

## ESTUDO DO CONSUMO DE ENERGIA EM PLANTA DE AÇÚCAR USANDO OS MÉTODOS "PINCH-POINT" E PROGRAMAÇÃO LINEAR

**Márcio Higa**

**Antonio C. Bannwart**

Universidade Estadual de Campinas – FEM - Departamento de Energia

Cx. P. 6122 - 13083-970 – Campinas, SP - Brasil

***Resumo.** Através dos métodos do “pinch point” e da programação linear, foram realizadas diversas simulações da rede de recuperadores e evaporadores de múltiplo efeito de uma planta típica de produção de açúcar e álcool, visando a máxima recuperação de calor e a redução do consumo de vapor. As simulações foram divididas em dois grupos. No primeiro, usou-se o método do “pinch point” para investigar a planta básica, analisando também a influência de diversas alternativas (eliminação de sangrias de vapor entre estágios de evaporação, número de efeitos de evaporação, compressão mecânica do vapor do último estágio de evaporação). No segundo grupo, empregou-se o método da programação linear a fim de determinar a distribuição otimizada das sangrias de vapor para pré-aquecimento do caldo. Diversas alternativas de grande impacto no consumo de vapor são apresentadas.*

***Palavras-chave:** Conservação de energia, Método do “pinch-point”, Programação linear, Usina de açúcar e álcool*

### 1. INTRODUÇÃO

No setor sucro-alcooleiro, as avaliações térmicas das usinas são comumente realizadas através de balanços de massa e energia conjugados a uma análise econômica dos custos de eventuais mudanças na planta. Embora com apenas estas três avaliações seja possível a realização de análises quantitativas, elas não são suficientes para uma análise qualitativa da energia utilizada, pois consideram equivalentes diferentes tipos de energia, como a térmica e a mecânica. Essas diferenças podem ser verificadas através da análise pela 2ª Lei da Termodinâmica, que indica o grau de irreversibilidade dos processos e a degradação da qualidade da energia, tornando-se portanto indispensável quando se deseja estudar o melhor aproveitamento da mesma (Paz e Cárdenas, 1997).

Procurando integrar esses quatro tipos de balanços, alguns métodos e formulações têm sido empregados, tais como: a análise exergetica, a análise termoeconômica, a programação linear e a tecnologia “pinch” (método “pinch-point”). O presente trabalho enfoca basicamente a integração térmica de uma planta típica de açúcar de cana e álcool, e não inclui planta de geração de potência. Os métodos de “pinch-point” e da programação linear foram utilizados para a avaliação dessa planta e para a inclusão de propostas de melhorias na mesma.

Essas duas ferramentas têm apresentado excelentes resultados na integração energética, mostrando-se eficazes inclusive em problemas bastante complexos, como o de uma refinaria de petróleo (Rossi e Bannwart, 1995).

## 2. MÉTODOLOGIAS ADOTADAS

### 2.1 Método do “pinch-point”

Conhecido desde 1979 através de B. Linnhoff, o “*pinch-point*” pode ser compreendido como uma forma de se aplicar simultaneamente a 1ª e a 2ª Leis da Termodinâmica. O método utiliza-se de uma representação gráfica da temperatura e entalpia através de combinações das correntes quentes e frias da planta térmica, permitindo obter o mínimo de utilidades externas necessárias ao processo e indicando também em que direção pode-se produzir uma troca de calor espontânea (Christoudolou, 1996). Além disso, possui procedimentos para minimização da área de troca de calor e do número de equipamentos utilizados.

No setor de açúcar, o método tem sido utilizado em plantas européias, via redimensionamentos de projetos visando a redução de consumo de energia na produção de açúcar derivada da beterraba (Twaite, Davenport e MacDonald, 1986; Christoudolou, 1992), e também na África, em produção de açúcar de cana (Singh, Riley e Seillier, 1997).

**Curvas compostas e o “pinch point”.** A integração térmica em um processo pode ser feita através da construção do gráfico temperatura-entalpia entre uma corrente quente e fria. Esta integração é simples quando se trata de apenas duas correntes, tornando-se mais complexa quando este número aumenta, o que pode ser realizado através das curvas compostas. 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. Isto é feito através da somatória da capacidade térmica das correntes em cada nível de temperatura, resultando nas curvas compostas quente e fria ilustradas na Fig. 1. Através do intervalo sobreposto, as curvas compostas determinam a máxima recuperação de calor para uma dada diferença mínima de temperatura permitida. Os intervalos nos extremos indicam o mínimo de utilidade quente e fria necessárias ao processo (*targets*).

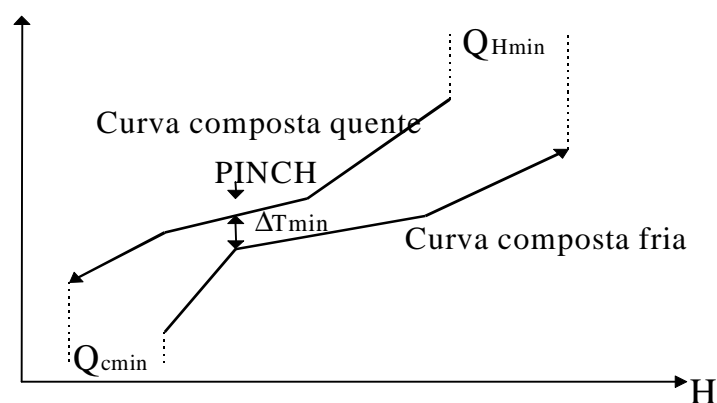


Figura 1 - Curvas compostas frias e quentes

A diferença mínima de temperatura ( $\Delta T_{min}$ ), escolhida pelo projetista de acordo com o custo do capital, fornece o ponto limite de aproximação entre as curvas (*pinch-point*). Ele divide o processo em duas regiões: a região acima do *pinch* (sumidouro), que requer calor

adicional da utilidade quente; e a região abaixo do *pinch* (fonte), que dispõe de mais energia que necessita para aquecer as correntes frias, rejeitando o excedente para a utilidade fria. É importante observar que não deve haver troca de calor entre essas regiões através do *pinch*, caso contrário haveria um aumento da demanda energética de ambas as utilidades.

## 2.2 Programação linear

Um problema de programação linear é um modelo matemático que busca a maximização ou minimização de uma função objetivo linear, através do equacionamento e resolução de um sistema de restrições também lineares, impostas ao problema. Cerda & Westerberg (1983) mostraram que a integração térmica entre correntes quentes e frias de um processo, visando maximizar a recuperação de energia (ou minimizar o consumo de utilidades), pode ser formulada como um problema de programação linear. No caso, emprega-se o algoritmo de transporte, onde da origem são feitos os fornecimentos de energia pelas utilidades e correntes quentes, enquanto no destino ocorre o recebimento pelas utilidades e correntes frias.

## 3. ANÁLISE ATRAVÉS DO MÉTODO DO “PINCH-POINT”

Antes de iniciar as análises através do método *pinch-point* foi necessário desenhar uma planta simplificada conforme a Fig. 2, contendo todas as correntes quentes e frias do processo. Esta planta não contém os aquecedores, resfriadores e recuperadores que são utilizados atualmente, deixando apenas as indicações das correntes existentes com suas respectivas cargas térmicas e níveis de temperatura, fornecidas através da Tabela 1.

Foi estudado apenas a parte da planta envolvendo o setor de produção de açúcar e a etapa inicial da produção de álcool, sendo que nas análises não foram consideradas o consumo na fermentação e na destilação na produção de álcool. O consumo de vapor de escape (utilidade quente) na situação atual é de 364,5 [kg/TC] ou 796.812 [kJ/TC]. (NOTA: TC = tonelada de cana moída).

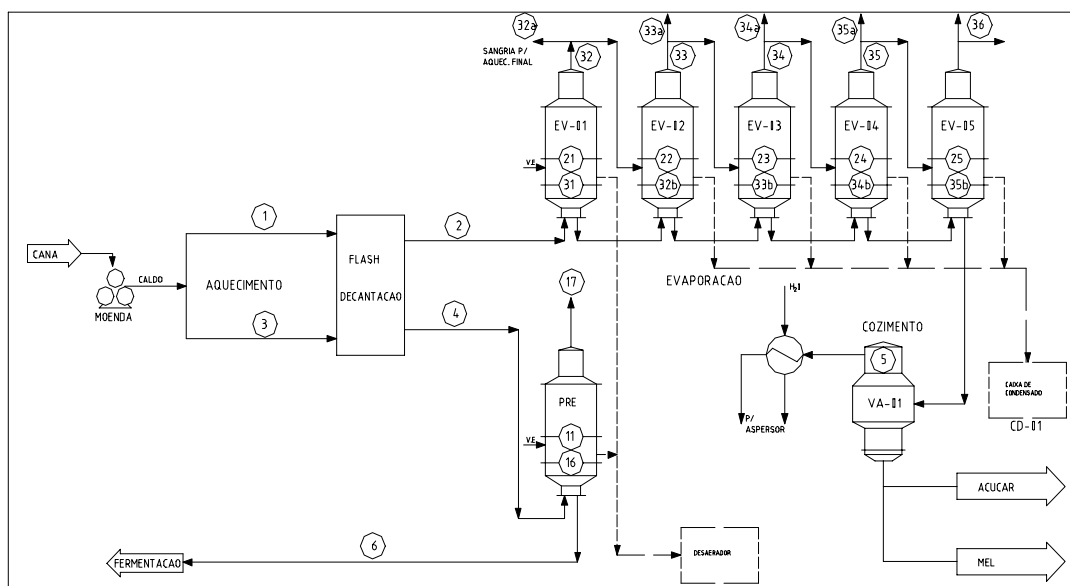


Figura 2 - Planta resumida para análise através do método *pinch-point*

Tabela 1- Dados das correntes da planta em estudo na situação atual.

Aquecimento e resfriamento do caldo

Corrente	Tipo	Temperatura [°C]		Calor Específico [kcal/kg°C]	Vazão [kg/TC]
		Inferior	Superior		
1	Fria	35	105	3,94	1200
2	Fria	98	117	3,94	991
3	Fria	35	105	3,94	1250
4	Fria	98	117	3,94	1051
6	Quente	32	117	0,95	619

Cozimento

Corrente	Tipo	Temperatura [°C]	Açúcar Produzido [kg/TC]	Consumo Específico [ton <sub>vapor</sub> /ton <sub>açúcar</sub> ]
8	Fria	62	69	2,0

Evaporação no caldo para produção de açúcar

	Temperatura [°C]		Concentração [Brix]		Vazão [kg/TC]
Entrada	115		14		991
Saída	62		58,5		237
Efeito	1	2	3	4	5
Temperatura [°C]	117	109	101	87	62
Corrente Fria	21	22	23	24	25
Vazão Mássica [kg/TC]	772	651	522	384	237
Concentração [Brix]	17,9	21,3	26,6	36,1	58,5
Corrente Quente	32	33	34	35	36
Vazão Mássica [kg/TC]	219	121	129	138	147
Corrente Sangria V. Veg	32a	33a	34a	35a	36a
Vazão Mássica [kg/TC]	106	-	-	-	-

Evaporação no caldo para fermentação

		Temperatura [°C]		Concentração [Brix]		Vazão [kg/TC]
Entrada		117		14		1051
Saída		117		23,8		619
Corrente Fria	Vazão Mássica [kg/TC]	Concentração [Brix]	Corrente Quente	Vazão Mássica [kg/TC]	Corrente Sangria V. Veg	Vazão Mássica [kg/TC]
11	619	23,8	16	432	-	-

O evaporador de múltiplo efeito considerado nas análises é de correntes paralelas, onde as correntes fria 21 e 11 recebem o calor do vapor de escape das correntes 31 e 16 respectivamente. O vapor vegetal formado nos efeitos dos evaporadores são representados pelas correntes 17, 32, 33, 34, 35 e 36. Estas correntes podem ser subdivididas e utilizadas

para a integração térmica com o restante do processo através das sangrias nas correntes 32a, 33a, 34a, 35a e 36 ou para o próximo efeito na concentração do caldo nas correntes 22, 23, 24 e 25 através das correntes 32b, 33b, 34b e 35b respectivamente. Como as correntes (32b e 22, 33b e 23, 34b e 24, 35b e 25) trocam calor entre si aos pares e não há possibilidade de integração com o restante do processo, as mesmas não foram incluídas nas análises térmicas realizadas.

Nas análises térmicas desta etapa, além das correntes integradas atualmente também foi considerada a corrente 36 constituída pelo vapor vegetal do último efeito da evaporação. Apesar de possuir uma exergia considerável, este vapor é normalmente utilizado apenas para o condensador barométrico.

Adotando o  $\Delta T_{\min} = 6^\circ \text{C}$  da planta atual, as análises térmicas foram realizadas em várias etapas, resultando nos intervalos de temperaturas de troca de calor da Fig. 3.

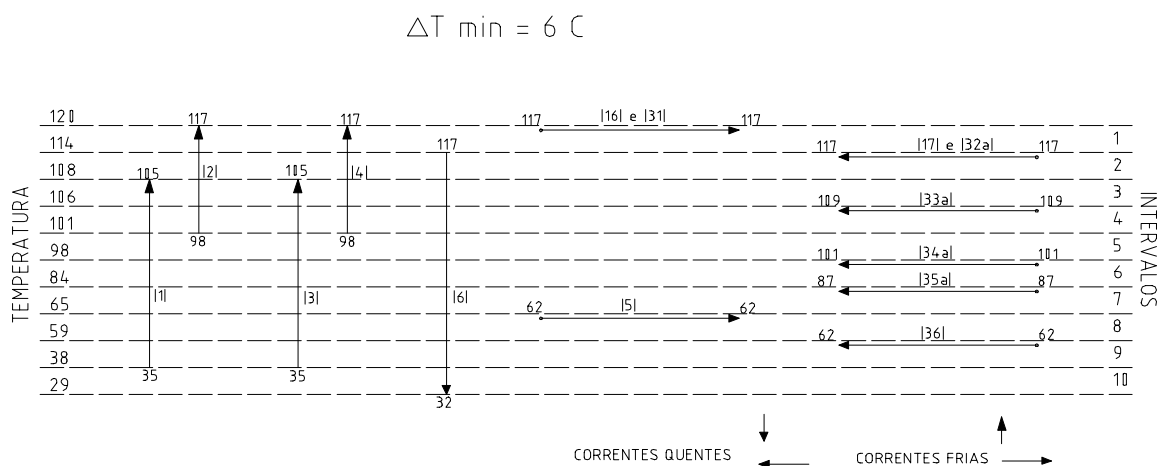


Figura 3 - Intervalos de temperaturas de troca de calor

### 3.1 Análise de “pinch-point” com o nível de sangria da planta atual

A primeira análise foi realizada com a mesma sangria praticada na situação atual, representada pela corrente 32a no evaporador. Construiu-se as curvas compostas na Fig. 4, podendo-se observar que o *pinch point* está na temperatura de  $114^\circ \text{C}$ . Consta-se, como esperado, um excedente de energia na região abaixo do *pinch* e que o consumo de vapor de escape deve ser na região com temperatura acima do *pinch*. Como acima desta temperatura opera basicamente a evaporação, quanto menor o consumo nos pré-evaporadores, menor será o consumo global da planta. Isto pode ser conseguido diminuindo ou mesmo eliminando a sangria para o aquecimento.

### 3.2 Evaporação sem sangria

Nesta análise determinou-se o consumo de vapor sem a sangria para o aquecimento no pré-evaporador da concentração de açúcar, mantendo apenas a utilização do vapor vegetal do pré-evaporador do caldo da fermentação. Os resultados indicaram uma possibilidade de redução do consumo em quase 20% dos valores atuais. Entretanto, ainda houve um excesso de vapor vegetal produzido nos pré-evaporadores, o que foi indicado pelas curvas compostas possuindo as mesmas características anteriores e pela manutenção do *pinch-point* em  $114^\circ \text{C}$ .

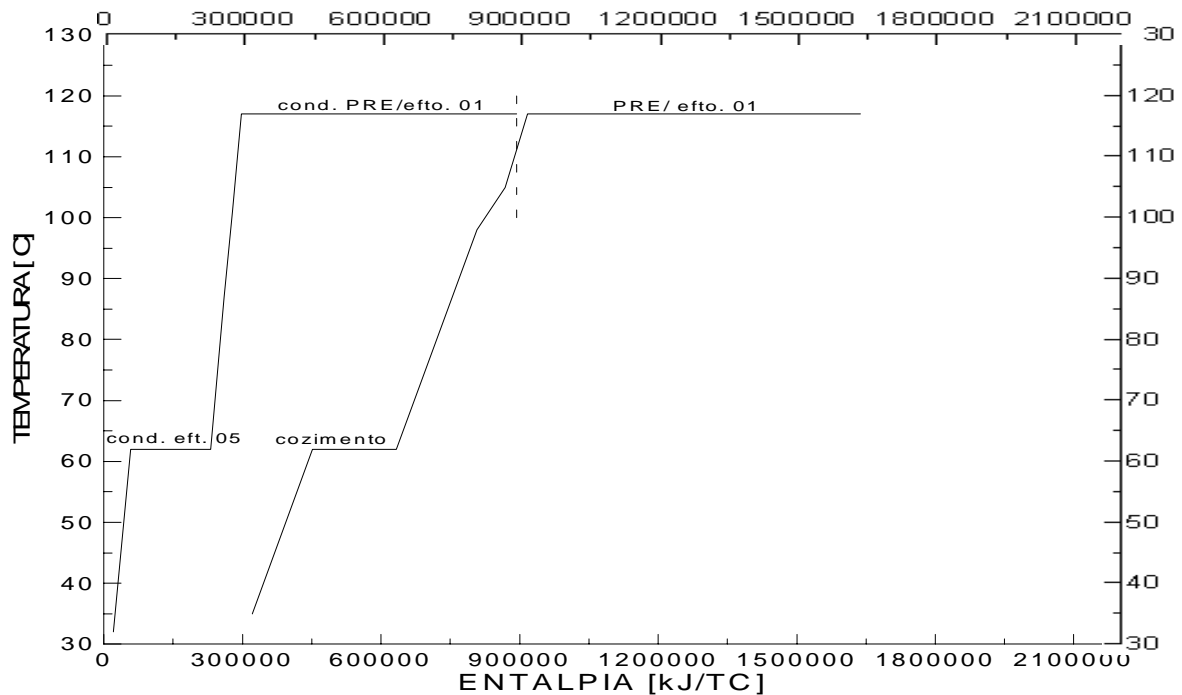


Figura 4 - Curvas compostas da planta com nível de sangria atual.

### 3.3 Acréscimo de um segundo efeito na evaporação do caldo da fermentação

Dado que a maior parte do vapor de processo consumido está na evaporação do caldo da fermentação e esta concentração é realizada em um único efeito, uma alternativa em estudo foi a colocação de um segundo efeito neste processo. Neste caso, a temperatura do caldo que sai do evaporador para a fermentação sai mais baixa, passando de  $117^{\circ}\text{C}$  para  $109^{\circ}\text{C}$ .

Analisando as novas curvas compostas (Fig. 5), observa-se que o *pinch point* passou da temperatura de  $114^{\circ}\text{C}$  para  $59^{\circ}\text{C}$ . Apesar da redução do consumo de vapor cair para 72% do valor atual, nesta nova configuração é necessário o uso de vapor de escape para outras partes além do pré-aquecimento e da evaporação, pois o vapor vegetal que anteriormente supria o resto do processo diminuiu, havendo necessidade de complementação.

Na situação em que apenas havia sido eliminada a sangria, o consumo dos pré-evaporadores e dos pré-aquecimentos usando utilidade externa (intervalos das correntes 2 e 4), representava a totalidade do consumo global, enquanto que com o acréscimo de mais um efeito, esse consumo caiu para 75% do consumo total. Ainda assim, verifica-se um excedente de calor disponível em temperaturas abaixo de  $62^{\circ}\text{C}$ , para o qual uma possível alternativa seria comprimir o vapor vegetal do último efeito elevando a sua pressão e temperatura para o aproveitamento no cozimento.

### 3.4 Compressão mecânica do vapor vegetal do último efeito

Estudou-se a alternativa de compressão mecânica do vapor vegetal do último efeito de  $62^{\circ}\text{C}$  para  $101^{\circ}\text{C}$ , na mesma temperatura do vapor do terceiro efeito. Segundo alguns autores, o uso de compressor mecânico no último efeito para a geração de vácuo seria proibitivo devido a energia necessária para a compressão, pois isto poderia ser realizado pela condensação barométrica do vapor vegetal do último efeito. Em nosso caso, entretanto, onde se deseja a utilização deste vapor como fonte térmica, o trabalho específico para esta compressão é de  $294\text{ kJ/kg}$ , enquanto a energia térmica recuperada é de  $2.483,8\text{ kJ/kg}$ . Mesmo que o processo de

compressão tenha pouca eficiência, ainda assim a recuperação é relativamente muito maior do que o trabalho fornecido (Coeficiente de Eficácia =  $qH/wc = 8,4$ ).

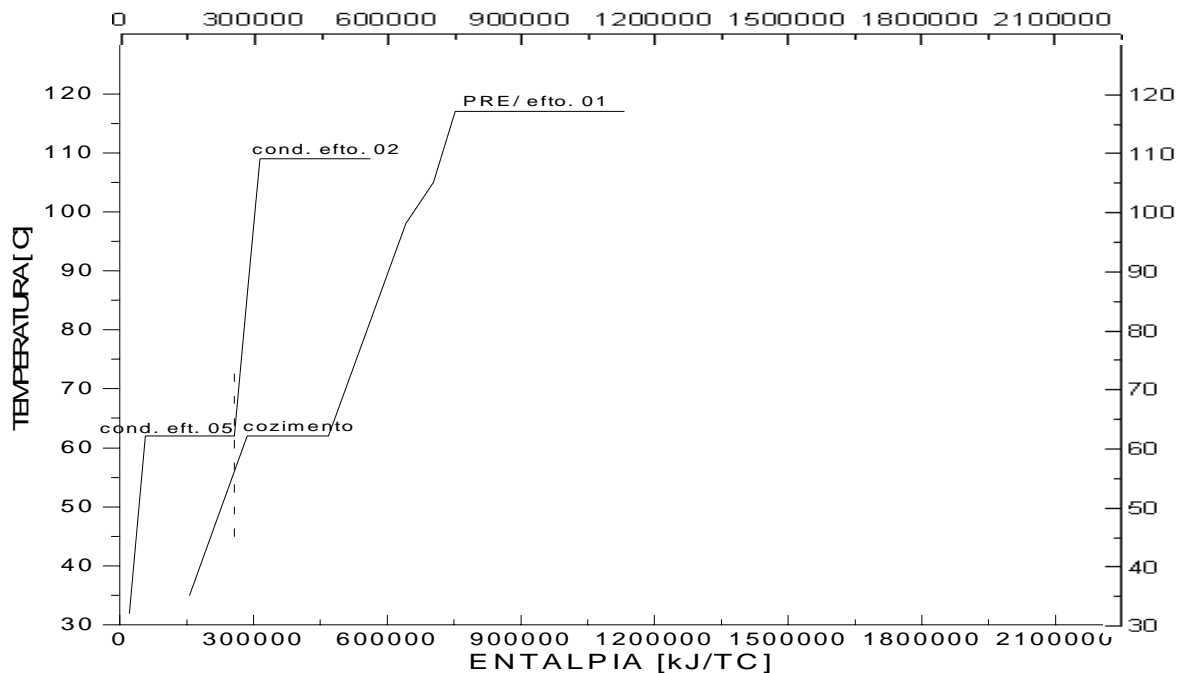


Figura 5 - Curvas compostas com segundo efeito na evaporação para fermentação.

Pelas análises através da Fig. 6, verifica-se uma sensível redução do consumo do vapor de escape, demonstrando que o segundo efeito na evaporação do caldo que vai para a fermentação é muito melhor aproveitado, se for possível a utilização do vapor vegetal do último efeito também para a troca térmica e não apenas para a geração do vácuo. O *pinch-point* na temperatura de 38° C indica a boa utilização da energia disponível.

Um quadro-resumo das alternativas analisadas com o método do *pinch point* é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Efeito das alternativas analisadas no consumo de vapor de escape na planta

	Consumo de Vapor [kg/ TC]	Carga Térmica [kJ/ TC]	Relação com consumo atual
Atual	364,5	796.812	1
Mantendo sangria atual	340,5	744.684	0,93
Retirando a sangria	297	648.949	0,81
Colocação do 2º efeito	261	570.525	0,72
Compressão mecânica V.V. final	208,5	455.400	0,57

#### 4. ANÁLISE ATRAVÉS DA PROGRAMAÇÃO LINEAR

Nos estudos através da programação linear, as correntes de evaporação foram consideradas incógnitas, sendo obtidas por meio da inclusão das equações de balanço de massa e energia dos efeitos como restrições do problema. A vantagem da inclusão desses balanços no sistema de restrições é que isso permite deixar as correntes 32a, 33a e 34a (sangrias) como variáveis a serem definidas durante a resolução do problema, determinando seu valor de

acordo com a demanda do aquecimento do caldo. O número de correntes e intervalos do esquema observado na Fig. 10, ficaram conforme a Fig. 9. As correntes quentes horizontais representam apenas os vapores vegetais correspondentes às sangrias.. Nesta etapa não foi considerada a corrente 36 (quinto efeito) como disponível para o aquecimento, utilizado desta vez apenas para a condensação barométrica.

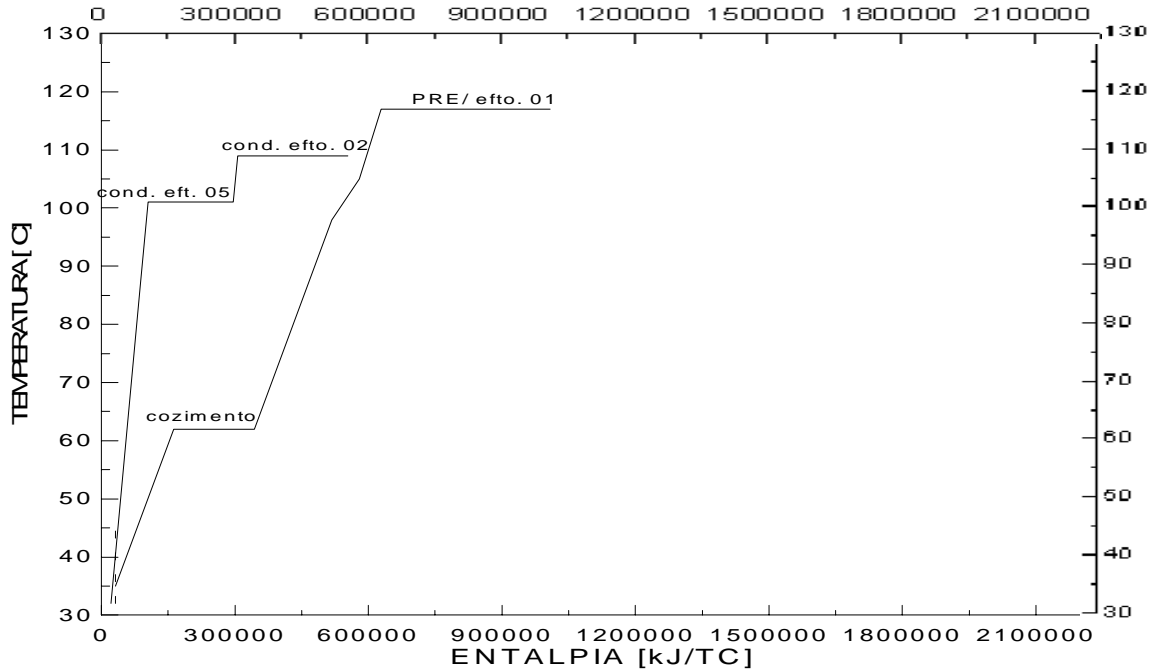


Figura 6 - Curvas compostas com compressão mecânica do vapor do último efeito.

Foram realizadas 4 simulações. Em todas elas o evaporador para o caldo da fermentação possui 2 efeitos com a sangria de vapor vegetal permitida em ambos. Já para o evaporador para a produção de açúcar temos as seguintes considerações: 1ª simulação: 5 efeitos e sangria até o 3º efeito; 2ª Simulação: 5 efeitos e sangria até o 2º efeito; 3ª Simulação com 4 efeitos e sangria até o 2º efeito; 4ª Simulação com 4 efeitos com sangria até o 1º efeito. Os resultados, obtidos através do programa **CPLEX** da Maximal Software Inc., são mostrados na Tabela 3.

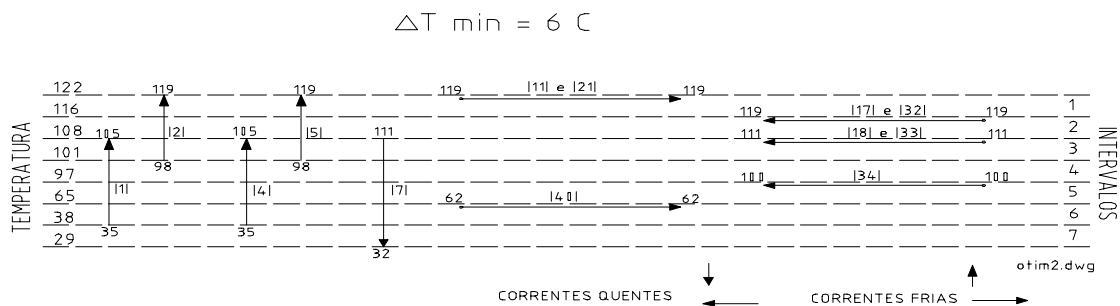


Figura 9 - Intervalos de temperaturas de troca de calor

Pode-se verificar que para a otimização do consumo de utilidades, os melhores resultados são obtidos quando as sangrias nos evaporadores são praticadas nos últimos efeitos. As sangrias nos primeiros efeitos servem apenas para suprir a pequena demanda deste nível de



temperatura, ou seja, a carga térmica do intervalo 2 da Fig. 10, enquanto o restante do processo é atendido com a temperatura em níveis mais próximos da demanda.

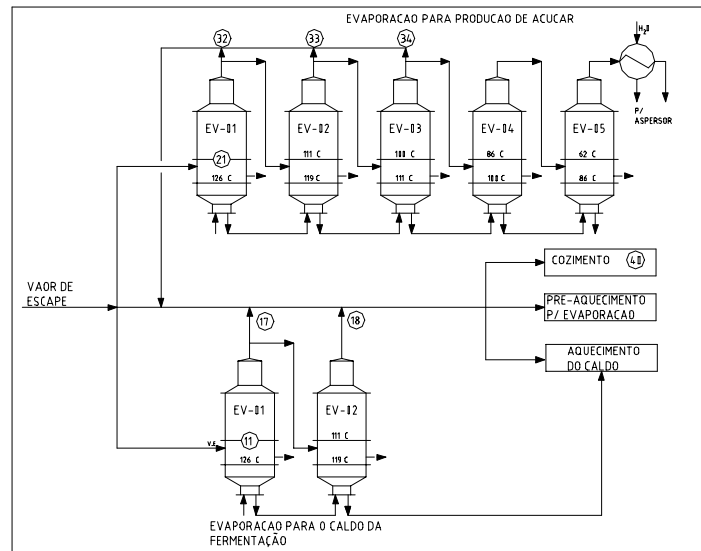


Figura 10– Evaporadores da planta proposta.

Tabela 3- Efeito do número de estágios e sangrias no consumo de vapor de escape

	Consumo de Vapor [kg/ TC]	Carga Térmica [kJ/ TC]	Relação c/ consumo atual	Sangrias nos Efeitos [kg/TC]		
				1	2	3
Atual	364,5	796.812	1	106	0	0
(5-2)-3	235,5	515.114	0,65	29	0	206
(5-2)-2	257	562.037	0,70	29	208	0
(4-2)-2	267,5	585.548	0,73	29	208	0
(4-2)-1	292	639.043	0,80	224	0	0

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho são apresentados os resultados de diversas análises energéticas feitas em uma planta típica de produção de açúcar e mosto, visando a máxima recuperação de calor e a redução do consumo de vapor. As análises foram realizadas através de dois diferentes métodos: o do “pinch-point” e o da programação linear, os quais permitem simular diferentes configurações da rede de recuperadores, pré-aquecedores e evaporadores de múltiplo efeito que constituem a planta.

As simulações foram divididas em dois grupos. No primeiro, usou-se o método do “pinch point” para investigar a planta básica, analisando também a influência de certas opções como: eliminação de sangrias de vapor praticadas entre estágios do evaporador do caldo de açúcar, acréscimo de um segundo efeito no evaporador do caldo de fermentação, compressão mecânica do vapor do último estágio de evaporação. Algumas das opções avaliadas se mostraram bastante eficazes na redução do consumo de vapor.

No segundo grupo, empregou-se o método de programação linear, primeiramente para confirmar os resultados da análise da planta básica feita com o método “pinch point”, e em seguida para determinar a distribuição otimizada das sangrias de vapor para pré-aquecimento

do caldo. Este é um fator significativo para análises em evaporadores de múltiplo efeito, já que o método do “pinch point”, embora proporcione condições de visualizar caminhos para boas soluções, permite que as análises sejam realizadas apenas com as sangrias conhecidas. Deste estudo, concluiu-se que as sangrias devem ser praticadas prioritariamente nos últimos estágios de evaporação, configurando um problema de múltiplas utilidades.

**Agradecimentos** – Os autores agradem o apoio oferecido pelo Dr. Manoel Regis Lima Verde Leal e pelo Engo. Alberto Shintaku, do Centro de Tecnologia da COPERSUCAR.

## REFERÊNCIAS

- Cerda, J. & Westerberg, A., 1983, Synthesizing heat exchanger network having restricted stream-stream matches using transportation problem formulations, *Chemical Engineering Science*, vol. 38, n. 10, pp.1723-1740.
- Christodoulou, P., 1996, Energy economy optimization in the separation processes: optimizing the separation of sucrose/water and non-sugars, *International Sugar Journal*, vol. 98, n. 1172, pp.419-430.
- Christodoulou, P., 1992, The pinch technology and the energy reduction in the beet sugar process, *Zuckerind*, vol. 117, n 3, pp.169-175.
- Paz, D. & Cárdenas, J., 1997, Análisis exergético de un sistema de calentamiento-evaporación-cocimiento, *International Sugar Journal*, vol. 99, n. 1182s, pp.263-268/317-320.
- Rossi, L. F. S. & Bannwart, A. C., 1995, Otimização da etapa de pré-aquecimento da carga de uma unidade de craqueamento catalítico, fazendo uso da programação matemática e da metodologia “pinch” de recuperação energética em redes, *Pesquisa Operacional*, vol. 15, n. 1 e 2, pp.35-47.
- Singh, I., Riley, R. and Seillier, D., 1997, Using pinch technology to optimize evaporator and vapor bleed configuration at the Malelane Mill, *Proc. South-African Sugar Technology Ass.*, vol. 71, pp.207-216.
- Twaite, N. R., Davenport, H. J. and MacDonald, E. K., 1986, Energy management - Energy reduction process integration, *International Sugar Journal*, vol. 88, n. 1055, pp.217-236.

## ENERGY CONSUMPTION IN A SUGAR PLANT USING PINCH TECHNOLOGY AND LINEAR PROGRAMMING

**Abstract.** *Using pinch technology and linear programming, several simulations of the multiple effect evaporators and heat exchanger network of a typical sugar cane plant and alcohol production were performed. The objective was the maximum heat recovery and the reduction of steam consumption. The simulations were divided into two groups. In the first, pinch point method was applied to analyze the basic plant and the influence of several alternatives (elimination of vapor bleed between evaporator effects, number of evaporator effects, mechanical compression of vapor in the last effect of evaporation). In the second group, use was made of linear programming to determine the optimized configuration of vapor bleeds for juice preheating. Several alternatives of deep impact in steam consumption are investigated.*

**Keywords:** *Energy conservation, Pinch technology, Linear programming, Sugar production.*