaço, o que é equivalente a 9.225 Kg de vapor, que transformando 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, onde, é equivalente a 21,600 Kg de vapor que convertido em MWh, corresponde a 3,72 MWh não produzido.

O GRAF. 4 revela a perda de MWh convertido em R\$, onde pela perda da eficiência da caldeira devido a umidade do bagaço, houve-se um acréscimo do mesmo para manter a mesma vazão de vapor necessária para o processo.

Gráfico 4 – Perdas de MWh convertidos em reais.



Fonte: Gráfico elaborado pelo próprio autor, 2015.

O mercado de geração de energia elétrica em valores é determinado pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), mas também pode ser definido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), este ano o MWh foi vendido pelo preço fixo de R\$ 338,00, dados fornecidos pela empresa. Na primeira e segunda semana no período 01/06/15 a 14/06/15, a perda na geração de energia elétrica referente ao acréscimo da queima de combustível na caldeira, devido á umidade do bagaço foi de R\$ 537,40 por hora em cada semana, na terceira semana no período de 15/06/15 a 21/06/15 a perda por hora na geração de energia elétrica foi de R\$ 1257,00, na quarta, quinta e sexta semana no período de 22/06/15 a 12/07/15 a perda na geração de energia elétrica resultou-se em R\$ 537,40 por hora em cada semana.

## 5.6 Método de trabalho para que a umidade do bagaço fique dentro dos parâmetros ideais

No estudo de campo realizado feito, foi coletados os dados para análise das causas que ocorreu em perdas, observou-se que em duas semanas teve um problema de manutenção do 6° terno da moenda, ocasionando um desajuste nas regulagens. Nas demais semanas notou-se que a causa das perdas refere-se as regulagens operacionais, que depende do resultado da umidade do bagaço fornecido uma vez por turno pelo laboratório industrial, pois o quadro de funcionários é enxuto não possibilitando, intensificar ou aumentar em mais vezes a análise da umidade do bagaço.

Proposta para que se consiga melhorar e regular a pressão hidráulica dos ternos da moenda com mais frequência, ter uma boa extração do bagaço reduzindo a umidade e cumprindo a meta estabelecida pela empresa, aumentar o efetivo das análises no mínimo quatro vezes por turno, para isto é necessário um analista específico para esta finalidade, coletar, analisar, acompanhar as regulagens e resultados. A TAB.15 mostra a folha de pagamento de um analista júnior.

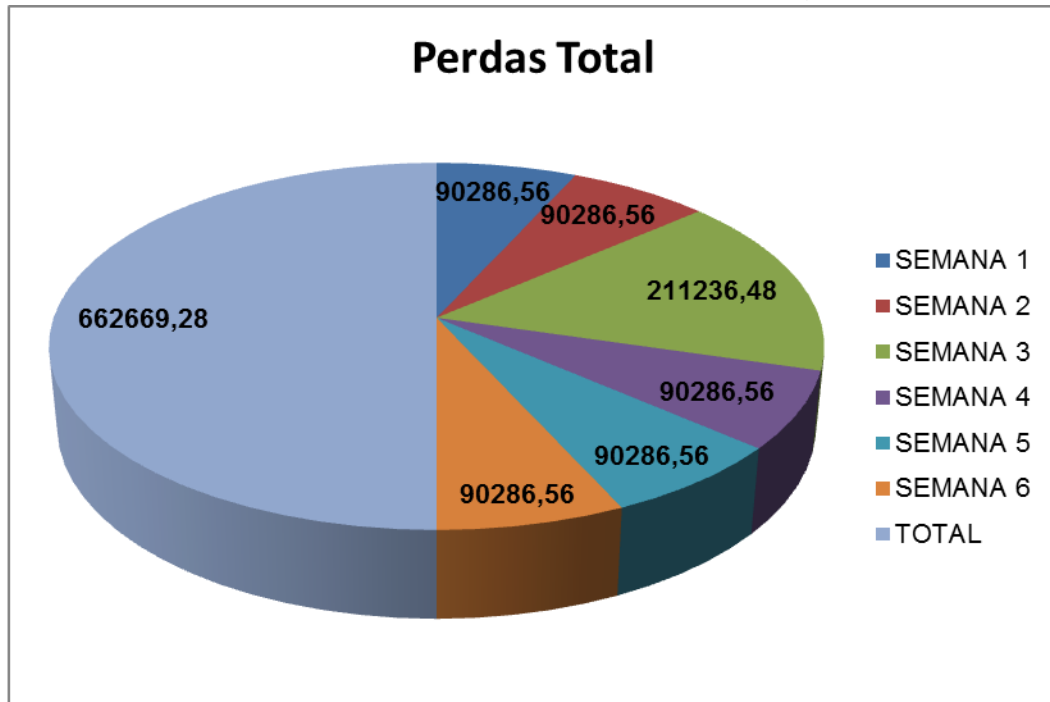
Tabela 15 – Folha de pagamento para um analista júnior.

Cargo	Valores
Analista Júnior	1
Média Salarial (R\$/mês)	1.500,00
Total salarial por safra (R\$)	12.000,00
Encargos salarial mensal (R\$)	1.200,00
Encargos total salarial por safra (R\$)	9.600,00
Total salário e encargos por safra (R\$)	21.600,00

Fonte: Tabela elaborada pelo próprio autor, 2015.

Na TAB. 15 observou-se que o valor de investimento de mais um analista é bem inferior ao valor das perdas ocorridas nas seis semanas de amostragem que resultou-se em um total conforme ilustra o GRAF. 5 abaixo.

Gráfico 5 – Perdas ocorridas nas seis semanas de amostragem.



Fonte: Gráfico elaborado pelo próprio autor, 2015.

No GRAF.5 ilustra que na primeira e segunda semana no período 01/06/15 a 14/06/15, o valor total da perda pela eficiência da caldeira devido à umidade do bagaço, foi de R\$ 90.286,56 em cada semana, na terceira semana no período 15/06/15 a 21/06/15, com o aumento da umidade do bagaço o valor total da perda resultou-se R\$ 211.236,48, na quarta, quinta e sexta semana no período de 22/06/15 a 12/07/15 a perda total em cada semana resultou-se em R\$ 90.286,56, totalizando nas seis semanas um valor total de R\$ 662.669,28.

## **6 CONCLUSÃO**

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

- ALVES, C. S. **Sistemas Térmicos: Geradores de Água Quente**. Maringá. 2002. Disponível em: <[http://geocities.yahoo.com.br/sistemas\\_termicos/agua\\_quente.pdf](http://geocities.yahoo.com.br/sistemas_termicos/agua_quente.pdf)>. Acesso em: 11 jun. 2015.
- ARNAO, S. J. H. **Caldeiras aquatubulares de bagaço** : estudo do sistema de recuperação e energia. 2007. 233 p. Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.
- BAZZO, E. **Geração de vapor**. Florianópolis: UFSC. 2 ed. 1995.
- BIZZO, W. A. **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Campinas: FEM/Unicamp, 2003.
- BORGES, M. T. M. R; LOPES, C. H. **Introdução a Tecnologia Agroindustrial**. São Carlos: Eduscar, 2009.
- BRASIL, **Ministério do Trabalho**. Norma Regulamentadora NR-13. Manual de Legislação Atlas. 63 ed. São Paulo: Atlas S.A., 2009.
- CALDEMA. Caldema AMD, 2012. Disponível em: <[http://caldema.com.br/Caldeiras\\_modelo\\_AMD\\_1024.html](http://caldema.com.br/Caldeiras_modelo_AMD_1024.html)>. Acesso em: 13 jun. 2015.
- CENTRO DE GESTÃO E ESTUDO ESTRATÉGICO. **Estudo sobre as possibilidades e impactos da Produção de Grandes Quantidades de Etanol Visando a Substituição Parcial da Gasolina no Mundo**. Brasília: CGEE, 2007.
- CHD VÁLVULAS. **Artigos Técnicos**: Caldeiras Flamotubulares, Caldeiras Aquatubulares, Tipos de Caldeiras e a Utilização do Vapor. Disponível em: <[http://www.chdvalvulas.com.br/artigos\\_tecnicos/index.html](http://www.chdvalvulas.com.br/artigos_tecnicos/index.html)>. Acesso em: 15 jun. 2015.
- COMIN, M. R. **Geração de energia elétrica a partir do bagaço da cana de açúcar**. 2010. 48p. Pós-Graduação em Gestão de Tecnologia Industrial Sucoenergética do Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Sócioeconomia Rural do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos – Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2010.
- FAO. **Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura**, 2008. Acesso em: 15 jun.2015.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2008.
- HUGOT, E. **Manual da engenharia açucareira**. Volume I. São Paulo: Mestre Jou, 1977.

IBGE. **Evolução da produção brasileira de cana, açúcar e etanol, 2008.**

Disponível em: <<http://www.novacana.com/cana/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo/>>. Acesso em: 19 jun. 2015.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. **Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação.** vol. 1. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

MACEDO, I. **I Seminário de Tecnología Industrial, Centro de Tecnología Copersucar.** Piracicaba, São Paulo, p. 483, 1983.

MACHADO, F. B. P. **Açúcar, a doce terra-História do setor.** 2003. Disponível em: <[http://ag20.cnptia.embrapa.br/Repositorio/historia\\_da\\_cana\\_000fhc62u4b02wyiv80efhb2attuk4ec.pdf](http://ag20.cnptia.embrapa.br/Repositorio/historia_da_cana_000fhc62u4b02wyiv80efhb2attuk4ec.pdf)>. Acesso em: 15 jun. 2015.

MIRANDA, L. L. D.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, G. A. **Cana-de-açúcar.** Campinas: Instituto Agrônômico, 2008.

MARTINELLI Jr., L. C. **Máquinas Térmicas I: Noções sobre Geradores de Vapor.** 8 ed. 1998. Disponível em: <<http://www.unijui.tche.br/~martinelli/mt1.htm> > Acesso em: 12 jun. 2015.

MORAIS, A. S; SILVA, M. B. **Avaliação Energética do Bagaço de Cana em Diferentes Níveis de Umidade e Graus de Compactação.** Rio de Janeiro: ENEGEP 2008.

NOVA CANA. **Crise Sucroenergética: O tempo fechou de vez.** 14 maio, 2014. Disponível em: <<http://www.novacana.com/n/etanol/mercado/regulacao/crise-sucroenergetica-tempo-fechou-vez-140514>> .Acesso em: 20 mai. 2014.

NOVA CANA. **A produção de cana-de-açúcar no Brasil (e no mundo). 10 Jan, 2013. Disponível em:** <<http://www.novacana.com/cana/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo/>>. Acesso em: 10 jun. 2015.

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

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

PERES, N. P. **Eficiência em Caldeira na Agroindústria Canavieira.** Piracicaba: STAB, 1982.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação.** 3. ed. rev. e atual. Florianópolis: Laboratório de Ensino à Distância da UFSC, 2001.



SILVA, K. S.; FARIA. J. A. S. **Avaliação da qualidade de caldo de cana envasado a quente e por sistema asséptico**. Campinas, 2006. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010120612006000400007&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010120612006000400007&script=sci_arttext)> Acesso em 20/10/2011.

TORREIRA, R. P. **Geradores de vapor**. São Paulo: Companhia Melhoramentos, 1995.