

## **AVALIAÇÃO DE AQUECEDORES DO TIPO CASCO E TUBOS UTILIZADOS NO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE CALDO DE CANA CALEADO**

### ***EVALUATION OF THE HEATERS OF THE TYPE HULL AND TUBES USED IN HEATING SYSTEM OF SUGAR CANE***

Miranes Machado Santos<sup>1</sup>  
Drielle Jerônima de Paula dos Santos<sup>2</sup>  
Inácio Ramos Leite<sup>3</sup>

#### **RESUMO**

O aquecimento é uma das principais etapas do tratamento de caldo, pois contribui com a remoção de impurezas. Contudo, trata-se de uma operação que demanda grande quantidade de energia térmica, e quando mal conduzida, pode diminuir a eficiência energética da planta. Nesse âmbito, este trabalho teve como objetivo, avaliar os aquecedores de caldo caleado de uma usina sucroenergética, considerando as características dos equipamentos e as condições de operação pretendidas pela empresa. Os resultados mostraram que os equipamentos estão bem dimensionados quanto à área de troca térmica e velocidade de escoamento, mas que as temperaturas pretendidas em cada estágio e a distribuição de vapor não permitem que todo o potencial dos aquecedores utilizados seja explorado.

Palavras-chave: aquecedores; tratamento de caldo; eficiência energética.

#### **ABSTRACT**

*The heating is one of the main stages of the broth treatment, because it contributes to the removal of impurities. However, it is an operation that demands a large amount of thermal energy, and when poorly conducted, can decrease the energy efficiency of the plant. In this context, this work had as objective, to evaluate the heaters of*

---

<sup>1</sup> Graduação no Centro Universitário UNIFAFIBE, Bebedouro SP. E-mail: miranes\_santos@hotmail.com

<sup>2</sup> Graduação no Centro Universitário UNIFAFIBE, Bebedouro SP. E-mail: drielle.de.paula@hotmail.com

<sup>3</sup> Docente no Centro Universitário UNIFAFIBE, Bebedouro SP. E-mail: inacioramosleite@yahoo.com.br

*heaters of calyx broth of a sugarcane plant, considering the characteristics of the equipment and the operating conditions intended by the company. The results showed that the equipment is well dimensioned as regards the area of thermal exchange and flow velocity, but that the desired temperatures at each stage and the vapor distribution don't allow the full potential of the heaters to be exploited.*

*Keywords: heaters; broth treatment; energy efficiency.*

## **1. INTRODUÇÃO**

As indústrias sempre visam o máximo aproveitamento de seus processos produtivos, nos quais ocorre constante integração entre matéria-prima, insumos, equipamentos, mão de obra, meio ambiente e instalações globais combinados ao monitoramento contínuo das etapas. Mas, segundo Giordano (2004), além da aplicação do método de controle, é imprescindível o constante empenho para conquista da eficiência industrial.

Em especial no segmento sucroenergético, um dos mais importantes do agronegócio, é comumente desenvolvida análises em torno do desempenho das operações e das perdas derivadas ou não de fatores naturais do processo, pretendendo-se melhorar o seu rendimento. De acordo com Silva (2007), nesse ramo a oportunidade de ampliação de lucratividade através do acréscimo nas receitas é limitada pelo mercado.

As usinas brasileiras demandam um elevado consumo de energia térmica, mecânica e elétrica em seus processos produtivos, e o suprimento dessa exigência energética é realizado através da utilização do seu principal subproduto, o bagaço da cana-de-açúcar (CORRÊA NETO; RAMON, 2002).

De acordo com Higa e Luiz (2010), esse combustível de grande valor é o responsável pela produção do vapor nas caldeiras, o qual posteriormente é transformado na forma de energia necessária para o funcionamento dos equipamentos e instalações da planta. Em comparação com outros ramos produtivos, o setor sucroalcooleiro apresenta o grande diferencial de ser capaz de atender praticamente todas suas necessidades energéticas (CORRÊA NETO; RAMON, 2002).

Nas etapas de fabricação do açúcar, a energia térmica representa a maior taxa de consumo dos equipamentos, por esse motivo sua economia é de suma importância, visto que proporcionará a utilização do excedente da biomassa para outros fins, como a comercialização de energia elétrica. Os processos de aquecimento e concentração do caldo simbolizam as fases que requerem maiores índices de vapor para operação (HIGA; LUIZ, 2010).

No aquecimento do caldo é utilizado o equipamento denominado trocador de calor e/ou aquecedor, o qual pode ser do tipo casco e tubos (vertical ou horizontal) ou a placas. Segundo Castro e Andrade (2007), o procedimento realizado consiste em elevar a temperatura do caldo entre 105 °C e 110 °C para eliminar microrganismos, favorecer a floculação, complementar reações químicas e diminuir sua viscosidade.

Nos aquecedores do tipo casco e tubos, o vapor oriundo do escape das turbinas ou da extração (sangria) de vapor vegetal dos evaporadores de múltiplo-efeito, é utilizado como fluido de aquecimento. O mesmo fornece calor latente para o caldo promovendo seu aquecimento (SILVA, 2007).

Em indústrias com grande número de operações unitárias envolvidas, ter o dimensionamento apropriado do equipamento inerente ao processo é fundamental, pois segundo Santos (2011), proporciona redução de custos e maior disponibilidade para atender as exigências do processo.

No caso do aquecedor de caldo, compreender as propriedades físicas do fluido é muito importante para se realizar uma análise técnica do desempenho do aparelho. De acordo com Ribeiro et al. (2002), essa informação é de grande relevância para o dimensionamento de equipamento que abrange transferência de calor.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar o sistema de aquecimento de caldo caledado desejado na etapa de tratamento do mesmo, de uma usina situada no interior do Estado de São Paulo, levando em consideração os fatores essenciais como taxa de transferência de calor, área de troca térmica, velocidade de escoamento e consumo de vapor vegetal.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. Eficiência industrial e produção de vapor

Dentre os produtos agrícolas designados a indústria, ressalta-se a tradição, importância econômica, função energética e extensão geográfica da cana-de-açúcar no Brasil, responsável pela formação do setor sucroalcooleiro (VIEIRA, 1999). De acordo com Vian (2003), a partir de então as usinas têm adotado diferentes estratégias de produção do açúcar e manipulação do álcool, ampliando a eficiência dos recursos produtivos e utilizando os subprodutos para expansão de sua capacidade produtiva.

Logo, a eficiência operacional está relacionada à maximização e domínio dos processos associados à capacidade da organização em minimizar os recursos necessários para a produção, de forma que seja possível entender a ligação existente entre oferta e demanda de energia para cada etapa de processamento dos produtos (CAMPOS, 1999).

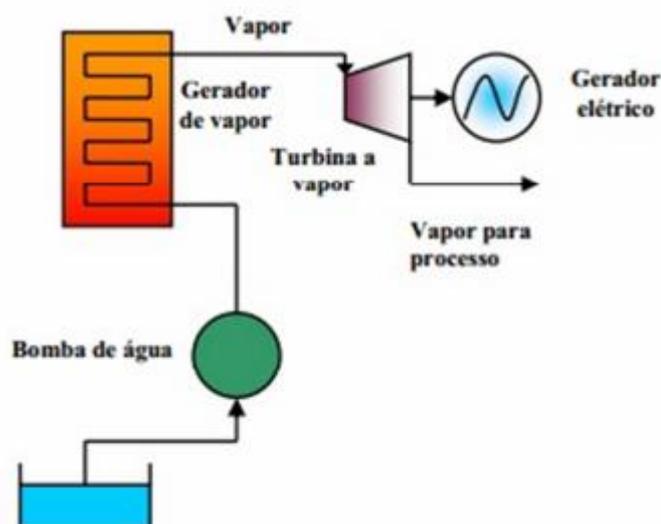
O vapor por sua vez, é utilizado como principal fonte de energia nos processos. Sua aplicação se iniciou com a revolução industrial e consequente necessidade de modernização dos maquinários, bem como invenção de locomotivas e barcos movidos a vapor no século XVII, o que lhe conferiu vasta utilidade nas usinas (KOLANOWSKI, 2008).

Vapor é o gás que se produz a partir da passagem da água do estado líquido para o gasoso, formando-se quando as moléculas de H<sub>2</sub>O liberam-se das pontes de hidrogênio e se agrupam (BRADY; HUMISTON, 2012). No setor sucroalcooleiro, os equipamentos responsáveis por transformar a água do estado líquido para vapor (saturado ou superaquecido) por meio da queima de combustíveis, são denominados de caldeiras ou geradores de vapor (SHINTANI; YASUDA, 2006).

Segundo Botelho e Bifano (2011), o vapor saturado é produzido a partir do aquecimento da água até sua temperatura de ebulição, e o vapor superaquecido, é obtido pelo aquecimento adicional do vapor saturado acima do ponto de saturação, sendo este último destinado a geradores que necessitam de altas temperaturas para operar.

De acordo com Arnao (2007) na indústria de cana de açúcar, os sistemas utilizados para a cogeração seguem a estrutura do ciclo Rankine. Barja (2006) menciona que o ciclo Rankine para produção de vapor tem início no bombeamento da água até a caldeira, posteriormente o combustível queimado gera o vapor superaquecido, o qual aciona turbina e distribui energia térmica para o gerador elétrico, como também para o processo (figura 1).

**Figura 1. Ciclo Rankine com co-geração.**



Fonte: KATALATO (2004, p. 11).

Sobre isso, Pinho (2014) afirma que a cogeração é a solução relacionada à engenharia que pode tornar viável a autogeração, uma vez que o rendimento é captado direto da fonte e o excedente de vapor será convertido em energia, tornando este método compensatório em relação ao fornecimento compartilhado.

## 2.2. Processo de fabricação do açúcar

No Brasil, o cultivo da cana-de-açúcar iniciou-se com a colonização dos portugueses, os quais visavam interesse econômico para preservar a colônia (OGANDO, 2015). Ela é um vegetal que após seu processamento na indústria fornece como produtos centrais o açúcar e o álcool, como também subprodutos como o bagaço, a torta do filtro, a vinhaça e a levedura seca.

Basicamente o processo de fabricação do açúcar consiste em extrair o caldo da cana, prepará-lo e concentrá-lo (MACHADO, 2012). Nessa cadeia produtiva são

envolvidos a matéria-prima (cana-de-açúcar), equipamentos de diversos tipos com suas particularidades, energia, bem como elementos físicos e químicos.

A cana-de-açúcar após seu plantio e colheita da área agrícola, é encaminhada ao pátio da indústria para seu processamento. A matéria-prima é descarregada por pontes rolantes ou hilos e depositada na área de armazenamento ou imediatamente nas mesas alimentadoras, seguida da lavagem em algumas indústrias (OGANDO, 2015).

A esteira metálica efetua o transporte da cana até o picador e ao desfibrador com o objetivo de abrir as células e facilitar a extração do caldo. Nas moendas, a matéria desfibrada é esmagada por rolos, os quais exercem alta pressão sobre a cana para retirar o caldo de suas células (DIAS, 2008). O bagaço originado dessa etapa segue com destino a caldeira para geração de energia térmica e elétrica para própria usina, sendo o excedente de energia elétrica comercializado.

O caldo obtido do processo de extração é peneirado e direcionado ao tratamento de caldo, o qual é composto por etapas que visam retirar substâncias que influenciam na qualidade do produto final. Nesta etapa, ele passa por um tratamento térmico (aquecimento), onde é aquecido a temperatura por volta de 105 °C com o intuito de reduzir a viscosidade e proporcionar a formação de flocos que na etapa seguinte (decantação) serão sedimentados produzindo o lodo (MACHADO, 2012). Este resíduo por sua vez, será sucessivamente filtrado, recuperando-se o caldo nele contido e dando origem a torta, a qual é aplicada como adubo na lavoura.

Conforme Sartori (2014), o caldo clarificado é conduzido para o setor de evaporação, onde será concentrado e direcionado para a cristalização e cozimento, etapas em que os cristais de sacarose são formados e desenvolvidos até atingirem a granulometria desejada. Estes cristais são então separados da massa cozida por centrifugação. O açúcar é seco, categorizado e armazenado de maneira apropriada.

### **2.3. Aquecedor de caldo**

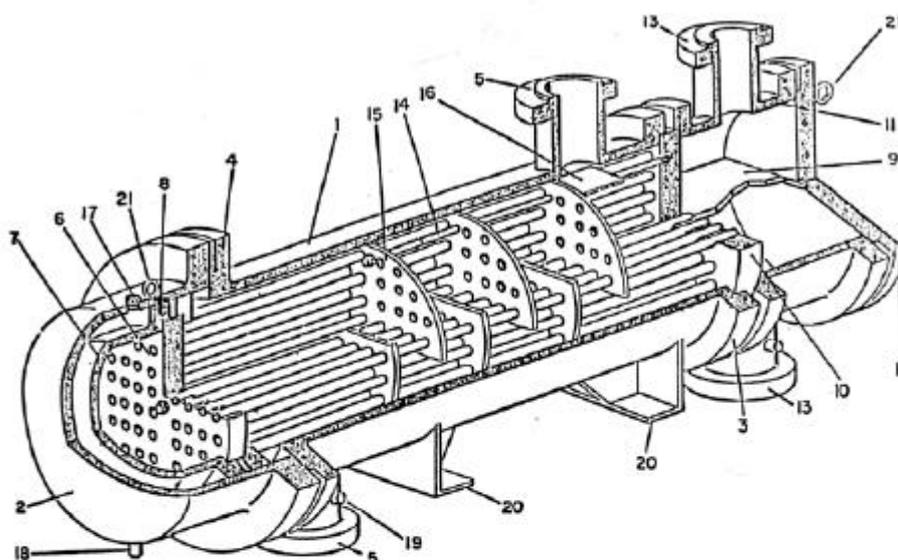
As indústrias utilizam em seus processos elevada taxa de transmissão de energia na forma de calor, cuja tarefa é incumbida aos trocadores de calor. De acordo com Silva et al. (2013), este equipamento tem a função de trocar energia

térmica, por contato indireto, entre dois fluidos que se encontram em temperaturas diferentes.

No setor sucroalcooleiro, esses equipamentos são muito empregados como aquecedores na etapa de tratamento do caldo da cana-de-açúcar. Dentre os tipos de trocador de calor, o modelo casco e tubos é o mais utilizado devido ao custo e especialmente ao desempenho térmico (BICCA, 2006).

O trocador casco e tubos é composto por um conjunto de tubos paralelos envoltos por um casco, local este percorrido por um dos fluidos utilizados na transferência de calor (FALCÃO, 2008). Além disso, possui como principais elementos constituintes de sua estrutura física, os cabeçotes e os carretéis, responsáveis pela entrada, retorno e saída do segundo fluido (figura 2).

**Figura 2. Componentes dos trocadores de calor tipo casco e tubos.**



- |                        |                                |
|------------------------|--------------------------------|
| 1 - Casco              | 11 - Carretel                  |
| 2 - Tampo do Casco     | 12 - Tampo do Carretel         |
| 3 - Flange do Carretel | 13 - Bocai do Carretel         |
| 4 - Flange do Cabeçote | 14 - Tirantes e Espaçadores    |
| 5 - Bocai do Casco     | 15 - Chicanas e Placas Suporte |
| 6 - Espelho Flutuante  | 16 - Chapa de Impacto          |
| 7 - Cabeçote flutuante | 17 - Respiro                   |
| 8 - Flange do Cabeçote | 18 - Dreno                     |
| 9 - Placa Divisora     | 19 - Conexão de Teste          |
| 10 - Espelho Fixo      | 20 - Selas                     |
|                        | 21 - Olhal de Içamento         |

Fonte: FALCÃO (2008, p. 149).

No trocador de calor, o tipo do regime de escoamento dos fluidos é uma característica que compõe sua operação. Segundo Perussi (2010), o escoamento pode ocorrer em fluxo paralelo, no qual os fluidos percorrem na mesma direção, em fluxo contrário, definido pelo escoamento em direção oposta, apresentando melhor desempenho, como também o regime cruzado, identificado pela interseção entre o escoamento dos fluidos.

Normalmente, para o aquecimento do caldo da cana-de-açúcar são utilizados aquecedores tubulares de espelhos fixos, com os tubos organizados em passes com formato triangular. Cada passe possui a mesma quantidade de tubos e usualmente um número par de passes é selecionado para facilitar o projeto da tubulação de alimentação de caldo aos aquecedores (REIN, 2007).

Para a operação dos aquecedores, Rein (2007) caracteriza a necessidade de arranjos para remoção de gases incondensáveis e condensados dos aquecedores, visto que podem causar baixo rendimento. A retirada do condensado é realizada pelo ponto mais baixo do casco e dos incondensáveis por purgadores, em um ponto mais distante da entrada de vapor.

Em geral, nos aquecedores de caldo das indústrias do setor sucroenergético, a transferência de calor é realizada com a utilização do vapor de escape das turbinas e do vapor vegetal produzido dos evaporadores, posto que o vapor de escape seja empregado nas etapas finais de aquecimento, e o vegetal (V3, V2 e V1) nos primeiros estágios de aquecimento (CASTRO; ANDRADE, 2007).

Nos aquecedores de caldo, o fator predominante são as incrustações no interior dos tubos, exigindo a necessidade de limpeza periódica. Castro e Andrade (2007) argumentam que por esse motivo, obrigatoriamente haverá mais aquecedores que o necessário para a operação e que os métodos utilizados para limpeza dos equipamentos são o mecânico, químico, caldo misto a frio e ar comprimido, sendo este último o mais econômico, eficiente e simples.

### *2.3.1 Dimensionamento de um sistema de aquecimento de caldo*

No sistema de aquecimento de caldo, o vapor condensado é o elemento utilizado para transferir o calor necessário ao caldo. De acordo com os estudos de Rein (2007) descritos neste tópico, diversos fatores influenciam no dimensionamento

do sistema para o aquecimento do caldo da cana-de-açúcar, tais como balanço térmico entre os fluidos, taxa e coeficiente de transmissão de calor, área para a realização da troca térmica, características do caldo, velocidade de escoamento nos tubos, entre outros.

A quantidade de energia térmica transmitida por unidade de tempo para um fluido define a taxa de transferência de calor. A diferença de temperatura, força motriz para a transferência de calor, varia através de um aquecedor. Se um pequeno elemento de um aquecedor for considerado, a taxa de transferência de calor é determinada pela equação 1.

$$\frac{dQ}{dA} = -k \cdot \Delta T \quad (1)$$

Onde:

$Q$ : taxa de fluxo de calor em kW

$A$ : área externa em m<sup>2</sup>

$k$ : coeficiente de transferência de calor global em kW/(m<sup>2</sup>.K)

$\Delta T$ : diferença de temperatura entre vapor de aquecimento e o caldo, ou seja,  $t_{st} - t$

$t_{st}$ : temperatura do vapor

$t$ : temperatura do caldo

Considerando a aplicação da expressão acima em todo o aquecedor, as temperaturas de entrada até as de saída do caldo são integradas e obtém a equação 2.

$$Q = kA \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (2)$$

Em aquecedores de caldo tubulares, o calor é transmitido por meio do tubo que se encontra em contato com o vapor. O coeficiente dessa troca de calor global representa o inverso da resistência térmica total à transmissão de calor entre os dois fluidos.

No funcionamento do trocador de calor casco e tubos, existem resistências do lado do caldo no interior dos tubos e do lado do vapor disperso no casco, as quais interferem na transferência de calor (REIN, 2007). Essas superfícies são principalmente expostas às incrustações dos tubos na região interna e externa. Dessa forma, é determinado o coeficiente de transferência global de calor conforme a fórmula 3.

$$\frac{1}{kA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{r_{fi}}{A_i} + \frac{\delta}{k_T A} + \frac{r_{fo}}{A} + \frac{1}{h_e A} \quad (3)$$

Em que:

$r_{fi}$ : fator de incrustação do lado interno (m<sup>2</sup>.K)

$r_{fo}$ : fator de incrustação do lado externo (m<sup>2</sup>.K)

$\delta$ : espessura do tubo (m)

$k_T$ : condutividade térmica do metal em kW/(m.K)

$A_i$ : área interna do tubo (m<sup>2</sup>)

$A$ : área externa (m<sup>2</sup>)

Identificando os termos dessa equação, temos:

$\frac{1}{kA}$ : Resistência total

$\frac{1}{h_i A_i}$ : Resistência interna (lado caldo)

$\frac{r_{fi}}{A_i}$ : Resistência referente à incrustação interna (lado caldo)

$\frac{\delta}{k_T A}$ : Resistência referente à parede do tubo

$\frac{r_{fo}}{A}$ : Resistência referente à incrustação externa (lado vapor)

$\frac{1}{h_e A}$ : Resistência externa (lado vapor)

A incrustação do lado externo dos tubos é desprezível, pois o vapor é geralmente limpo, mas na região interna por onde circula o caldo pode ser crítica, motivo pelo qual a limpeza periódica é de extrema importância. Essa barreira (incrustação) aumenta a resistência à troca de calor entre o vapor e o caldo.

A área de troca térmica também é considerada no sistema de aquecimento, e representa a correlação entre o diâmetro externo dos tubos e o comprimento dos mesmos. Porém a convenção europeia considera o comprimento total do tubo e o sistema americano e britânico utiliza o comprimento entre os espelhos, sendo este último o mais aplicado no setor sucroalcooleiro.

Após a determinação do tipo de vapor (aquecimento, vegetal ou escape) conforme a economia térmica necessária e a definição da capacidade da estação de aquecimento, pode-se obter a área de troca térmica pela equação 2. Normalmente, os aquecedores apresentam uma área de aquecimento entre 100 e 700 m<sup>2</sup>.

As propriedades físicas e químicas do caldo influenciam no cálculo do aquecedor, uma vez que caracterizam o comportamento do fluido e suas transformações em função da temperatura. Representando uma dessas propriedades, o calor específico do caldo da cana-de-açúcar definido pela quantidade de calor exigida para elevar sua temperatura em uma unidade de grau, é um coeficiente que pode ser calculado conforme a equação 4.

$$c_p = 4,187(1 - 0,006 * Bx) \quad (4)$$

Onde:

$Bx$ : teor de sólidos dissolvidos (brix) no caldo

$c_p$ : calor específico do caldo (kJ/kg°C)

Nos aquecedores de caldo, a condutividade térmica é uma propriedade importante que quantifica a capacidade do material de transmitir energia térmica. Normalmente, no setor sucroenergético os aquecedores são constituídos por tubos de aço inoxidável que compreende uma condutividade térmica entre 16 e 25 W/(m.K) e apresenta melhor relação custo-benefício, maior resistência a abrasão e requerem trocas menos frequentes (REIN, 2007).

O coeficiente de transferência de calor é um elemento que varia conforme as condições e características do sistema de aquecimento, das quais pode ser citada a velocidade de escoamento, superfície, vapor de aquecimento, resistência do filme do caldo e incrustação. Segundo Hugot (1986), em aquecedor de caldo a equação recomendada para determinar esse coeficiente, bem como os valores obtidos com a aplicação da mesma, são descritos na expressão 5 e tabela 1, respectivamente.

$$K = 7,0 \cdot t_{st} \frac{u^{0,8}}{1,8} \quad (5)$$

No qual:

$t_{st}$ : Temperatura do vapor (°C)

$u$ : velocidade do líquido (m/s)

**TABELA 1. Valores de coeficientes de transferência de calor em  $W/(m^2.K)$  calculados da equação anterior.**

Vapor/Vapor vegetal	Temperatura (°C)	Velocidade do caldo (m/s)		
		1,5	2	2,5
Escape	120	726	914	1092
Vapor vegetal 1	112	678	853	1020
Vapor vegetal 2	103	623	784	938

**Fonte:** Adaptada de HUGOT (1986, p. 205).

De acordo com as relações demonstradas, a velocidade de escoamento do fluido dentro dos tubos, tem efeito significativo ao que diz respeito à transferência de calor, visto que a taxa de incrustação no interior do tubo e a resistência que se encontra no filme de líquido circulando no tubo combinados com a velocidade, interferem na troca térmica.

A velocidade do caldo entre 1,5 e 2,2 m/s é ideal, uma vez que se for inferior a este valor, a transferência de calor é afetada excessivamente, como também se superior é suscetível a desgaste dos tubos, tampas e bombas. As velocidades dependem da vazão do líquido e do diâmetro e número de tubos em cada passe.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Local de estudo

O estudo em questão foi realizado em uma usina do setor sucroenergético localizada no interior de São Paulo, com capacidade de moagem diária de 10.500 toneladas de cana para produção de 14.500 sacas de açúcar VHP (Very High Polarization) e 349.900 litros de etanol (anidro e hidratado), como também produção de 300 MWh energia elétrica para comercialização.

#### 3.2. Levantamento de dados

Inicialmente, foi realizada uma visita ao local e análise visual do equipamento, observando sua disposição, fluxo de entrada e saída de vapor e caldo, acessórios, instrumentos de automação e monitoramento. Também foram levantadas informações referentes ao processo, sendo elas:

- i. características do vapor utilizado (pressão e temperatura);
- ii. temperatura inicial do caldo a ser aquecido;
- iii. temperatura desejada após o aquecimento;
- iv. teor de sólidos dissolvidos do caldo (brix);
- v. vazão volumétrica do caldo.

Além disso, o prontuário dos aquecedores foi solicitado ao responsável da planta para obtenção de informações sobre suas dimensões e elementos constituintes do sistema.

### 3.3. Avaliação do sistema de aquecimento

Concluído o levantamento de dados, o sistema de aquecimento foi avaliado seguindo a metodologia proposta por Rein (2007). Para tanto, foram calculados o calor específico do caldo utilizado, a quantidade de calor sensível transferida ao caldo, a área de troca térmica prevista para realizar a operação e a velocidade média de escoamento do caldo no feixe tubular.

Para determinação do calor específico do caldo, foi utilizada a equação 6.

$$c_p = 4,187(1 - 0,006 * Bx) \quad (6)$$

A taxa de transferência de calor do vapor para o caldo foi obtida através do cálculo do calor sensível recebido pelo mesmo (equação 7).

$$Q = m_j c_p (t_2 - t_1) \quad (7)$$

Onde:

$Q$ : calor sensível recebido pelo caldo (kJ/s)

$m_j$ : vazão mássica de caldo (kg/s)

$c_p$ : calor específico do caldo (kJ/kg°C)

$t_1$  e  $t_2$ : temperaturas inicial e final (°C)

Conhecido o valor da taxa de transferência de calor e as temperaturas de operação, calculou-se a área de troca térmica utilizando-se a equação 8. Segundo Rein (2007), um valor de projeto conservador de 1,0 kW/(m<sup>2</sup>.K) é frequentemente escolhido como coeficiente global de troca térmica para o aquecimento secundário usando vapor vegetal 1, enquanto um valor um pouco menor, de 0,9 kW/(m<sup>2</sup>.K) é empregado para aquecimento primário usando vapor vegetal 2. Assim, estes foram os coeficientes globais de troca térmica adotadas na avaliação destes aquecedores.

$$Q = kA \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (8)$$

Posteriormente, foi obtida pela equação 9, a velocidade de escoamento do fluido no interior no tubo.

$$u = \frac{Q}{\Sigma A_S}$$

(9)

No qual:

$u$ : velocidade de escoamento em m/s

$Q$ : vazão volumétrica do caldo em m<sup>3</sup>/s

$A_S$ : área da seção transversal ao escoamento de cada tubo (m<sup>2</sup>)

Os cálculos do sistema de aquecimento foram finalizados com a obtenção do consumo de vapor em cada aquecedor utilizado. Para isto, desprezou-se as perdas de calor para o ambiente e possível superaquecimento do vapor utilizado, as quais são, normalmente, reduzidas. Foi utilizado a equação 10.

$$m_{st} = \frac{Q}{\Delta h_{LV}} \quad (10)$$

No qual:

$m_{st}$ : vazão mássica de vapor em ton/h

$Q$ : calor transferido para caldo em kJ/s

$\Delta h_{LV}$ : calor específico da evaporação em kJ/kg

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

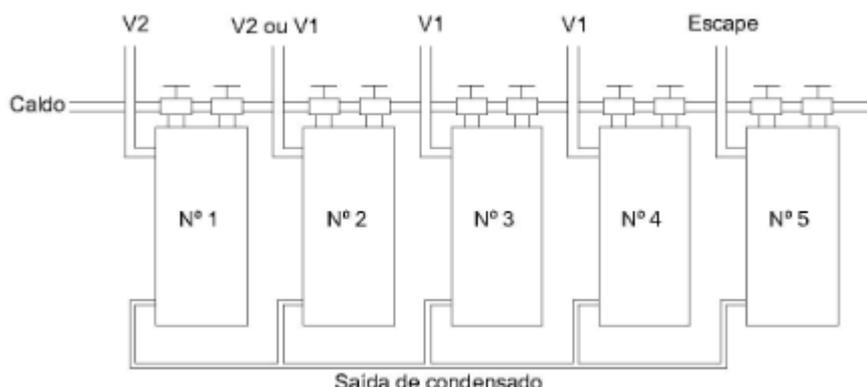
O sistema de aquecimento de caldo de cana caleado desejado na usina sucroenergética avaliada atua com uma linha em série de cinco aquecedores verticais casco e tubos de múltiplos passes, sendo um deles o equipamento reserva, visto que regularmente é necessário deixar um aquecedor desativado para remoção da incrustação formada na região interna do feixe tubular. Essa estrutura confirma o argumento de Castro e Andrade (2007) no que diz respeito à necessidade de possuir mais equipamentos que o necessário na linha de aquecimento.

Cada aquecedor desse sistema apresenta uma área de troca térmica de 251 m<sup>2</sup>, operando com 12 passes na calandra contendo um total de 660 tubos com 38,1 mm de diâmetro e 3.715 mm de comprimento. De acordo com Rein (2007), a

dimensão e a quantidade de equipamentos são escolhidas para adequar o número de estágios de aquecimento e o regime de limpeza planejado.

A linha processa uma vazão de 400 m<sup>3</sup>/h de caldo para ser aquecido. Sendo assim, essa rede está configurada para operar com vapor vegetal V2 no aquecedor denominado nº 1, vapor vegetal V1 ou V2 no aparelho nº 2, apenas vapor vegetal V1 nos equipamentos nº 3 e nº 4 e vapor de escape no aquecedor nº 5, conforme ilustrado na figura 3. O aparelho nº 2 apresenta flexibilidade para o uso do vapor vegetal, pois segundo Hugot (1977) pode-se iniciar o aquecimento com um vapor menos quente e à medida que o equipamento fica incrustado e não fornece a temperatura necessária, aplica-se o vapor mais quente.

**Figura 3. Estrutura da linha de aquecimento do caldo.**



**Fonte:** Autoria própria (2017).

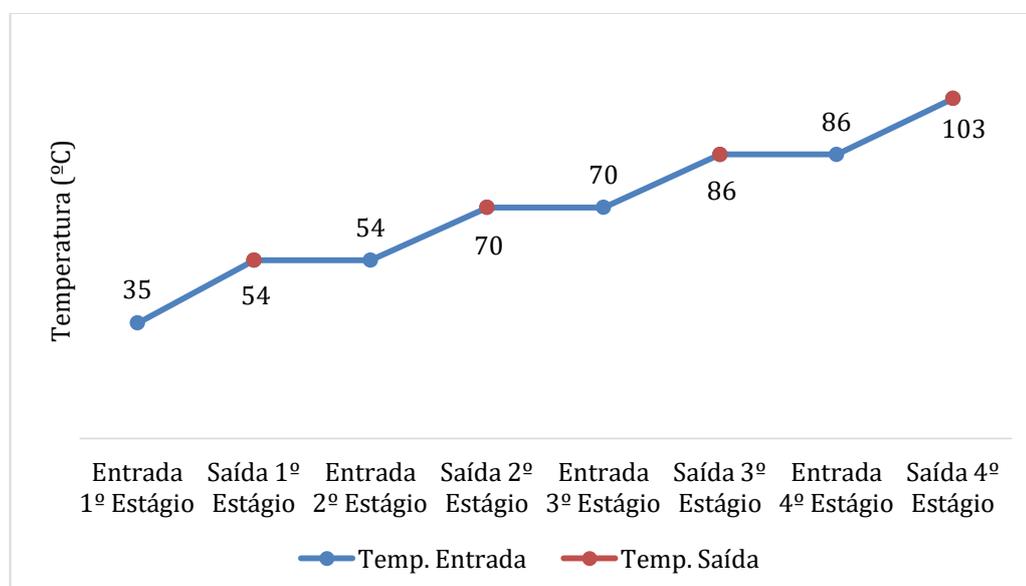
O caldo caleado enviado da dosagem com 15 °Bx é aquecido no primeiro equipamento com o vapor vegetal V2 obtido da sangria do segundo evaporador com uma temperatura de 109 °C e pressão de 0,40 kgf/cm<sup>2</sup>. Posteriormente, este é aquecido nos próximos três aquecedores com vapor vegetal V1 retirado do primeiro evaporador de múltiplo efeito com uma temperatura de 116 °C e pressão de 0,80 kgf/cm<sup>2</sup>, como apresentado na tabela 2. Conforme Hugot (1977), quando a contrapressão é suficiente (a partir de cerca de 0,70 kgf/cm<sup>2</sup>), é possível atingir a temperatura de 103 °C com o vapor vegetal V1, sem a necessidade de empregar vapor de escape. A tabela 2, apresenta as características do caldo e do vapor de aquecimento.

**TABELA 2. Características do caldo e do vapor de aquecimento.**

Variável	Valor
Densidade do caldo	1,05 kg/l
Calor específico do caldo	3,81 kJ/kg°C
Temperatura do vapor vegetal V2	109 °C
Temperatura do vapor vegetal V1	116 °C
Pressão do vapor vegetal V2	0,40 kgf/cm <sup>2</sup>
Pressão do vapor vegetal V1	0,80 kgf/cm <sup>2</sup>
$\Delta h_{LV}$ do vapor vegetal V2	2209,15 kJ/kg
$\Delta h_{LV}$ do vapor vegetal V1	2230,07 kJ/kg

**Fonte:** Autoria própria (2017).

De acordo com a empresa, deseja-se que na fase inicial de aquecimento, o caldo entre no primeiro aquecedor com uma temperatura de 35 °C e após a troca de calor com o vapor vegetal V2, saia com uma temperatura de 54 °C. Este por sua vez, seja aquecido em seguida no segundo equipamento com vapor vegetal V1 até atingir 70 °C. A transferência de calor continua no terceiro aquecedor também com o vapor vegetal V1 e saída do caldo pretendida com 87 °C, sendo concluído com o aquecimento até a temperatura desejada de 103 °C com o vapor vegetal V1 no quarto aquecedor, conforme a figura 4.

**Figura 4. Aquecimento do caldo desejado.**

**Fonte:** Autoria própria (2017).

Segundo Rein (2007), as melhores e mais econômicas velocidades médias de escoamento concentram-se entre 1,5 e 2,2 m/s, haja vista que, se for inferior, as incrustações nos tubos do aquecedor se formam mais rápido, ocasionando na queda da temperatura do caldo, porém caso seja superior, ocorrerá uma perda de carga do caldo significativa dentro dos tubos durante seu percurso pelo aquecedor. Nesse caso, a velocidade de circulação do caldo na usina avaliada atende a essa instrução da literatura, pois como apresentado na tabela 3 sua velocidade é de 1,75 m/s.

A área de troca térmica requerida (373,51 m<sup>2</sup>) para a transmissão de calor no quarto aquecedor (tabela 3) é superior a superfície de aquecimento disponível do equipamento (251 m<sup>2</sup>). Sobre isso, Hugot (1977) afirma que a falta do restante de área exigida para que o caldo seja aquecido, não irá permitir o alcance da temperatura pretendida (103 °C). Nesse caso, não é possível utilizar o sistema de aquecimento desejado para promover a elevação de temperatura pretendida no último estágio. Para tanto, seria necessário um aquecedor com maior área de aquecimento ou a utilização de vapor de escape neste estágio, o qual apresenta maior temperatura e pressão. Contudo, estas providências são equivocadas, pois o aumento da área de troca térmica exige investimento e a utilização de escape quando há disponibilidade de vapor vegetal no processo é desaconselhada, visto que aumenta o consumo de energia térmica da planta.

**TABELA 3. Resultados da avaliação do sistema de aquecimento desejado.**

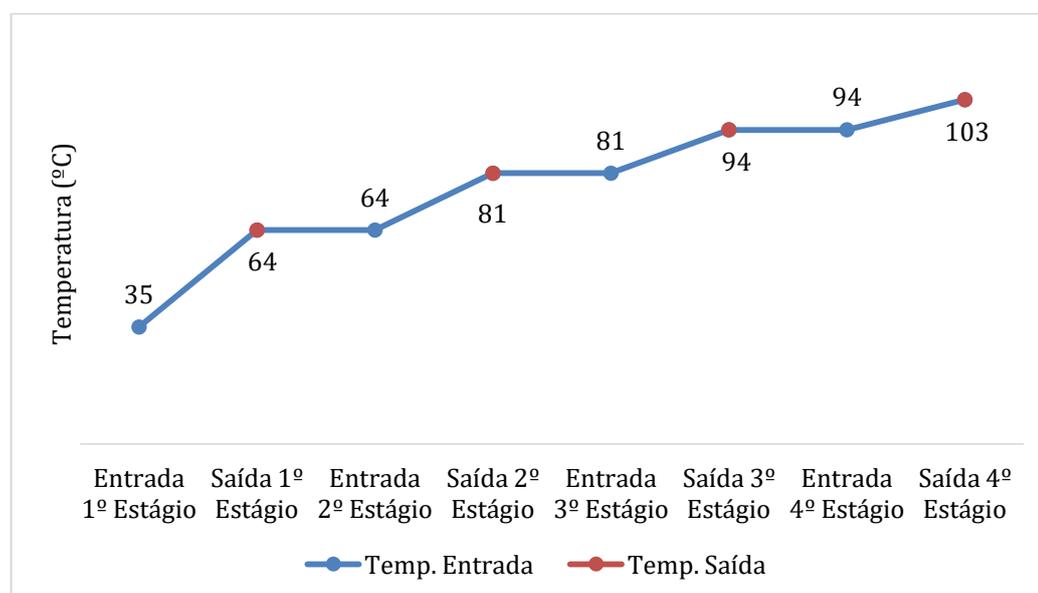
Variável calculada	Valor
Velocidade de escoamento	1,75 m/s
Calor transferido no primeiro aquecedor	8445,02 kJ/s
Calor transferido no segundo aquecedor	7111,59 kJ/s
Calor transferido no terceiro aquecedor	7111,59 kJ/s
Calor transferido no quarto aquecedor	7556,07 kJ/s
Área necessária no primeiro aquecedor	148,16 m <sup>2</sup>
Área necessária no segundo aquecedor	133,35 m <sup>2</sup>
Área necessária no terceiro aquecedor	191,17 m <sup>2</sup>
Área necessária no quarto aquecedor	373,51 m <sup>2</sup>

**Fonte:** Autoria própria (2017).

Analisando-se a tabela 3, nota-se que a área requerida para o aquecimento do caldo nos três primeiros estágios é menor do que a área disponível em cada um deles. Tal fato mostra que essa superfície de aquecimento disponível nestes equipamentos não está sendo bem aproveitada. Assim, como não há obrigatoriedade em manterem-se os intervalos de elevação de temperatura apresentados na figura 3, tais valores foram alterados, adotando-se a temperatura máxima que cada aquecedor é capaz de atingir. Estes valores de temperatura foram calculados igualando-se as equações 7 e 8, e isolando-se a temperatura de saída do caldo do aquecedor. Os valores obtidos apresentados na figura 4 permitiriam melhor aproveitamento de todos os equipamentos disponíveis.

Na indústria sucroalcooleira, o vapor é um insumo que alimenta diversos processos. Hugot (1977) afirma que para garantir economia térmica no aquecimento, é preciso empenhar-se para atender a uma diferença de temperatura entre o vapor vegetal e a saída do caldo, de 10 °C a 12 °C, porém, Rein (2007) argumenta que em épocas mais recentes tem sido utilizado com frequência valores em torno de 7 °C. Com as alterações propostas nas faixas de elevação de temperatura em cada estágio de aquecimento de acordo com a figura 5, estas diferenças mínimas de temperatura foram respeitadas em todos os equipamentos, garantindo boa taxa de transferência de calor.

**Figura 5. Aquecimento do caldo recomendado.**



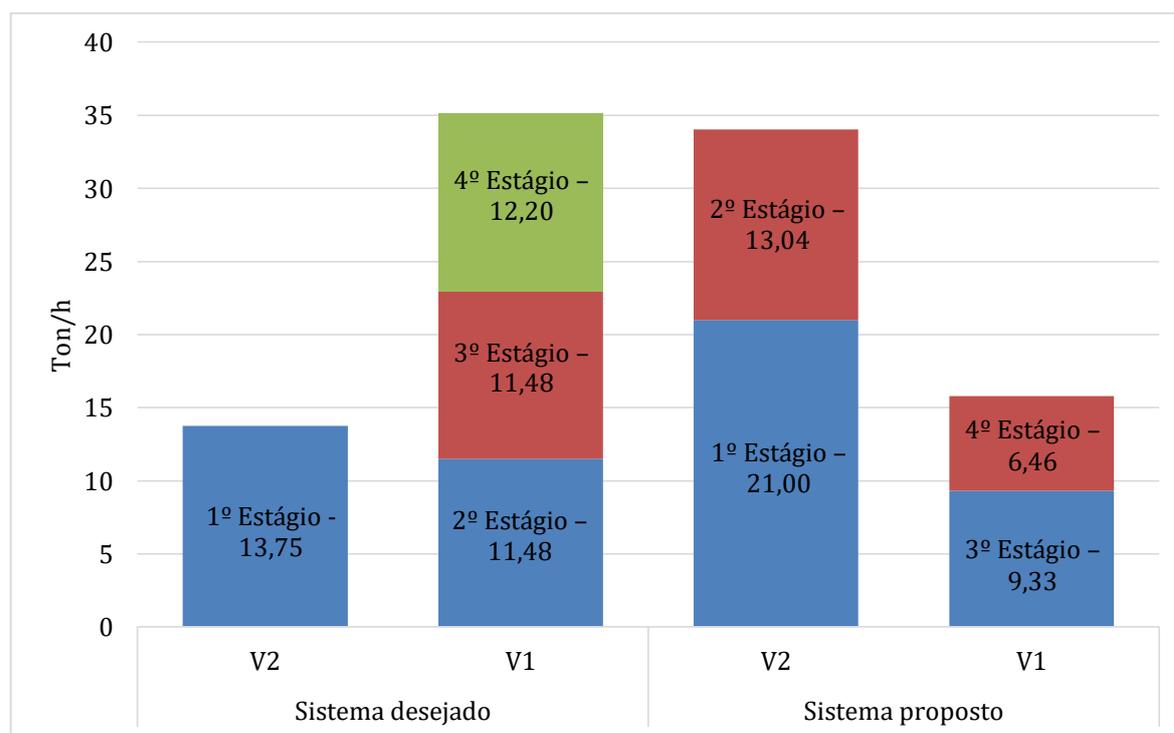
**Fonte:** Autoria própria (2017).

Rein (2007) explica que em um sistema de evaporação de múltiplo efeito com N efeitos, 1kg de vapor irá evaporar N kg de água. Assim, em um evaporador de duplo efeito, 1 kg de vapor irá evaporar 2 kg de água, em um triplo efeito, 3 kg, e assim por diante. Dessa forma, no cenário desejado para a usina avaliada, a qual possui um sistema de triplo efeito, cada quilograma de vapor sangrado no primeiro efeito deixa de evaporar 1 kg de água no segundo efeito e 1 kg de água no terceiro efeito. Por outro lado, cada quilograma de V2 sangrado no segundo efeito deixa de evaporar apenas 1 kg de água no terceiro efeito. Portanto, a sangria de vapor vegetal V2 faz com que a energia térmica do vapor de escape seja melhor aproveitada no sistema de evaporação com múltiplos efeitos, diminuindo seu consumo. Com isso, o vapor de escape economizado, proveniente das caldeiras, poderá ser utilizado para geração de energia elétrica e comercialização.

Realizando-se o aquecimento seguindo os intervalos de temperatura desejados pela empresa, o consumo de vapor vegetal V1 previsto é mais elevado que o de vapor vegetal V2, conforme apresentado na figura 6. Tal fato expõe a preferência por parte dos operadores em sangrar o sistema de evaporação no primeiro efeito, ao invés de priorizar a extração no segundo efeito. Como o vapor vegetal V2 é produzido utilizando-se o vapor vegetal V1, ao sangrar maior quantidade de V1, uma menor quantidade de vapor vegetal V2 será produzida para ser empregada em outros estágios de aquecimento.

No entanto, levando em consideração as faixas de temperaturas de aquecimento propostas neste trabalho e passando a utilizar vapor vegetal V2 também no segundo estágio de aquecimento, será reduzida a quantidade de vapor V1 sangrada do sistema de evaporação (figura 6). Esta alteração diminui o consumo de vapor de escape no sistema de evaporação e aumenta a eficiência energética do processo.

**Figura 6. Consumo de vapor vegetal para o sistema de aquecimento desejado e proposto.**



**Fonte:** Autoria própria (2017).

Como o aquecedor nº 2 apresenta flexibilidade para uso do vapor vegetal V1 ou V2, essa economia de vapor não iria gerar custo adicional em termos de construção de tubulações e acessórios. Ou até mesmo se provocasse, é justificável que se aceite um custo extra, tendo em vista o benefício muito maior em termos de eficiência energética.

## 5. CONCLUSÃO

O aquecimento do caldo de cana caleado pode ser realizado empregando vapor vegetal ou vapor de escape. No entanto, é essencial um estudo da capacidade de aquecimento dos equipamentos disponíveis, bem como da melhor forma de utilização da energia térmica no processo, minimizando desperdícios.

Conforme a avaliação realizada para o sistema de aquecimento desejado, observou-se que a velocidade de escoamento do caldo corresponde ao recomendado, porém existe uma limitação no último estágio de aquecimento quanto a superfície disponível para aquecer o caldo à temperatura pretendida pela empresa. Dessa maneira, haveria necessidade de mudança no tipo de vapor empregado ou

dimensão desse equipamento para satisfazer ao requisitado. Em contrapartida, custos adicionais seriam gerados para realizar essa adequação. Além disso, com a configuração desejada, será observado maior consumo de vapor vegetal V1. Contudo, sendo esse vapor mais nobre que o vapor vegetal V2, quanto mais economizá-lo, menor será a quantidade de vapor escape será utilizado pelo processo, fato que permite sua aplicação na cogeração de energia elétrica.

Complementa-se que para atender ao aquecimento do caldo de cana caleado operando com quatro aquecedores na linha e empregando somente vapor vegetal V1 e V2, é possível elevar a temperatura do caldo aplicando vapor vegetal V2 nos dois primeiros equipamentos, aproveitando-se melhor a área de troca térmica disponível nestes equipamentos, e vapor vegetal V1 nos próximos estágios. Além disso, não haveria custos extras para alterar a configuração, haja vista que o aquecedor nº 2 já está estruturado para receber esse tipo de vapor.

## REFERÊNCIAS

- ARNAO, J. H. S. *Caldeiras aquatubulares de bagaço: estudo do sistema de recuperação de energia*. 2007. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- BARJA, G. J. A. *A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico*. 2006. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- BICCA, G. B. *Modelagem hierárquica de trocadores de calor casco e tubos*. 2006. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- BOTELHO, M. H. C.; BIFANO, H. M. *Operação de caldeiras: gerenciamento, controle e manutenção*. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.
- BRADY, J. E.; HUMISTON, G. *Química geral*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2012. v.01.
- CAMPOS, V. F. *Controle da qualidade total*. 8. ed. Rio de Janeiro: Block, 1999.
- CORRÊA NETO, V.; RAMON, D. *Análises de opções tecnológicas para projetos de co-geração no setor sucro-alcooleiro*. Vibhava Consultoria S/A Ltda - Sustainable Energy Technology Assistance Program (SETAP) Brazil Representation, Brasília, 2002.

DE CASTRO, S. B.; ANDRADE, S. A. C. *Tecnologia do açúcar*. Recife: Editora Universitária UFPE, 2007.

DIAS, M. O. S. et al. *Simulação do processo de produção de etanol a partir do açúcar e do bagaço, visando a integração do processo e a maximização da produção de energia e excedentes do bagaço*. 2008. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/266223>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

FALCÃO, C. *Projeto mecânico vasos de pressão e trocadores de calor casco e tubos*. São Paulo, 2008. Texto registrado sob o número 284827 do Livro 514 folha 487 do Escritório de Direitos Autorais da Fundação Biblioteca Nacional do Ministério da Cultura. Disponível em: <<http://www.falcaoconsult.com.br/Sinopse%20da%20Apostila.pdf>>. Acesso em: 23 mar. 2017.

GIORDANO, G. Tratamento e controle de efluentes industriais. *Revista ABES*, v. 4, n. 76, 2004. Disponível em: <[https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/35427518/Apostila\\_-\\_Tratamento\\_de\\_efluentes\\_industriais.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWY YGZ2Y53UL3A&Expires=1507765220&Signature=QIsp1Me66xaMac0wnFONdfy6G4A%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DTRATAMENTO\\_E\\_CONTROLE\\_DE\\_EFLUENTES\\_INDUS.pdf](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/35427518/Apostila_-_Tratamento_de_efluentes_industriais.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWY YGZ2Y53UL3A&Expires=1507765220&Signature=QIsp1Me66xaMac0wnFONdfy6G4A%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DTRATAMENTO_E_CONTROLE_DE_EFLUENTES_INDUS.pdf)>. Acesso em: 5 mar. 2017.

HIGA, M.; LUIZ, R. V. G. Alternativas na utilização de vapor vegetal oriundo da evaporação de caldo em usina de açúcar e álcool: um estudo de caso. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 2, n. 3, p. 90-101, 2010.

HUGOT, E. *Handbook of cane sugar engineering*. 3. ed. Amsterdã: Elsevier, 1986.

HUGOT, E. *Manual da engenharia açucareira*. São Paulo: Mestre Jou, 1977. v. 01.

KALATALO, D. N. *Análise exergética de ciclos combinados*. 2004. Monografia (Graduação) - Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004. Disponível em: <[http://bdm.unb.br/bitstream/10483/941/1/2004\\_DiegoNevesKalatalo.pdf](http://bdm.unb.br/bitstream/10483/941/1/2004_DiegoNevesKalatalo.pdf)>. Acesso em: 10 abr. 2017.

KOLANOWSKI, B. F. *Small-scale cogeneration handbook*. 3. ed. Lilburn: The Fairmont Press, 2008.

MACHADO, S. S. *Tecnologia da fabricação do açúcar*. Inhumas: Universidade Federal de Santa Maria, 2012.

OGANDO, F. I. B. *Estudo da degradação térmica de sacarose e da contaminação microbológica no processo de fabricação de açúcar*. 2015. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo,

Piracicaba, 2015. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11138/tde-21092015-155751/pt-br.php>>. Acesso em 15 maio 2017.

PERUSSI, R. *Análise do desempenho de trocadores de calor de fluxo cruzado por simulação numérica*. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18147/tde-05072013-104947/pt-br.php>>. Acesso em: 15 mar. 2017.

PINHO, E. H. B. *Estudo de ampliação de extração de vapor e de aumento de eficiência energética de uma termelétrica*. 2014. Monografia (Graduação) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10009951.pdf>>. Acesso em: 12 maio 2017.

REIN, P. *Cane sugar engineering*. Berlim: Bartens, 2007.

RIBEIRO, V. S. et al. Propriedades físicas de produtos agrícolas. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 4, n. 1, p. 61-67, 2002.

SANTOS, A. M. M. *Dimensionamento de um secador de milho com 60 t/dia de capacidade*. 2011. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/61356/1/000148820.pdf>>. Acesso em: 5 mar. 2017.

SARTORI, J. A. S. *Cinética química do decaimento de cor ICUMSA de caldo de cana-de-açúcar por reação de oxidação com peróxido de hidrogênio em reatores de fase homogênea*. 2014. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11141/tde-19032014-163240/pt-br.php>>. Acesso em: 10 maio 2017.

SHINTANI, C. H.; YASUDA, F. *Estudo da utilização do biodiesel na geração de vapor para a agroindústria*. 2006. Monografia (Graduação) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <[http://www.mecanica-poliusp.org.br/wp-content/uploads/2014/02/TCC\\_013\\_2006.pdf](http://www.mecanica-poliusp.org.br/wp-content/uploads/2014/02/TCC_013_2006.pdf)>. Acesso em: 15 mar. 2017.

SILVA, D. P. *Estudo econômico do período de duração da safra de cana de açúcar na produção de açúcar e álcool para usinas de médio porte da região centro-sul do Brasil*. 2007. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Mauá, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2007. Disponível em: <<http://maua.br/files/dissertacoes/22.pdf>>. Acesso em: 5 mar. 2017.

SILVA, G. C. et al. Estudo da aplicabilidade das equações de Kern para trocadores de calor em escala reduzida. In: CONIC – SEMESP, 1., 2013, Campinas. *Anais...* Santos, 2013.

VIAN, C. E. F. *Agroindústria canavieira: estratégias competitivas e modernização*. Campinas, São Paulo: Átomo, 2003.

VIEIRA, J. R. *Reestruturação do proálcool e continuidade da produção de álcool combustível no Brasil*. 1999. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

Recebido em 5/12/2017

Aprovado em 20/12/2017