

ALTERNATIVAS NA UTILIZAÇÃO DE VAPOR VEGETAL ORIUNDO DA EVAPORAÇÃO DE CALDO EM USINA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL – UM ESTUDO DE CASO

Márcio Higa – Universidade Estadual de Maringá - mhiga@uem.br
Rafael Vendrame G. Luiz – Universidade Estadual de Maringá - rafaelvgl@gmail.com

Resumo: A redução do consumo de energia dentro da indústria sucroalcooleira é cada vez mais importante no setor, pois possibilita a comercialização de excedente energético em forma de potência elétrica ou de bagaço. Além dos principais produtos, açúcar e álcool, esta comercialização tem se tornado uma fonte adicional significativa nas receitas financeiras para as empresas do setor. No processo de fabricação deste tipo de planta, as maiores demandas de energia estão nas operações de concentração do caldo de açúcar durante a evaporação e cozimento e na destilação para obtenção de álcool. No caso da evaporação, além de consumir a maior quantidade de energia do processo, a operação ocorre em um sistema de múltiplos efeitos que possibilita a extração (sangria) e o aproveitamento de vapor vegetal gerado durante a concentração do caldo como fonte de calor em outras operações. Realizando-se uma integração térmica, esta medida reduz o consumo global de energia do processo. Um estudo de caso em uma usina de açúcar e álcool, localizada no Paraná, é apresentado neste trabalho. Foram simuladas algumas alternativas na utilização do vapor vegetal da evaporação no cozimento e na destilação visando verificar o consumo térmico global, sendo possível a redução de até 10% de vapor no processo.

Palavras-chave: Integração térmica, análise *pinch*, cana-de-açúcar, vapor.

ALTERNATIVES FOR THE USE OF VEGETAL VAPOR FROM THE EVAPORATION OPERATION IN SUGAR AND ALCOHOL MILL – A CASE STUDY

Abstract: The reduction of the energy consumption in the sugar and alcohol industry is more and more important in the sector, because it makes possible the surplus energy trading in condition of electric power or bagasse. Besides the main commodities, sugar and alcohol, this trade has become an additional and significant income source for the companies in the sector. In the production process of this plant type, the largest energy demands are in the sugarcane juice concentration operations during the evaporation and crystallization, and for alcohol separating in the distillation. In the case of evaporation, besides the largest energy consumption in the process, the operation occurs in a multiple effects system that makes possible the extraction (bleeding) and the use of vegetal vapor generated during the juice concentration as heat source in other operations. Accomplishing a thermal integration, this reduces the global energy consumption of the process. A case study in a sugar and alcohol mill, located in Paraná, is presented in this work. Some alternatives for the use of vegetal vapor from the evaporation in the crystallization and in the distillation were simulated in order to verify the global thermal consumption. Reduction of up to 10% of steam in the process is possible.

Key-words: Thermal integration, pinch analysis, sugarcane, vapor

1. Introdução

A principal fonte de energia em uma usina de açúcar e álcool é o bagaço, co-produto da extração do caldo da cana, que é utilizado como combustível em caldeiras. O vapor de alta pressão gerado nas caldeiras aciona os turbogeradores, as turbomoendas e as turbobombas, e sai destas turbinas com pressão e temperatura baixas, mas suficientes para ser utilizado como fonte de calor no processo de produção do açúcar e álcool. Caso o consumo de vapor no processo de produção seja maior do que o consumo das turbinas na geração de potência, o vapor de alta pressão pode passar através de uma válvula redutora de pressão para atingir a temperatura de operação desejada na produção de açúcar e álcool (Figura 1). Entretanto, esta medida é uma opção indesejada do ponto de vista termodinâmico, pois este vapor perde exergia, que é a capacidade deste fluido realizar trabalho.

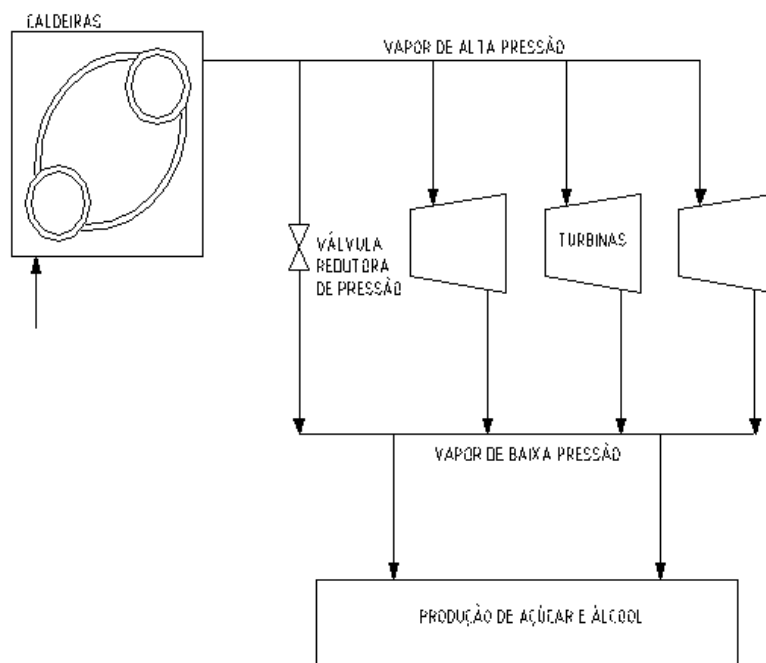


Figura 1 – Esquema de cogeração em usina de açúcar e álcool

Considerando-se esta sequência no uso do bagaço e vapor, o consumo de energia térmica é muito importante para a operação equilibrada deste tipo de planta. Um consumo excessivo pode ocasionar inclusive a falta de bagaço, o que acarretaria a alteração dos níveis de produção açúcar/álcool de forma indesejada e a limitação da taxa de moagem. Por outro lado, a redução do consumo de energia térmica no processo de produção possibilita a indústria economizar e comercializar o excedente de bagaço *in natura* ou em forma de energia elétrica.

Além dos aspectos econômicos, o consumo racional de energia na planta também é importante na questão ambiental, pois implica em menores emissões atmosféricas no caso de venda do bagaço *in natura*. No caso da geração de energia elétrica e exportação do excedente, o uso de outros combustíveis não renováveis pode ser reduzido.

No processo de fabricação deste tipo de planta, as maiores demandas de energia estão nas operações de aquecimento e concentração do caldo para a formação do xarope utilizado no cozimento do açúcar durante a evaporação e cozimento e na destilação para obtenção de álcool. No caso da evaporação, além de consumir a maior quantidade de energia do processo, a operação ocorre em um sistema de Evaporador de Múltiplos Efeitos (EME) que possibilita a extração (sangria) e o aproveitamento de vapor vegetal (VV) gerado durante a concentração do caldo como fonte de calor em outras operações.

O evaporador em que o caldo escoar em sentido ascendente em tubos verticais enquanto evapora, também conhecido como *Roberts* em homenagem a seu inventor, é o mais utilizado atualmente nas usinas brasileiras (Figura 2). De forma geral, cada unidade de massa de vapor vegetal gerada na concentração de caldo demanda a mesma quantidade de vapor de processo (escape) como de fonte de calor. Assim, para cada unidade de massa de vapor vegetal aproveitado como fonte calor, ocorre praticamente a redução da mesma quantidade de consumo de vapor de escape, e como consequência de economia de bagaço.

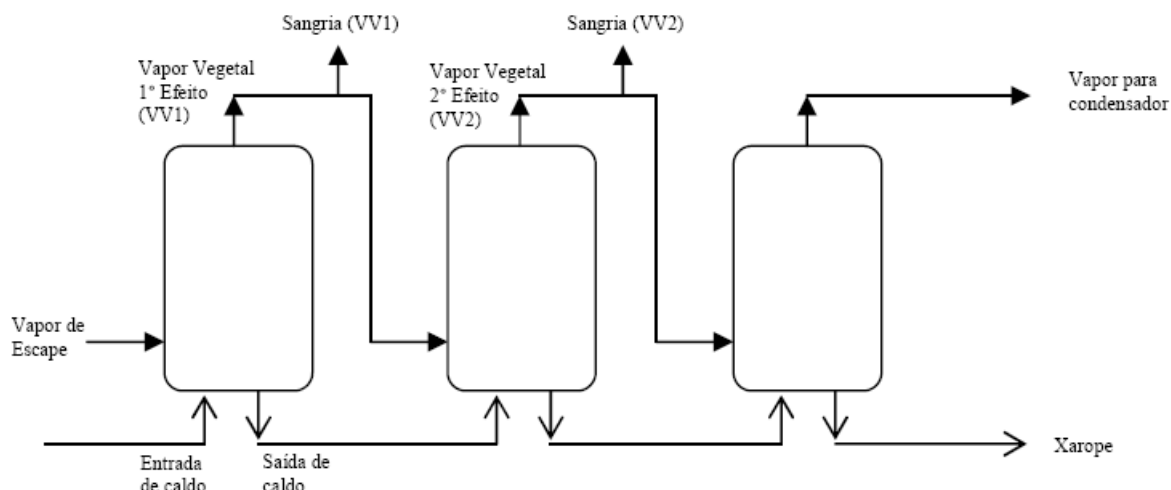


Figura 2 – Esquema da evaporação em múltiplos efeitos

O sistema de evaporação possibilita vários arranjos. Pode-se utilizar diferentes números de efeitos, assim como existe a possibilidade de se efetuar sangrias de vapor vegetal entre efeitos diferentes como fonte de calor para outras operações do processo. Esta medida permite que o vapor vegetal gerado pelo 1º efeito (VV1) seja destinado apenas ao 2º efeito ou seja extraído parcialmente e utilizado como fonte quente em outra operação. Este recurso de extração pode ser efetuado também nos efeitos posteriores, sendo que a sangria de vapor vegetal nos últimos efeitos da evaporação tende a reduzir o consumo global do processo (PAZ & CÁRDENAS, 1997; HIGA *et al.*, 2009). Um limite ao uso do vapor vegetal como fonte de calor é que nos últimos efeitos do equipamento, a sua temperatura e pressão encontram-se mais reduzidas do que do vapor de escape, impedindo a sua utilização em demandas que requerem temperaturas mais elevadas. Assim, a sangria de vapor deverá ser executada nos últimos efeitos possíveis, mas respeitando-se as temperaturas requeridas pelo processo.

Neste trabalho analisa-se o impacto do uso de vapor vegetal de diferentes efeitos no cozimento e na destilação, duas das maiores consumidoras de calor de uma usina. Para isso, realiza-se um estudo de caso para uma planta situada na região noroeste do Estado do Paraná. Para se verificar os consumos de vapor necessários em cada etapa da produção, aplica-se a Primeira Lei da Termodinâmica, determinando-se as demandas de energia. Com o intuito de reduzir as irreversibilidades existentes nos processos e realizar um bom diagnóstico térmico da planta, aplicam-se também os conceitos da Segunda Lei da Termodinâmica, utilizando-se da análise *Pinch*, uma ferramenta bastante eficaz em outros estudos anteriores (CHRISTODOULOU, 1996; IBARRA & MEDELLIN, 2001).

A análise *Pinch* é um método gráfico para aplicação combinada da Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica. A menor quantidade de energia necessária ao processo é determinada por meio da integração térmica da planta, ou seja, verificando-se as potenciais fontes de energia do processo para suprirem as demandas de calor existentes.

2. Materiais e métodos

Para a realização do estudo, inicialmente verificou-se na planta os consumos energéticos reais das principais operações envolvidas no processo, assim como realizou-se os balanços de massa e energia para determinar o consumo global de vapor de processo na situação inicial de operação. Após esta etapa, utilizou-se a análise *Pinch* para verificar se é possível o uso de

vapor vegetal, proveniente de diferentes efeitos da evaporação, para realizar uma integração térmica da planta que reduza o consumo global de vapor de processo.

2.1. Análise Pinch

A análise *Pinch*, introduzida por LINNHOFF *et al* (1979), é um método de análise térmica que combina a Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica para realizar de forma indireta os balanços de energia e exergia em redes de trocadores de calor. As curvas compostas e a grande curva composta, representadas na Figura 3, são ferramentas gráficas que possibilitam a visualização simplificada de todas operações de transferência de calor de uma planta industrial.

A primeira ilustração da Figura 3 demonstra a sobreposição de uma corrente térmica quente sobre outra fria, limitada por uma diferença mínima de temperatura (ΔT_{\min}). O intervalo sobreposto é a máxima recuperação de calor possível, enquanto os intervalos nos extremos indicam os mínimos de utilidades quente ($Q_{H\min}$) e fria ($Q_{C\min}$) necessárias para atender estas demandas. Quanto mais próximas as curvas estiverem, maiores serão as possibilidades de recuperação de calor. Assim, quanto menor o ΔT_{\min} , maior será a recuperação de energia, porém as áreas necessárias para atender a transferência de calor também deverão aumentar. O ΔT_{\min} é escolhido pelo projetista verificando-se o compromisso entre o custo de energia e de capital. Uma das possibilidades para determinação do ΔT_{\min} é a manutenção do parâmetro encontrado na planta, uma vez que já indica o equilíbrio entre economia de energia e investimentos que são praticados.

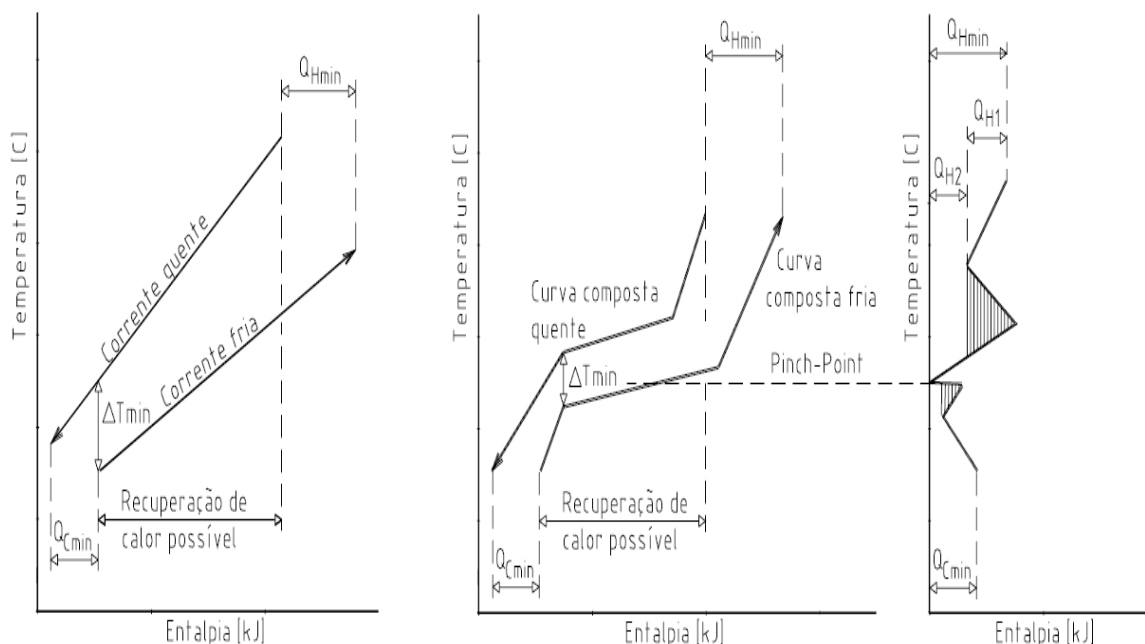


Figura 3 – Correntes térmicas, curvas compostas e grande curva composta (Fonte: HIGA *et al*, 2005)

Esta integração térmica é simples quando se trata de apenas duas correntes, tornando-se mais complexas quando o número de correntes aumenta, o que pode ser realizado através das curvas compostas da análise *Pinch*. A idéia de curva composta nada mais é do que combinar em apenas uma todas as correntes quentes, e em outra todas as correntes frias de um processo. Isto é feito através da somatória da capacidade térmica das correntes em cada nível de

temperatura, resultando nas curvas compostas quente e fria, conforme ilustra a segunda ilustração da Figura 3. Da mesma forma que na curva tradicional, as curvas compostas determinam a máxima recuperação de calor, bem como os mínimos de utilidades quente e fria necessárias ao processo.

A diferença mínima de temperatura (ΔT_{\min}) é novamente o ponto limite de aproximação entre as curvas, e é o *pinch-point*. Ele divide o processo em duas regiões, uma acima do *pinch*, chamada *sumidouro*, pois precisa de calor adicional, e por esta razão as correntes quentes devem fornecer todo calor disponível para as correntes frias e não devem ser resfriadas por utilidades externas; e a região abaixo do *pinch*, chamada *fonte de calor*, pois dispõe de mais energia do que necessita, e assim as correntes frias devem receber calor apenas das correntes quentes, sem receber calor de utilidades externas.

A grande curva composta (GCC), terceira ilustração da Figura 3, é a combinação das duas curvas compostas, a quente e a fria, transformadas em uma única. A vantagem da grande curva composta é a possibilidade de se observar melhor onde o processo deve trocar calor com as utilidades e onde ele pode satisfazer a própria demanda, como demonstram as áreas escuras da figura. Quando se têm mais de uma utilidade (utilidades em múltiplos níveis de temperaturas), torna-se possível a escolha de cada uma delas com base no nível de temperatura mais próxima da demanda, o que diminui as irreversibilidades do processo de transferência de calor.

3. Estudo de caso

O estudo de caso deste trabalho refere-se a uma planta industrial de produção de açúcar e álcool, instalada na região noroeste do Estado do Paraná. Os dados analisados baseiam-se na safra do ano de 2009, em que a usina processou em média 355 TCH (toneladas de cana por hora).

A configuração do sistema de evaporação possui 5 efeitos, utilizando a extração de vapor vegetal (sangria) para o processo até o 3º efeito, conforme dados da Tabela 1.

Tabela 1 – Extrações de vapor vegetal (VV) para o processo na planta inicial

Sangria de VV	[kg/s]
1º Efeito (VV1)	26,8
2º Efeito (VV2)	5,0
3º Efeito (VV3)	4,4

Conforme citado anteriormente, o consumo de vapor de processo na planta inicial foi calculado via balanço de energia e também confirmado pela média da vazão registrada ao longo da safra, consumindo aproximadamente 45,1 kg/s de vapor de processo (457 kgV/TC) como fonte de calor, utilizado na pressão de saturação de 0,25 MPa. O consumo de vapor nas operações que demandam a maior quantidade de energia na planta, destilaria, massa de cozimento “A” e massa de cozimento “B” estão descritos na Tabela 2. A fonte de calor utilizada na destilação ocorre por meio de injeção direta de vapor na coluna, ou seja, o vapor de aquecimento entra em contato direto com a mistura a ser aquecida.

Tabela 2 – Consumo de vapor nas operações da destilaria e cozimento

Operação	Consumo de energia (kg/s)
Destilaria	10,0
Cozimento “A”	9,8
Cozimento “B”	3,76
Planta inicial	45,1 (457 kgV/TC)

Para a planta em estudo o vapor de alta pressão gerado nas caldeiras e fornecido para as turbinas estão à 2,2 MPa e 315°C. Como a demanda de vapor para o processo que ocorre na pressão de 0,25 MPa é maior do que o disponível pelo fornecimento na saída (escape) das turbinas, na situação inicial de operação da planta, aproximadamente 5,55 kg/s (56,3 kg/TC) de vapor passam através da válvula redutora de pressão. Desta forma, a economia de vapor de escape até este nível de demanda resultará em uma redução do consumo de combustível (bagaço) para geração de vapor.

Baseado em resultados de estudos anteriores, em que a utilização de vapor vegetal dos últimos efeitos do sistema de evaporação tende a reduzir o consumo global do processo, apresenta-se neste trabalho 4 propostas alternativas quanto ao efeito do vapor vegetal utilizado nos sistemas de cozimento A e B e de destilação (Tabela 3).

Tabela 3 – Propostas alternativas quanto à utilização de vapor vegetal

Proposta	Destilação	Cozimento A	Cozimento B
Situação Inicial	VV1	VV1	VV2
I	VV2	VV1	VV2
II	VV1	VV2	VV2
III	VV1	VV2	VV3
IV	VV2	VV2	VV3

A proposta I refere-se a utilização de vapor vegetal oriundo de sangria do segundo efeito da evaporação (VV2), ao invés do vapor vegetal do primeiro efeito (VV1) utilizado inicialmente. Para a adoção desta medida, é importante que se garanta a pressão mínima requerida pelo processo de destilação. Na planta em estudo, a pressão manométrica é de 50 kPa (500 mm.c.a), ou seja, a temperatura de saturação do vapor vegetal utilizado deve estar no mínimo em torno de 111° C.

Atualmente, o cozimento de açúcar de massa A, ou de *primeira* utiliza vapor vegetal do primeiro efeito da evaporação (VV1). A alternativa da proposta II é a utilização do vapor vegetal do segundo efeito (VV2) nesta operação. Para que isto seja viável, deve-se verificar o tempo de operação do cozimento, pois para a usina em estudo esta etapa de produção é um limitante (gargalo) do processo,

Além da alteração do vapor vegetal utilizado no cozimento de massa “A”, a proposta III propõe alteração também para a massa “B”. A massa de primeira (A) passaria a utilizar VV2, enquanto a massa “B” utilizaria o VV3. Para esta configuração, além do tempo de operação no cozimento da massa “A”, deve-se verificar também o tempo de operação para o cozimento da massa B, em razão do cozimento estar no seu limite da capacidade de produção.

A implementação de todas as alterações citadas anteriormente, ou seja utilizar VV2 na destilaria e no cozimento de massa “A” e VV3 no cozimento de massa “B” é a proposta IV.

Na planta em estudo a diferença mínima de temperatura entre os fluidos que trocam calor (ΔT_{min}) nos trocadores de calor é de 9°C. Um estudo mais aprofundado pode até indicar diferenças de temperaturas mais baixas do que esta na comparação da relação do aumento do custo de capital e da redução de consumo de energia. Entretanto, para a aplicação da análise *Pinch* neste trabalho este valor (9°C) foi respeitado na verificação das propostas apresentadas, considerando-o como um ponto de equilíbrio termoeconômico.

4. Resultados

Para a realização da análise *Pinch*, as curvas compostas quente e fria e a grande curva composta foram construídas para cada proposta apresentada., conforme observa-se o caso da situação inicial da planta (Figuras 4 e 5). Neste caso, a diferença mínima de temperatura (9°C) entre as curvas compostas, o *pinch-point* está em 112,5°C, constatando-se um excedente de energia na região abaixo de 117° C (fonte de calor). Como nesta temperatura de 117° C da fonte de calor ocorre apenas a sangria de VV1, e verifica-se uma região entre as curvas representando grande irreversibilidade, uma forma de reduzir isso seria priorizar as sangrias de VV nos últimos efeitos da evaporação, conforme as propostas apresentadas.

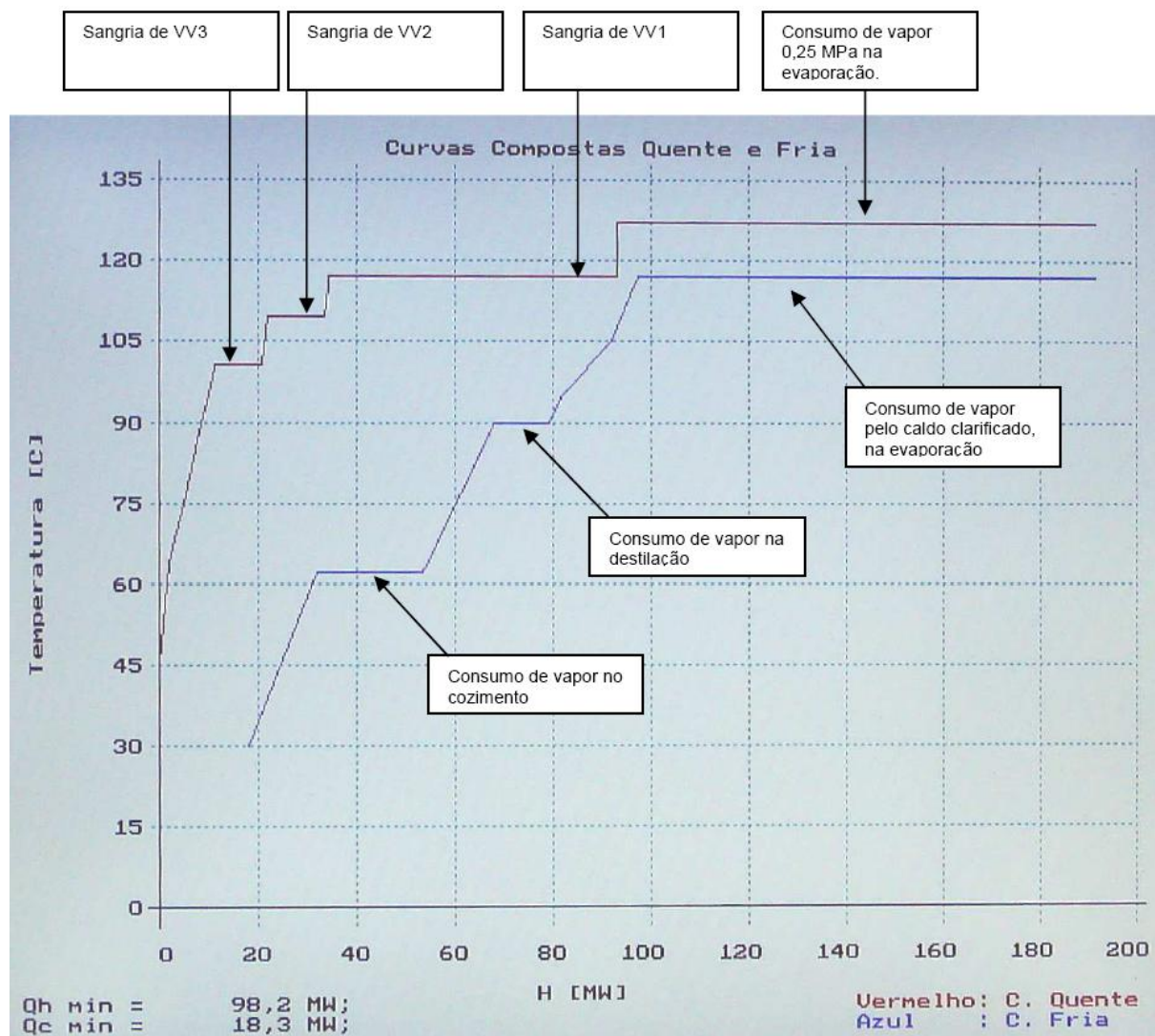


Figura 4 – Curvas compostas (CC) da situação inicial da planta

Na grande curva composta também referente à situação inicial da planta (Figura 5), observa-

se os diferentes níveis de temperatura requeridos para as fontes quentes e frias, possibilitando a escolha de fontes quentes com temperaturas mais próximas possíveis, minimizando-se irreversibilidades devido às trocas térmicas.

Para a execução de cada proposta apresentada neste trabalho, as sangrias de vapor vegetal que deverão ser realizadas foram estimadas por meio de cálculos termodinâmicos e da construção das curvas compostas da análise *Pinch* (Tabela 4). A utilização de sangria de vapor vegetal nos últimos efeitos do evaporador, além de aumentar as demandas de VV2 e VV3 em pressões menores, reduzem a demanda de VV1. Esta medida permite uma sobreposição maior da curva quente sobre a fria, aumentando a possibilidade de recuperação de calor.

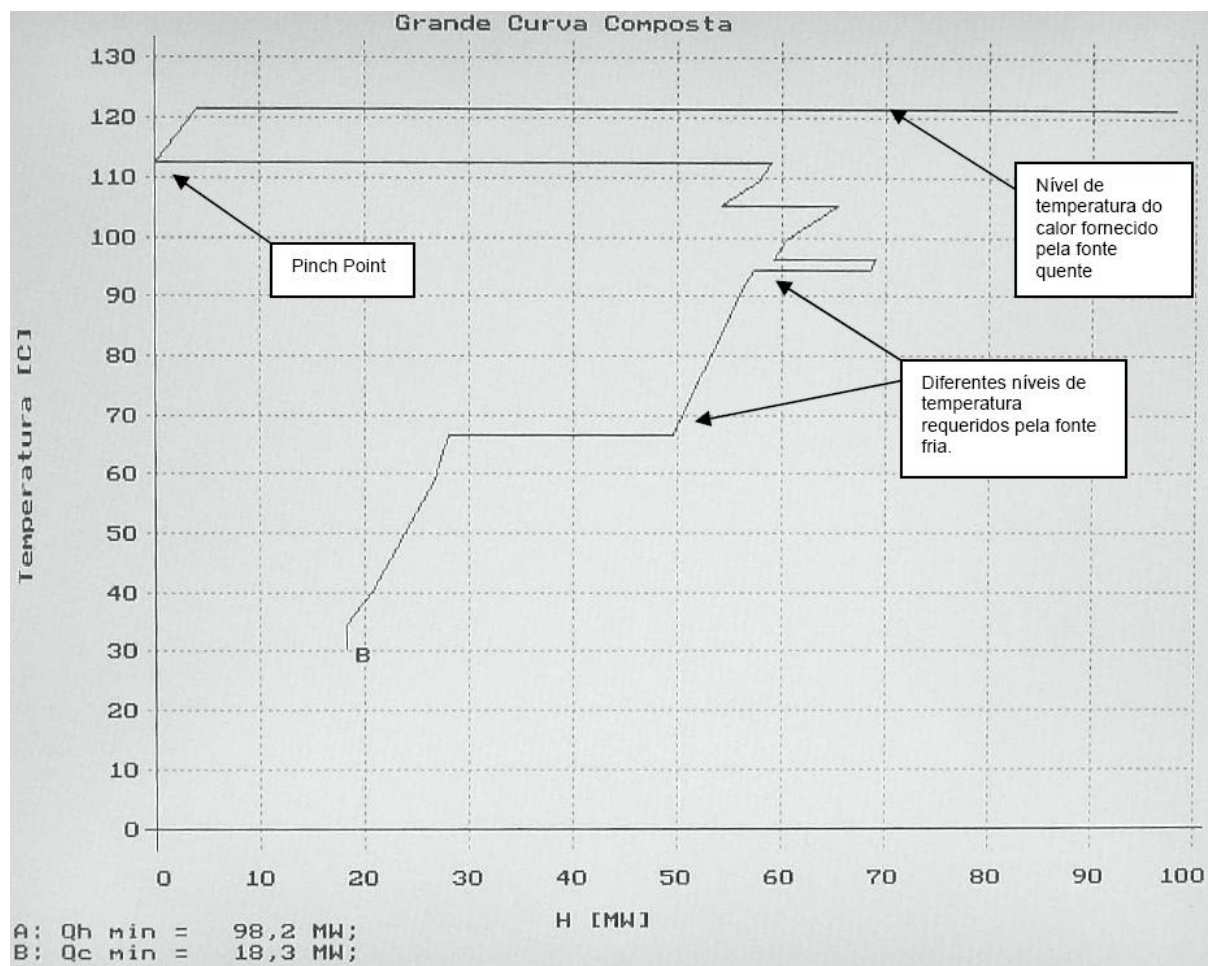


Figura 5 – Grande curva composta da situação inicial da planta

Tabela 4 – Demandas de sangrias de vapor vegetal nos efeitos do EME para cada proposta

Propostas	VV1 (kg/s)	VV2 (kg/s)	VV3 (kg/s)
Situação Inicial	26,8	5,0	4,4
I	16,8	15	4,4
II	17,0	4,8	4,4
III	17,0	11,1	8,16
IV	7,0	21,1	8,16

Para a proposta IV, utilizando VV2 para a destilação e cozimento “A” e VV3 para o cozimento “B”, as curvas composta quente e fria são apresentadas (Figura 6).

Verifica-se com certa facilidade na Figura 6, conforme mencionado anteriormente, que a redução da sangria de VV1 não inviabiliza o atendimento térmico das demandas das operações de destilação e cozimento. Isto se explica pelo fato de que o aumento das sangrias de VV2 e VV3 suprem estas demandas, conforme a curva composta quente se sobrepõe a curva composta fria. Observa-se também, que o espaço entre as curvas compostas quente e fria nesse região do gráfico foi reduzido. Ou seja, além da redução do consumo de vapor de processo, a irreversibilidade térmica decorrente da transferência de calor nesta região também se reduz, aumentando a eficiência térmica do processo global.

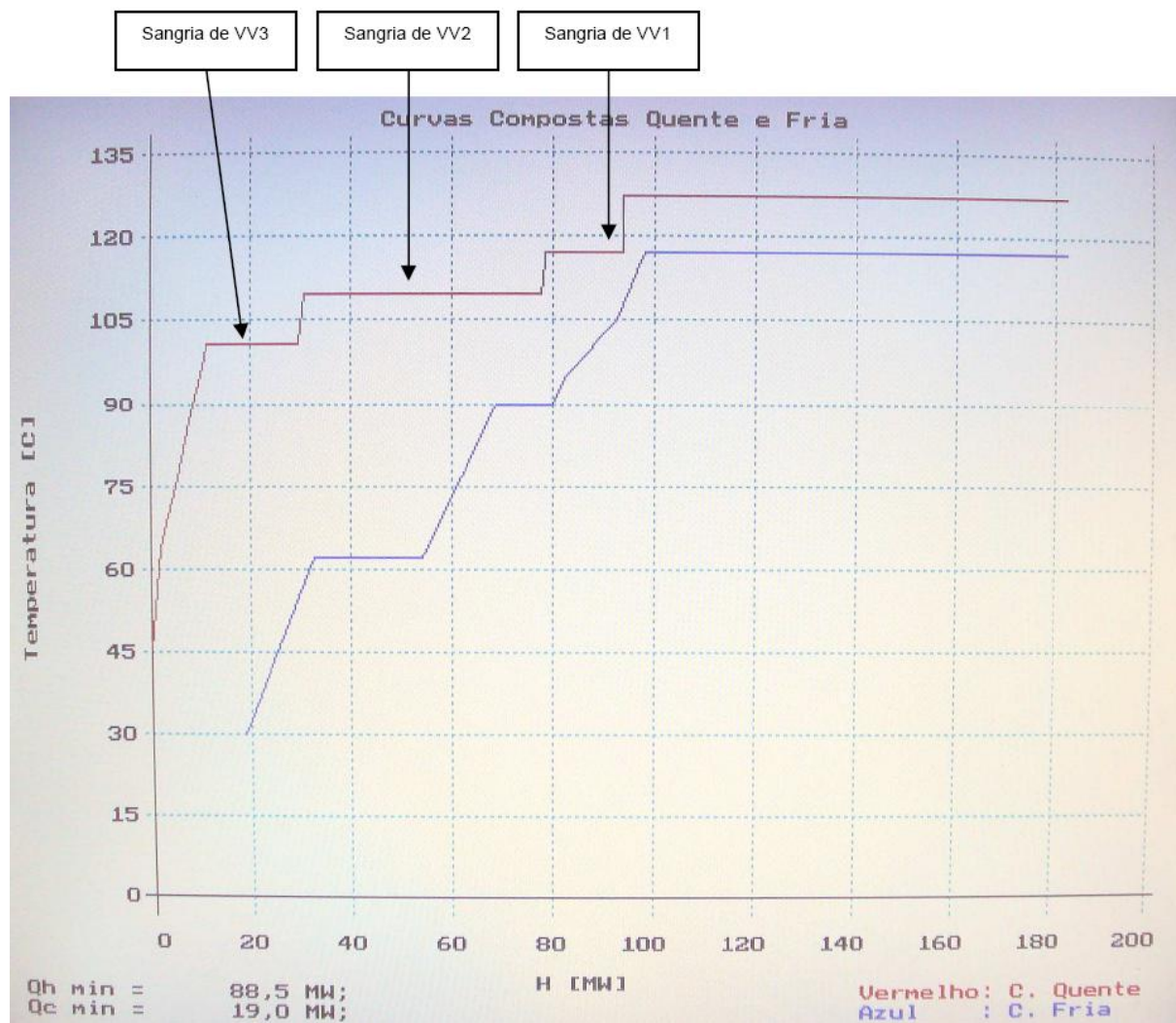


Figura 6 – Curvas compostas da proposta IV

Comparando-se as demandas de utilidade quente (vapor de processo) da situação inicial com a da proposta IV, a vazão de vapor de processo (0,25 MPa) passa de 98,2 MW para 88,5 MW, uma redução de aproximadamente 10%. Em relação a demanda de utilidade fria, a quantidade de energia disponível pela curva composta quente, abaixo do *pinch*, que precisa de fontes externas como água de resfriamento permaneceu praticamente constante, entre 18 e 19 MW, mesmo para as outras propostas em que as representações gráficas não são apresentadas neste trabalho. Isto indica que determinadas correntes térmicas do processo que precisam de resfriamento possuem carga térmica, mas estão em temperaturas baixas ou não altas o

suficiente para viabilizarem o seu aproveitamento na integração térmica do processo.

Com base nas demandas de extrações de vapor vegetal para o processo (Tabela 4), os consumos específicos global de vapor de processo, em kg de vapor saturado a 0,25 MPa, por tonelada de cana processada foram estimados para cada proposta apresentada (Tabela 5).

Tabela 5 – Consumo específico global de vapor de processo para cada proposta

Proposta	Consumo específico (kgV/TC)	Economia obtida	
		(kgV/TC)	(%)
Situação Inicial	457	-	-
I	437	20	4,4 %
II	438	19	4,2 %
III	430	27	5,9 %
IV	411	46	10,1 %

Para a proposta I, verifica-se uma economia de 20 kgV/TC (4,4%) no consumo específico de vapor de processo em relação a situação inicial. Como este valor é inferior a 56,3 kgV/TC, que passam através da válvula redutora de pressão, isto se reflete na redução da geração de vapor e de consumo de bagaço em proporção semelhante. Como o consumo de vapor no cozimento “A” é praticamente o mesmo da destilação, a economia obtida para proposta II também equivale ao da proposta I, obtendo-se a mesma redução de geração de vapor e consumo de combustível.

Além da utilização do vapor vegetal do segundo efeito (VV2) no cozimento “A”, a utilização de VV3 no cozimento “B”, conforme a proposta III, amplia a redução no consumo de vapor de processo na ordem de 5,9 %, ou seja, o consumo específico da planta ficaria em 430 kgV/TC, reduzindo 27 kgV/TC.

O agrupamento de todas as alterações na proposta IV, utilizando VV2 na destilação e cozimento “A” e VV3 no cozimento “B”, resulta no consumo específico de 411 kgV/TC. Isto representa uma economia de 46 kgV/TC (10,1%) de vapor de processo. Como este valor ainda é inferior a 56,3 kgV/TC, que passam através da válvula redutora de pressão, esta redução de consumo de vapor é a mesma necessária para a geração na caldeira e diretamente proporcional a redução no consumo de bagaço.

Para que as propostas apresentadas neste trabalho sejam implementadas, as áreas de transferência de calor em cada efeito do evaporador deverão ser suficientes para gerar o vapor vegetal para as sangrias requeridas no processo. Ao mesmo tempo, o equipamento precisa manter a sua capacidade de concentração final do xarope. Considerando-se coeficientes de transferência de calor disponíveis na literatura (IPT, 1990), foram estimadas as áreas externas requeridas para cada efeito (Tabela 6).

Tabela 6 – Áreas de transferência de calor do EME requeridas para cada proposta

Proposta	Área de transferência de calor requeridas em cada efeito					
	1° Efeito (m ²)	2° Efeito (m ²)	3° Efeito (m ²)	4° Efeito (m ²)	5° Efeito (m ²)	Total (m ²)
Situação Inicial	4.851	3.542	2.605	1.713	1.825	14.536
I	4.618	5.508	2.325	1.356	1.421	15.228
II	4.623	5.467	2.330	1.364	1.430	15.214
III	4.536	5.253	3.088	1.218	1.270	15.365
IV	4.306	7.349	2.882	799	831	16.167

5. Conclusão

A concentração do caldo de cana durante a produção de açúcar e álcool ocorre em um sistema de evaporação em múltiplos efeitos, que além de reduzir o consumo de energia na própria operação, possibilita a extração (sangria) e o aproveitamento de vapor vegetal gerado durante a concentração como fonte de calor em outras operações da planta. Uma vez que cada unidade de massa de vapor vegetal aproveitado, reduz o consumo de praticamente a mesma quantidade de vapor de processo, a sangria de vapor vegetal tende a reduzir o consumo global do processo.

Neste trabalho analisou-se o impacto do uso de vapor vegetal de diferentes efeitos do sistema de evaporação, principalmente nas operações de cozimento e de destilação em um estudo de caso de uma usina situada no Estado do Paraná. De acordo com os resultados das simulações, verificou-se que uma economia de energia pode ser alcançada priorizando-se a extração de vapor vegetal nos últimos efeitos da evaporação de caldo, conforme foi também observado e sugerido em outros trabalhos anteriores. Para este estudo, a redução do consumo de vapor de processo pode ser de até 10% se a opção for pela adoção de todas as modificações propostas, refletindo-se em proporção equivalente no consumo de bagaço de cana.

A restrição ao uso do vapor vegetal como fonte de calor é que nos últimos efeitos do sistema de evaporação, a temperatura e pressão deste vapor encontram-se mais reduzidos do que o vapor de processo normalmente utilizado, impedindo a sua utilização para demandas que operam com temperaturas mais elevadas. Na usina em estudo algumas das sugestões apresentadas neste trabalho quanto ao uso de vapor vegetal já foram testadas e não apresentaram problemas operacionais. Entretanto, a adoção de todas as modificações propostas neste estudo depende de investimentos, principalmente para aumentar a capacidade de transferência de calor dos equipamentos envolvidos. Assim, estudos quanto ao retorno destes investimentos ainda precisam ser realizados antes da sua implementação.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação Araucária.

Referências

CHRISTODOULOU-P. *Energy Economy Optimization in Separation Processes - Optimizing the Separation of Sucrose/Water and Non-Sugars*. Int. Sugar Journal, Vol. 98, n.1172, p.419-430, 1996.

IBARRA-L.F. & MEDELLÍN-A.A. *Energy Analysis os the Sugar Production Process Using Modern Techniques of Process Integration*. Zuckerindustrie Vol. 126, n.9, p.707-713, 2001.

HIGA-M., FREITAS-A.J., BANNWART-A.C. & ZEMP-R.J. *Thermal Integration of Multiple Effect*

Evaporator in Sugar Plant. Applied Thermal Engineering, Vol. 29, n.2-3, p.515–522, 2009.

HIGA-M, FREITAS-A.J & BANNWART-A.C. *Avaliação Energética em Usina de Açúcar e Álcool Utilizando a Análise Pinch. Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, Vol. 9, n.3, p.95–101, 2005.*

IPT: INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. São Paulo: *Manual de Recomendações – Conservação de Energia na Indústria de Açúcar e Álcool, 1990. 796 p.*

LINHOFF-B., MASON-D.R, WARDLE-I. *Understanding Heat Exchanger Networks. Computer and Chemical Engineering, Vol. 3, p.295-302, 1979.*

PAZ-D. & CÁRDENAS-G.J. *Análisis Exergético de un Sistema de Calentamiento-Evaporacion-Ccocimiento. Int. Sugar Journal, Vol. 99, n1182S, p.263-268/317-320, 1997.*