



Exacta

ISSN: 1678-5428

exacta@uninove.br

Universidade Nove de Julho

Brasil

Carvalho Gomes de, Giovani; Chau Jen, Lin

Estudo técnico-econômico de projetos para cozimento de frutas cristalizadas com a utilização de
vapor dágua

Exacta, núm. 2, novembro, 2004, pp. 69-89

Universidade Nove de Julho

São Paulo, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81000206>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

re&alyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe , Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

Estudo técnico-econômico de projetos para cozimento de frutas cristalizadas com a utilização de vapor d'água*

Giovani Gomes de Carvalho

Bacharel em Engenharia de Produção Mecânica – UNINOVE.
giovaniig@bauducco.com.br

Lin Chau Jen

Doutor em Engenharia – Escola Politécnica (USP); Pesquisador do IPT-SP;
Professor de Engenharia de Produção Mecânica – UNINOVE.
linchau@ipt.br

Resumo

Este estudo de caso técnico-econômico demonstrou qual, entre três projetos construtivos, apresenta maior economia no consumo de vapor d'água para aquecimento de tachos destinados ao cozimento de frutas cristalizadas na indústria alimentícia. A análise térmica foi enfatizada para determinar a forma construtiva ideal do equipamento necessário ao processo. Foram comparadas três formas de uso do vapor d'água para o aquecimento dos tachos: 1. utilização de vapor na forma direta, injetando-o diretamente no interior do tacho; 2. utilização de vapor na forma indireta, aquecendo a mistura por meio de encamisamento do tacho; 3. utilização de vapor na forma indireta aquecendo a mistura do tacho pela circulação do vapor por serpentina imersa ao tacho. O estudo de caso foi baseado na operação real de uma empresa que utiliza o vapor na forma indireta que, preenchendo o volume do encamisamento do tacho, é encaminhado como rejeito quando purgado. A análise partiu do cálculo da demanda de energia necessária para o ciclo de cozimento das frutas. A seguir, para cada forma de uso de vapor d'água, calculou-se a vazão de vapor necessária e o custo financeiro para sua obtenção. O estudo mostrou que não há diferença significativa entre os processos que utilizam o vapor de forma indireta, e que o processo com injeção direta de vapor d'água é muito mais econômico, isto é, uma redução financeira de 59,4%.

Palavras-chave

Análise econômica. Cozimento. Energia. Transferência de calor. Vapor.

* Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), sob orientação de Lin Chau Jen. Engenharia de Produção Mecânica (2003) – UNINOVE.

CARVALHO, Giovani Gomes de; JEN, Lin Chau. Estudo técnico-econômico de projetos para cozimento de frutas cristalizadas com a utilização de vapor d'água. *Exacta*. v. 2, p. 69-89. São Paulo: UNINOVE, nov. 2004.



Technical economic study of projects for cooking crystallized fruits by using water steam

Abstract

This technical economic study shows the results of three constructive projects, and which one is more economically viable concerning the water steam consumption for heating pans of candied fruits in a food industry. The thermal analysis was emphasized on to determine the ideal constructive form of the necessary equipment for the process. Three forms of water steam use were compared for the heating of the pan: the use of the steam in a direct form, injecting the steam directly inside the pans, the use of the steam in an indirect form, heating the mixture by envolving the pan, and the steam use in an indirect form, heating the mixture by inserting a steam circulating coil in the pan. The study was based on an actual operation of an industry which uses steam in an indirect form. The steam was discharged after use. The analysis calculated the energy amount necessary for the fruits cooking cicle. After that, for each form of steam use, it was calculated the necessary steam rate and the cost to get it. The study shows that there is not a significant difference between the last two processes, which use steam in an indirect form, and that the use of direct water steam injection process is much more economic, with a financial reduction of 59,4%.

Key words

Cooking. Economic analysis. Energy. Heat transport. Steam.

Introdução

O processo de cozimento de frutas (f_f) tem como finalidade diminuir a acidez e a salinidade, além de aumentar a maciez das frutas, proporcionando a abertura dos poros para a penetração do açúcar invertido (açúcar líquido), efetuando-se, assim, a cristalização das frutas. Em nosso estudo, tal processo foi utilizado em laranja, casca de laranja, limão, mamão e cidra.

1. Metodología

O método utilizado para a constatação do projeto mais econômico em relação ao consumo de vapor de água (a), para aquecimento dos tachos de cozimento para frutas, foi a análise térmica de cada uma das configurações dos tachos.

1.1. O processo com a utilização do tacho encamisado

Cada tacho recebe 450 litros (L) de fruta e é completado com 700 L d'água.

O cozimento das frutas ocorre em três etapas:

- 1) A temperatura da mistura (_m) é de aproximadamente 25°C (temperatura ambiente) e o volume ocupado do tacho é de 1.150 L de mistura. Abre-se então a válvula de liberação de entrada de vapor. Nessa primeira etapa (₁), a mistura deve atingir 90°C, permanecendo nessa temperatura por 30 minutos. Após esse intervalo de tempo, despejamos a água processada e completamos a capacidade do tacho com água nova, à temperatura ambiente;
 - 2) Inicia-se a segunda etapa (₂) do cozimento. Deve-se agora atingir a temperatura de 80°C, efetuando-se o cozimento da mistura por 20 minutos. Novamente, após o intervalo de cozimento, despejamos a segunda água processada e completamos a capacidade do tacho com água, à temperatura ambiente;
 - 3) Na terceira etapa (₃), a mistura deve atingir 60°C e permanecer nessa temperatura por dez minutos.

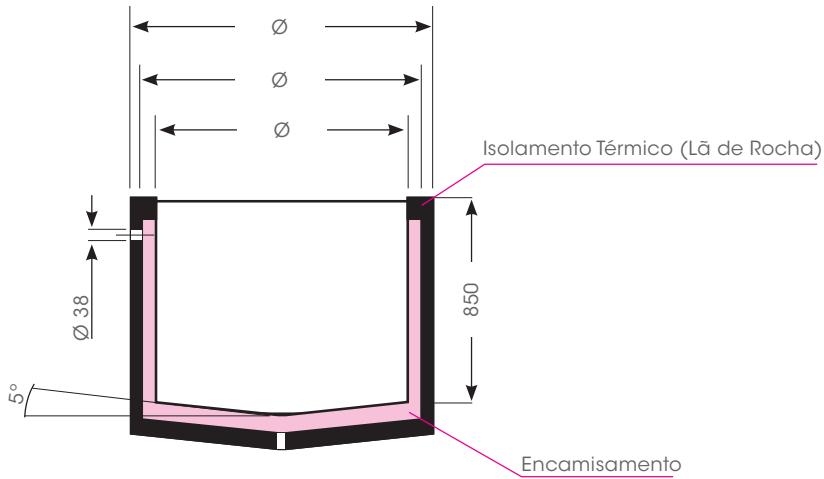


Figura 1 - Características do tacho encamisado.

Fonte: elaboração própria.

1.2. O tacho com camisa (ou encamisado)

Iniciando-se o estudo, vamos executá-lo conforme descrito nas etapas 1, 2 e 3.

1.2.1. Primeira etapa

Verifica-se que, na primeira etapa, a quantidade de energia (Q) necessária para elevar a temperatura da mistura de 25°C para 90°C será de:

$$Q_{m1} = Q_f + Q_a \Rightarrow Q_{m1} = 286 \text{ MJ}$$

em que Q_f e Q_a representam a quantidade de energia necessária para elevar as temperaturas da fruta e da água, respectivamente. Essa quantidade foi estimada, utilizando-se coeficientes de calor específico para a fruta e para a água.

Determinaremos a seguir as taxas e trocas de calor da camisa de vapor para o interior do tacho. As resistências térmicas (Incropera; De Witt, 2003, p. 61) em torno da camisa de vapor estão ilustradas na Figura 2.

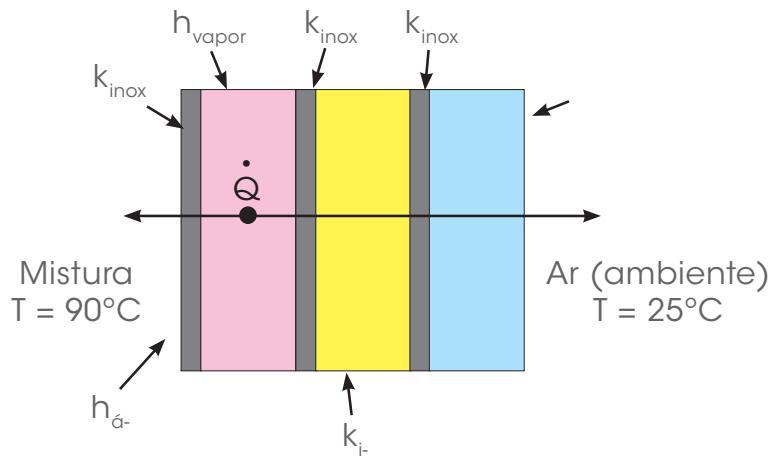


Figura 2 – Resistências térmicas das paredes do tacho.

Fonte: Elaboração própria.

Portanto, a resistência térmica (R_q) que o fluxo de calor encontrará para aquecer a mistura será de:

$$R_q = \frac{1}{A \cdot h_{\text{água}}} + \frac{L_{\text{inox}}}{A \cdot k_{\text{inox}}} + \frac{1}{A \cdot h_{\text{vapor}}}$$

Obs.: coeficiente de convecção (h); coeficiente de condução (k); área de troca de calor (A); espessura da camada de condução ($L_{\text{camada de condução}}$).

Atribuindo-se valores típicos aos coeficientes de troca de calor (KREITH; BOHN, 2003, p. 16), chega-se a:

$$R_q = 0,004228^{\circ}\text{C}/\text{W}$$

A taxa de troca de calor do vapor para o interior do tacho não é constante porque a temperatura da mistura fruta+água varia, enquanto a temperatura do vapor se mantém constante. Essa taxa será máxima ($_{\text{MÁX}}$) quando a diferença entre essas temperaturas for também máxima.

Assim, a taxa de transferencia de calor (\dot{q}_q) será de:

$$\dot{q}_{\text{MÁX}} = 331,2 \text{ kW}$$



Efetuando-se o mesmo procedimento, verificaremos agora a taxa mínima ($\dot{q}_{MÍN1}$) de transferência de calor que será transmitido à mistura, considerando que esta atingiu a temperatura necessária para o início do processo, ou seja, 90°C:

$$\dot{q}_{MÍN1} = 177,4 \text{ kW}$$

Com o valor da taxa mínima de transferência de calor, podemos estimar quanta energia será necessária para a manutenção (Q_{MAN1}) da mistura por 30 minutos à temperatura de 90°C ideal para o primeiro cozimento (t_{1C}).

$$Q_{MAN1} = 319,3 \text{ MJ}$$

A partir daí, podemos determinar o valor total de energia necessário para que o primeiro cozimento se efetue:

$$Q_{1C} = Q_{m1} + Q_{MAN1} \Rightarrow Q_{1C} = 605,3 \text{ MJ}$$

Com os valores das taxas máxima e mínima de transferência de calor definidos, temos condições de verificar também a taxa média ($\dot{q}_{MÉD1}$) de transferência calor, ou seja:

$$\dot{q}_{MÉD1} = 254,3 \text{ kW}$$

Define-se, então, a variação de tempo (Δt) para que a mistura eleve sua temperatura de 25°C para 90°C.

$$\Delta t_1 = \frac{Q_{m1}}{\dot{q}_{MÉD1}} \Rightarrow \Delta t_1 = 19,14 \text{ min.}$$

1.2.2. Segunda etapa

Para iniciar-se a segunda etapa do processo, deve-se efetuar um balanço energético, pois a água do primeiro cozimento é despejada e o tacho completado novamente com o mesmo volume. No entanto, a nova

água estará com a temperatura ambiente, contra a temperatura de 90°C da fruta no interior do tacho, isso em razão do primeiro cozimento. Assim, a temperatura inicial (T_i) da segunda etapa será:

$$T_{i2} = 46,8^{\circ}\text{C}$$

Efetuaremos o procedimento anterior para a análise de consumo de energia para o segundo cozimento ($_{2C}$), elevando-se a temperatura de 46,8°C para 80°C.

$$Q_{m2} = Q_f + Q_a \Rightarrow Q_{m2} = 146,1 \text{ MJ}$$

Determinam-se os valores das taxas máxima e mínima de transferência de calor para as novas condições de temperatura. Com isso, tem-se:

$$\dot{q}_{\text{MÁX?}} = 281 \text{ kW}$$

$$\dot{q}_{\text{MÍN}^2} = 202 \text{ kW}$$

Assim, podemos definir a taxa média de transferência de calor para a segunda etapa do processo:

$$\dot{q}_{M\acute{E}D^2} = 241 \text{ kW}$$

Obtém-se, dessa forma, a quantidade necessária de energia para manter o patamar de aquecimento da temperatura para o segundo cozimento:

$$Q_{MAN_3} = 241,8 \text{ MJ}$$

Na seqüência, definimos a quantidade total de energia para efetuar a segunda etapa de cozimento das frutas:

$$Q_{2C} = Q_{m2} + Q_{MAN2} \Rightarrow Q_{2C} = 387,8 \text{ MJ}$$

Define-se, então, o tempo gasto para a mistura elevar sua temperatura de 46,8°C para 80°C, por meio de:

$$\Delta t_2 = \frac{Q_{m2}}{\dot{q}_{MED2}} \Rightarrow \Delta t_2 = 10,12 \text{ min.}$$

1.2.3. Terceira etapa

Efetuando-se o procedimento da etapa anterior, define-se, pelo balanço energético, a temperatura inicial da mistura na terceira etapa, ou seja, após a troca da segunda água de cozimento.

$$T_{i3} = 43,46^\circ\text{C}$$

A quantidade de energia necessária para aquecer a mistura de 43,46°C até 60°C é:

$$Q_{m3} = Q_f + Q_a \Rightarrow Q_{m3} = 72,8 \text{ MJ}$$

Os valores para taxa de transferência de calor, máxima, mínima e média, são:

$$\dot{q}_{MÁX3} = 289 \text{ kW}$$

$$\dot{q}_{MÍN3} = 249 \text{ kW}$$

$$\dot{q}_{MÉD3} = 268,5 \text{ kW}$$

A quantidade de energia necessária para efetuar o terceiro cozimento é:

$$Q_{MAN3} = 148,9 \text{ MJ}$$

$$Q_{3C} = Q_{m3} + Q_{MAN3} \Rightarrow Q_{3C} = 221,6 \text{ MJ}$$

O tempo de aquecimento da mistura de 43,46°C até 60°C é:

$$\Delta t_3 = \frac{Q_{m3}}{\dot{q}_{MÉD3}} \Rightarrow \Delta t_3 = 5,29 \text{ min}$$

1.2.4. Ciclo

A partir dos parâmetros calculados, pode-se representar o processo de cozimento por meio do gráfico da Figura 3:

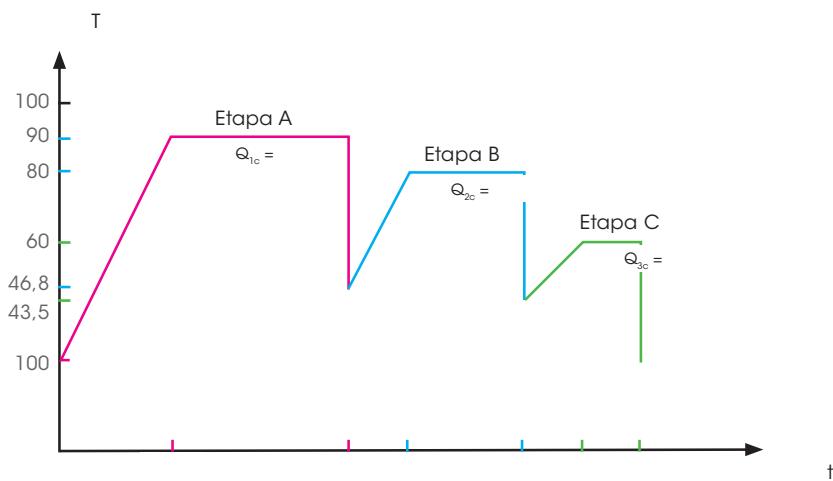


Figura 3 – Gráfico do processo: ciclo total de cozimento.

Fonte: Elaboração própria.

Analizando o gráfico da Figura 3, verifica-se que o tempo total para se efetuar o processo nas três etapas de cozimento será de 95 minutos ou 1 hora e 35 minutos, com um consumo total de energia de 1.214,7 MJ.

A resistência térmica da troca de calor do vapor para o ambiente (_{amb}), observando-se a figura 2, é:

$$R_{q(amb)} = \frac{1}{A \cdot h_{vapor}} + \frac{L_{inox}}{A \cdot k_{inox}} + \frac{L_{isolante}}{A \cdot k_{isolante}} + \frac{L_{inox}}{A \cdot k_{inox}} + \frac{1}{A \cdot h_{ar}}$$

Atribuindo valores típicos para os coeficientes de troca de calor, chega-se a:

$$R_{q(amb)} = 0,2296^{\circ}C/W$$

A taxa de troca de calor do vapor para o ambiente é constante, considerando-se constante a diferença da variação de temperatura (ΔT) do vapor e do ambiente. Essa taxa é:

$$\dot{q}_{\text{amb}} = \frac{\Delta T}{R_{q(\text{amb})}} \Rightarrow \dot{q}_{\text{amb}} = 609,8 \text{ W}$$

Portanto, em todo o ciclo (ciclo), teremos uma perda de calor para o ambiente de:



$$\dot{Q}_{\text{amb}} = \dot{q}_{\text{amb}} \cdot \Delta t_{\text{ciclo}} \Rightarrow \dot{Q}_{\text{amb}} = 3,48 \text{ MJ}$$

Obs.: $\Delta t_{\text{ciclo}} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$

O consumo total (Q_{TOT}) de energia, considerando as perdas para o ambiente, será de:

$$Q_{\text{TOT}} = Q_{\text{amb}} + Q_{\text{ciclo}} \Rightarrow Q_{\text{TOT}} = 1.218,2 \text{ MJ}$$

Obs.: $Q_{\text{ciclo}} = Q_1 + Q_2 + Q_3$

A energia acima será fornecida pelo vapor. A vazão de vapor necessária pode ser calculada, considerando que o vapor d'água entra na camisa como vapor saturado e sai como líquido saturado, sempre à pressão do interno da camisa. Assim, a energia que o vapor fornece ao tacho e ao ambiente é sua entalpia de vaporização (\dot{m}_v).

Dessa forma, a vazão de vapor para esse processo é:

$$\dot{m}_v = 372,30 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \Rightarrow \dot{m}_v (\text{ANO}) = 15.636,8 \frac{\text{t}}{\text{ano}}$$

1.3. Realização do processo com a utilização do tacho com serpentina

No novo arranjo a ser considerado, uma serpentina será imersa no tacho e a mistura (fruta+água) receberá, através dessa serpentina (s), a energia necessária para passar pelo processo de cozimento. A disposição de enrolamento vertical da serpentina se dará acompanhando as paredes do tacho, formando uma superfície lateral de um cilindro oco. O espaço central desse cilindro permitirá as operações manuais de homogeneização da mistura.

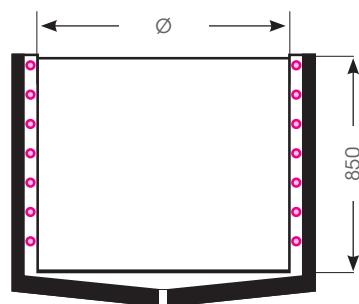


Figura 4 - Configuração do tacho com serpentina.

Fonte: Elaboração própria.

A representação das resistências térmicas na região próxima à serpentina, pode ser vista na Figura 5:

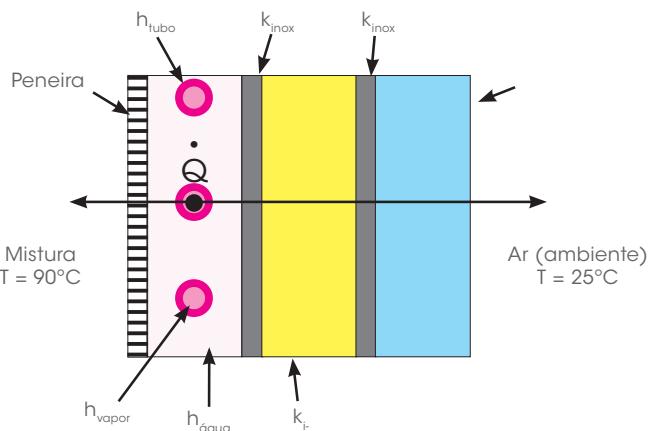


Figura 5 – Resistências térmicas das paredes do tacho com serpentina.

Fonte: Elaboração própria.

1.4. Consumo de vapor do tacho com serpentina

Já vimos que a quantidade de energia Q_{TOT} necessária para o cozimento das frutas com o tacho encamisado é de 1.218,2 MJ . Portanto, o procedimento adotado anteriormente, para análise térmica do tacho com utilização de aquecimento por camisa, será o mesmo adotado para o tacho com a utilização de serpentina.

Como fixamos o dimensionamento do tacho encamisado, vamos obter o mesmo valor de resistência térmica para a passagem de calor ao meio externo, ou seja:

$$R_{g(amb)} = 0,2296^{\circ}C/W$$

A resistência térmica que a parede do tubo de cobre oferece à passagem do fluxo calorífico do vapor para o interior do tacho é de:

$$R_s = 0,000284^{\circ} C / W$$

Pode-se calcular o fluxo calor que será fornecido ao meio externo durante todo o ciclo:



Primeira etapa: $\dot{q}_{\text{amb}} = \frac{\Delta T}{R_{q(\text{amb})}} \Rightarrow \dot{q}_{\text{amb}} = 283,1 \text{ W}$

Segunda etapa: $\dot{q}_{\text{amb}} = \frac{\Delta T}{R_{q(\text{amb})}} \Rightarrow \dot{q}_{\text{amb}} = 239,5 \text{ W}$

Terceira etapa: $\dot{q}_{\text{amb}} = \frac{\Delta T}{R_{q(\text{amb})}} \Rightarrow \dot{q}_{\text{amb}} = 152,5 \text{ W}$

Com esses valores, registra-se uma taxa média de transferência de calor e, com isso, define-se a quantidade de energia que será despendida para o ambiente, durante todo o ciclo:

$$\dot{q}_{\text{MÉD (ambiente)}} = 248,4 \text{ W}$$

Pode-se determinar a taxa média de transferência de calor para a mistura:

$$\dot{q}_{\text{MÉD (mistura)}} = 213,1 \text{ kW}$$

Portanto, teremos uma taxa média de transferência de calor para o ciclo de:

$$\dot{q}_{\text{MÉD (ciclo)}} = \dot{q}_{\text{MÉD (ambiente)}} + \dot{q}_{\text{MÉD (mistura)}} \Rightarrow \dot{q}_{\text{MÉD (ciclo)}} = 213,3 \text{ kW}$$

A vazão mássica de vapor a ser consumida para se efetuar o ciclo de cozimento será de:

$$\dot{m}_v = 371,7 \text{ kg/h}$$

$$\dot{m}_v (\text{ANO}) = 15.611,4 \text{ t/ano}$$

Podemos verificar que há menor perda de energia do tacho para o meio ambiente, pois a diferença de temperatura é menor, por causa da diferença de temperatura da mistura em relação à temperatura ambiente. No caso do tacho encamisado, essa diferença se dá entre a temperatura do vapor e a do ambiente (considerando-se iguais as áreas e a espessura do

isolamento que reveste o tacho ou a camisa). Quantitativamente, isso se traduz nas taxas de inversão de calor trocadas com o ambiente. Enquanto no tacho encamisado essa taxa é de 609,75 W, no tacho com serpentina é de 248,34 W. No entanto, a diferença na taxa de troca de calor para o ambiente é praticamente desprezível, perto da taxa que o vapor d'água deve fornecer à mistura de frutas com água, de 213 kW.

A Figura 6 procura fazer uma representação gráfica dos destinos da energia fornecida pelo vapor. Observe que o ramo mais delgado representa, no máximo, 0,3% da potência total fornecida pelo vapor, e que a diferença entre os projetos do tacho encamisado e com serpentina está situada nesse ramo.

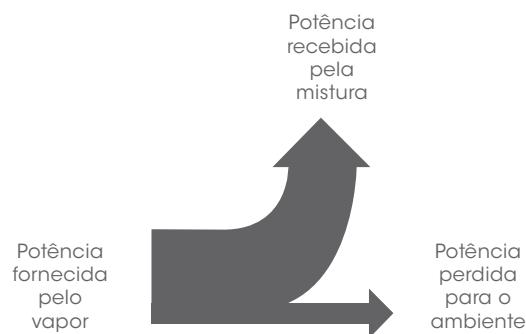


Figura 6 – Dissipação de energia.

Fonte: Elaboração própria.

Assim, é insignificante a economia no consumo do vapor ao substituir o tacho encamisado pelo tacho com serpentina.

1.5. Realização do processo com a utilização do tacho com injeção direta

Para essa análise, por existir condensação do vapor, vamos, a princípio, adotar um volume de mistura menor no interior do tacho, para completá-lo com essa condensação. Adotamos o volume inicial de 1.016 L, sendo 450 L de frutas e o restante, 566 L, de água.

A resistência térmica que o tacho oferece à transferência de calor para o meio externo é exatamente igual ao que vimos para o tacho com serpentina, ou seja, $R_{q(amb)} = 0,2296^{\circ}C/W$. O tacho com injeção direta de vapor terá de suprir também a perda de calor para o ambiente, o que nos

leva a efetuar também esse estudo por partes. Num primeiro momento, veremos quanto de calor o ambiente receberá, durante o ciclo de cozimento, desde o aquecimento da mistura.

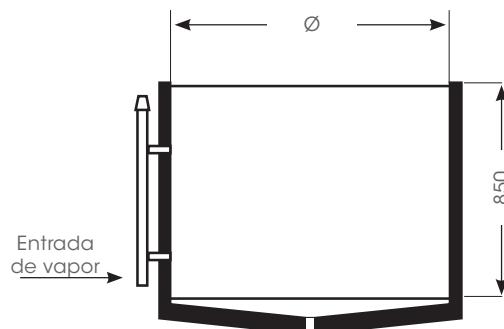


Figura 7 - Configuração do tacho com injeção direta.

Fonte: Elaboração própria.

A energia necessária para aquecer a mistura de 1.016 L é de:

$$Q_f = m_f \cdot c_f \cdot \Delta T \Rightarrow Q_f = 96,1 \text{ MJ}$$

$$Q_a = m_a \cdot c_a \cdot \Delta T \Rightarrow Q_a = 153,6 \text{ MJ}$$

$$Q_m = Q_f + Q_a \Rightarrow Q_m = 249,7 \text{ MJ}$$

A quantidade de energia dissipada para o ambiente durante a primeira etapa será de:

$$\dot{q}_{amb} = \frac{\Delta T}{R_{q(amb)}} \Rightarrow \dot{q}_{amb} = 283,1 \text{ W}$$

$$Q_{amb} = \dot{q}_{amb} \cdot \Delta t_i \Rightarrow Q_{amb} = 834,7 \text{ kJ}$$

Para conseguirmos os valores de vazão em massa de vapor necessário à efetuação do processo – ou seja, massa de vapor de aquecimento (m_{va}) – vamos considerar que a massa de vapor que condensará será igual ao valor de massa de vapor a ser injetado no fundo do tacho. Portanto, a equação que esboça essa condição será:

$$m_{va1} = \left[\frac{Q_m}{(u_v - u_{ls}) \cdot 1.000} \right]$$

em que a energia interna específica do vapor (u_v), à pressão da caldeira (7 bar) e a energia interna específica do líquido saturado (u_{ls}), à pressão ambiente. Aplicando os valores, chega-se a:

$$m_{va1} = 133,09 \text{ kg}$$

Tem-se a injeção de outra quantidade de massa de vapor de manutenção (m_{vm}) da temperatura da mistura a 90°C, conforme a equação:

$$m_{vm1} = \left[\frac{Q_{amb}}{(u_v - u_{ls}) \cdot 1.000} \right]$$

$$m_{\text{vm1}} = 0,4529 \text{ kg}$$

Verificamos que a massa total [final] de água será de:

$$m_{TOT1} = m_a + m_{va1} + m_{vm1} \Rightarrow m_{TOT1} = 700 \text{ kg}$$

Para a segunda etapa do processo, vamos efetuar o procedimento anterior, verificando que o volume de água a ser despejado no interior do tacho será de 630 L. Portanto, a quantidade de energia necessária a efetuar a segunda etapa do processo será o somatório da quantidade de energia liberada pela fruta com a quantidade de energia liberada pela injeção de vapor:

$$Q_f = m_f \cdot c_f \cdot \Delta T \Rightarrow Q_f = 14,8 \text{ MJ}$$

$$Q_a = m_a \cdot c_a \cdot \Delta T \Rightarrow Q_a = 144,7 \text{ MJ}$$

$$Q_m = Q_f + Q_a \Rightarrow Q_m = 159,5 \text{ MJ}$$

A quantidade de energia fornecida para o ambiente, na segunda etapa, será de:

$$\dot{q}_{\text{amb}} = \frac{\Delta T}{R_{a(\text{amb})}} \Rightarrow \dot{q}_{\text{amb}} = 239,5 \text{ W}$$



$$Q_{amb} = \dot{q}_{amb} \cdot \Delta t_2$$

$$Q_{amb} = 434 \text{ kJ}$$

A massa de vapor injetado na mistura para a segunda etapa será:

$$m_{va2} = \left[\frac{Q_a - Q_f}{(u_v - u_{ls}) \cdot 1.000} \right]$$

$$m_{va2} = 69,25 \text{ kg}$$

$$m_{vm2} = \left[\frac{Q_{amb}}{(u_v - u_{ls}) \cdot 1.000} \right]$$

$$m_{vm2} = 0,231 \text{ kg}$$

$$m_{TOT2} = m_a + m_{va2} + m_{vm2} \Rightarrow m_{TOT2} = 700 \text{ kg}$$

Para a terceira etapa, segue-se com o mesmo procedimento, porém o volume de água a ser acrescentado nesta etapa será de 664 L:

$$Q_f = m_f \cdot c_f \cdot \Delta T \Rightarrow Q_f = 29,5 \text{ MJ}$$

$$Q_a = m_a \cdot c_a \cdot \Delta T \Rightarrow Q_a = 97 \text{ MJ}$$

$$\dot{q}_{amb} = \frac{\Delta T}{R_{q(amb)}} \Rightarrow \dot{q}_{amb} = 152,5 \text{ W}$$

$$Q_{amb} = \dot{q}_{amb} \cdot \Delta t_3 \Rightarrow Q_{amb} = 144 \text{ kJ}$$

$$m_{va3} = \left[\frac{Q_a - Q_f}{(u_v - u_{ls}) \cdot 1.000} \right]$$

$$m_{va3} = 35,98 \text{ kg}$$

$$m_{vm3} = \left[\frac{Q_{amb}}{(u_v - u_{ls}) \cdot 1.000} \right]$$

$$m_{\text{vm3}} = 0,0765 \text{ kg}$$

$$m_{TOT3} = m_a + m_{va3} + m_{vm3} \Rightarrow m_{TOT3} = 700 \text{ kg}$$

Portanto, o consumo de vapor para que o processo de cozimento se efetue em três etapas será de:

$$m_{va} = m_{va1} + m_{vm1} + m_{va2} + m_{vm2} + m_{va3} + m_{vm3} \Rightarrow m_{va} = 239,52 \text{ kg}$$

$$\dot{m}_v = \frac{m_{va} \cdot 60}{\Delta t_{ciclo}} \Rightarrow \dot{m}_v = 151,23 \text{ kg/h}$$

$$m_{v(ANO)} = 6.351,66 \text{ t/ano}$$

Percebe-se uma economia muito significativa na vazão de vapor d'água necessária para esse processo em relação aos anteriores. Essa economia pode ser explicada por meio da observação dos rejeitos energéticos dos três processos. Nos processos com o tacho encamisado e com serpentina, os rejeitos energéticos são os associados à água de mistura das frutas, que é despejada ao fim de cada etapa de cozimento, e à vazão de água que sai da camisa ou da serpentina, na forma de líquido saturado, à pressão do vapor de 7 bar. No processo com injeção direta de vapor, o único rejeito energético é o associado à água de mistura das frutas, já que o vapor d'água injetado se incorpora a essa mistura.

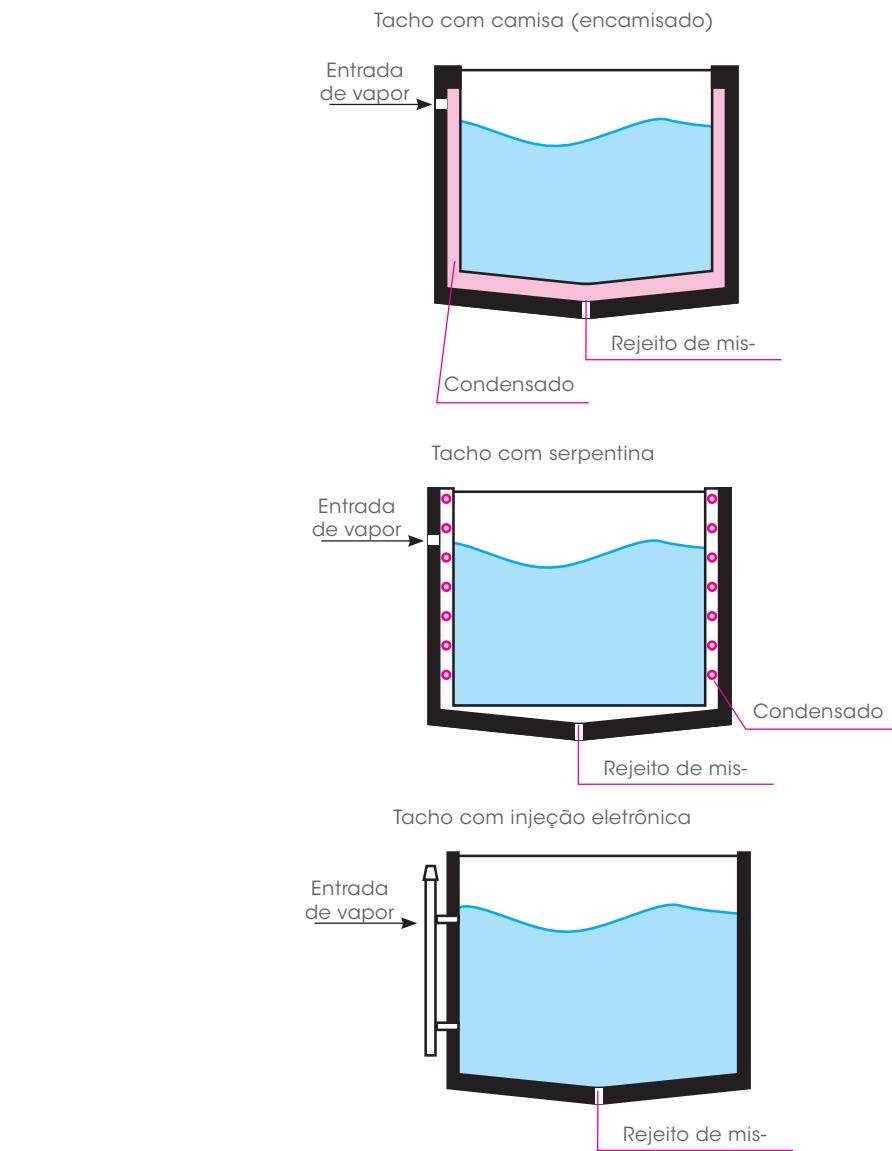


Figura 8 – Rejeitos energéticos.

Fonte: Elaboração própria.

Está subentendido nessas considerações que o vapor d'água injetado tem características que permitem pô-lo em contato com as frutas que se destinam a consumo humano. Essa hipótese pode não ser verdadeira, dependendo da qualidade da água e do tratamento para condicioná-la ao processo da caldeira. Nesse caso, a economia com injeção direta representa aproximadamente o limite que processos de troca de calor realizados com camisa ou serpentina de vapor podem alcançar. Esse limite será alcançado se, nos processos com camisa ou serpentina de vapor d'água, o

líquido condensado puder ser reenviado para a caldeira, aproveitando-se seu conteúdo energético. Dessa maneira, o rejeito energético das frutas será unicamente aquele associado à água de mistura das frutas, como é o caso do cozimento com injeção direta.

2. Análise econômica

2.1. Custo do consumo de gás natural para o tacho encamisado

Com o consumo de $1.340.280 \frac{\text{kg}}{\text{mês}}$ de vapor, constataremos que o consumo de vapor [gás natural] (\dot{Q}_v) em relação à energia associada será de:

$$\dot{Q}_+ = \dot{m}_+ \cdot (h_v - h_l)$$

em que h_v e h_L são, respectivamente, as entalpias específicas do vapor saturado à pressão da caldeira e a do líquido [água líquida] à pressão atmosférica e à temperatura ambiente.

$$Q_v = 3.144 \cdot 10^6 \text{ MJ/mês}$$

$$\bullet \quad \frac{\bullet}{\text{v}_g} = \frac{\bullet}{\text{PCI}_g} \Rightarrow \text{v}_g = 79,8 \cdot 10^3 \text{ m}^3 / \text{mês}$$

Obs.: poder calorífico inferior do gás (PCI_g)

Com o custo do gás (C_g) em 0,738 reais (R\$) por metro cúbico (m³), podemos verificar que, por ano (ANO), teremos um gasto de combustível para a caldeira em:

$$C_{ANO} = 12 \cdot \frac{\bullet}{V_g} \cdot C_g$$

$$C_{\text{ANO}} = 706.768,48 \text{ R\$/ano}$$

2.2. Custo do consumo de gás natural para o tacho com a utilização de serpentina

Adotando-se o método do item anterior, encontraremos, a seguir, o valor do consumo de energia, o consumo de gás (\dot{Q}_v) por mês, e o custo anual relativo ao consumo do gás para a aplicação estudada.

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_v \cdot (h_v - h_i) \Rightarrow \dot{Q}_v = 3,13 \cdot 10^6 \text{ MJ/mês} \Rightarrow \dot{v}_g = \frac{\dot{Q}_v}{\text{PCI}_g}$$

$$\dot{v}_g = 79,7 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$$

$$C_{\text{ANO}} = 12 \cdot \dot{v}_g \cdot C_g \Rightarrow C_{\text{ANO}} = 705.629,44 \text{ R\$/ano}$$

Tabela 1 – Comparativa de valores

Projeto	Consumo de vapor t/ano	Consumo de gás natural m^3/ano	Custo do gás natural $\text{R\$}/\text{ano}$
Tacho encamisado	15.612	925.575	706.768
Tacho com serpentina	15.364	924.083	705.629
Tacho com injeção direta	6.352	375.973	287.093

Fonte: Elaboração própria.

2.3. Custo do consumo de gás natural para o tacho com a utilização de injeção direta de vapor

Com o consumo de 544.428 kg/mês de vapor, constataremos que o consumo de energia, gás natural e o custo anual serão de:

$$\dot{Q}_v = \dot{m}_v \cdot (h_v - h_i) \Rightarrow \dot{Q}_v = 1.277 \cdot 10^6 \text{ MJ/mês} \Rightarrow \dot{v}_g = \frac{\dot{Q}_v}{\text{PCI}_g}$$

$$\dot{v}_g = 34,2 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$$

$$C_{ANO} = 12 \cdot \dot{V}_g \cdot C_g \Rightarrow C_{ANO} = 287.092,66 \text{ R\$/ano}$$

Conclusão

A tabela a seguir apresenta o resumo dos valores característicos para cada um dos processos estudados:

Hoje a indústria alimentícia utiliza, para o processo de cozimento de frutas cristalizadas, cinco tachos com a configuração de camisa no aquecimento da mistura. Conforme verificamos na Tabela Comparativa, o consumo de vapor d'água por ano é duas vezes e meia maior que o da configuração com injeção direta. Isso quer dizer que o custo de consumo de gás natural gerado pelo tacho encamisado é 59,4% maior que o custo com o consumo de gás natural produzido pelo tacho com injeção direta.

Descarta-se a possibilidade de uso do tacho com serpentina para aquecimento da mistura, pois a economia gerada em comparação ao tacho encamisado para o custo do consumo de gás natural é apenas de 0,2%. Além disso, existem outros complicadores para o seu uso, como sua confecção e principalmente sua manutenção.

Referências

KREITH, F.; BOHN, M. S. *Princípios da transferência de calor*. Trad. 6. ed. Americana. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

INCROPERA, F. P.; DE WITT, David P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 5. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003.