



## COGERAÇÃO E INTEGRAÇÃO TÉRMICA DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLOS EFEITOS EM USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

**Márcio Higa**

UNICAMP-FEM-DE Cx. P. 6122 - 13083-970 – Campinas, SP - Brasil  
[higa@fem.unicamp.br](mailto:higa@fem.unicamp.br) (correspondência)

**Antonio Carlos Bannwart**

UNICAMP-FEM-DEP Cx. P. 6122 - 13083-970 – Campinas, SP - Brasil  
[bannwart@fem.unicamp.br](mailto:bannwart@fem.unicamp.br)

**Resumo.** Além da questão do racionamento, a crise do setor elétrico brasileiro em 2001 confirmou a necessidade urgente de construção de novas usinas hidrelétricas, termelétricas, e do aumento da produção de energia elétrica através da cogeração. Dentro do contexto desta última, o setor sucro-alcooleiro demonstra um grande potencial de geração de energia, apresentando atrativos econômicos e ambientais, devido principalmente a utilização do bagaço como combustível. Tanto para os arranjos mais comuns, operando em ciclos a vapor em turbinas de contra-pressão, quanto para os sistemas mais avançados, operando através de turbinas de extração-condensação, a recuperação de energia através da integração térmica e a redução do consumo de vapor de processo na usina são fatores de grande influência na geração de potência. Neste caso, a evaporação de múltiplos efeitos (EME) e o aproveitamento térmico de suas correntes são importantíssimos, pois nesta operação está a maior demanda e as fontes potenciais de energia, decorrentes da formação de vapor de evaporação (“vapor vegetal”). Embora a EME na indústria de açúcar possua um arranjo típico de alimentação do caldo e do vapor de processo, onde o primeiro efeito opera com temperatura mais elevada, seguindo nos efeitos posteriores em sentido decrescente de temperatura e pressão, é possível a utilização de outros arranjos alterando o sistema de alimentação do caldo e os níveis de temperatura (EME misto). Neste trabalho são apresentados alguns resultados de simulações, utilizando a análise “Pinch”, visando a otimização da produção de energia elétrica com diferentes tecnologias de cogeração e arranjos do EME.

**Palavras-chave:** Cogeração, Usina de açúcar e álcool, Conservação de energia, Integração térmica.

### 1. INTRODUÇÃO

O setor sucro-alcooleiro demonstra um grande potencial de geração de energia elétrica, havendo uma tendência mundial para a implantação da cogeração no setor devido aos atrativos econômicos e ambientais. Pelo lado econômico, o preço é competitivo, decorrente do fato do açúcar e do álcool, que são os produtos principais, utilizarem a energia térmica e permitirem um rateio dos custos de produção com a eletricidade. Adicionalmente, uma economia pode ser obtida através do combustível utilizado, que neste caso é o bagaço resultante da própria produção. Na questão ambiental, a cana-de-açúcar é uma fonte estável e renovável de energia. Pode gerar eletricidade onde a emissão de CO<sub>2</sub>, está em baixo nível quando comparado com outros combustíveis, tendo um impacto ambiental muito menor, principalmente em relação ao carvão mineral ou ao óleo combustível (Lora *et al*, 2000).

O esquema mais tradicional de funcionamento de uma usina pode ser observado na Fig. (1). A matéria-prima principal é a cana, que após ser moída, fornece o caldo para a produção de açúcar e de álcool, e o bagaço como insumo para a produção de vapor nas caldeiras. O vapor da caldeira é de alta pressão (primário), e é fornecido para as turbinas, gerando potência para acionamento de equipamentos na moenda, no bombeamento dos fluidos (via turbo-bombas) ou para produção de energia elétrica. O vapor de baixa pressão (secundário) que sai do escape das turbinas serve como fonte de calor para o próprio processo (aquecimento, evaporação, cozimento, fermentação e destilação). Caso haja falta de vapor de baixa, o complemento ocorre por meio de linhas diretas passando vapor de alta proveniente das caldeiras, através de válvulas redutoras de pressão. Após a utilização no processo, o vapor transformado em condensado retorna através de bombas para a caldeira.

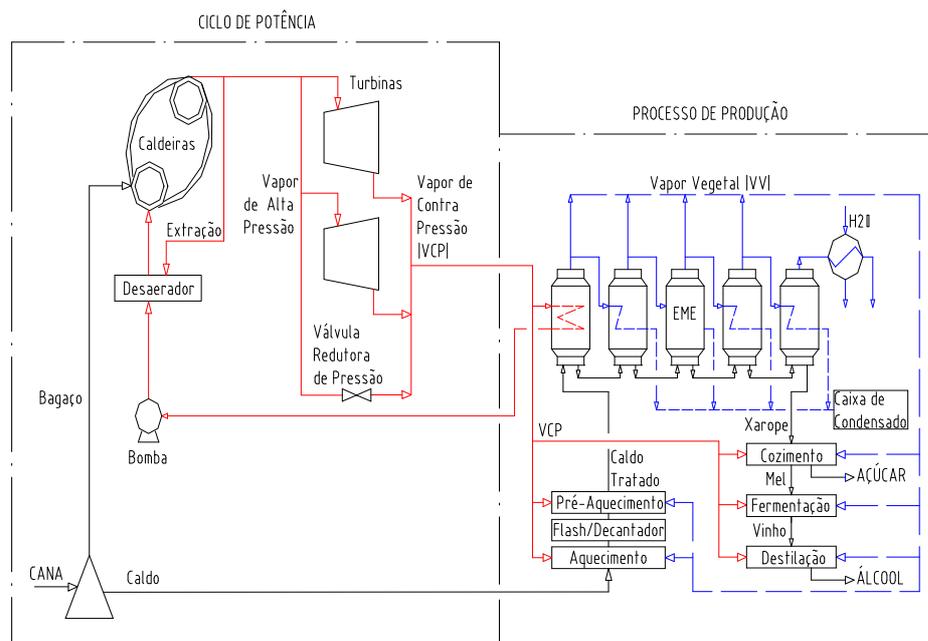


Figura 1. Esquema de geração e consumo de vapor

A situação na maioria das usinas de açúcar e álcool do Brasil é de auto-suficiência do consumo de energia dentro da indústria e de equilíbrio no consumo de vapor de processo. Ou seja, todos acionamentos mecânicos dos equipamentos, iluminação e bombeamentos nos processos de produção (~20 kWh/TC – TC: Tonelada de cana moída) são supridos pelas turbinas da própria usina e toda a demanda do processo no aquecimento do caldo, evaporação, cozimento e destilação (~500 kg/TC) é suprida pelo vapor de escape das turbinas. Apesar desta situação predominante de equilíbrio, onde a energia produzida é consumida na produção, estudos indicam possibilidades de geração de energia elétrica excedente para a venda.

Neste trabalho algumas simulações e análises térmicas de uma planta integrada de produção de açúcar e álcool são realizadas, visando otimizar a produção de excedente de energia elétrica, e procurando a melhor forma de recuperação de calor e integração térmica do processo. Os resultados obtidos através da análise "Pinch", demonstram que diferentes configurações requerem também diferentes medidas, e estabelecem algumas prioridades, que podem ser realizadas em diversos níveis de investimentos econômicos.

## 2. CICLOS DE POTÊNCIA

O esquema de geração demonstrado anteriormente na Fig. (1) é baseado nos ciclos de turbinas a vapor, entretanto, os ciclos que têm demonstrado os maiores potenciais de geração de energia elétrica são baseados em turbinas a gás. Neste caso, ao invés de ser queimado diretamente em

caldeiras para a geração de vapor, o bagaço é gaseificado para utilização em turbinas a gás (“BIG-GT: Biomass Integrated Gasifier/Gas Turbine”). Entretanto, embora as pesquisas de geração de eletricidade com a utilização de sistemas BIG-GT estejam avançando, os principais ciclos utilizados para a geração de energia elétrica através do bagaço da cana, ainda são baseados nas turbinas a vapor, que também possuem diferentes tecnologias, e nas quais as simulações deste trabalho estão restringidas. Algumas classificações que Bowell (1996) faz das turbinas a vapor podem ser as seguintes:

- Contra pressão: O vapor expandido na turbina sai acima da pressão atmosférica e é utilizado no processo;
- Condensação: O vapor sai abaixo da pressão atmosférica e condensa em equipamentos a vácuo;
- Extração (*pass out*): Parte do vapor deixa a turbina entre a entrada e a saída, onde um conjunto de válvulas regula o fluxo para a seção de exaustão, mantendo-o na pressão requerida pelo processo. Pode ser configurada tanto em turbinas de contra-pressão ou de condensação;
- Pressão mista (*pass in*): Utiliza vapor de alta pressão, somado com vapor de baixa pressão entrando na parte baixa da turbina. Usada com caldeiras de dupla pressão, ou plantas combinadas com turbinas a gás ou motores diesel.

Dentro destas classificações dos tipos de turbinas a vapor, é possível fazer os arranjos de acordo com os objetivos do sistema de cogeração. Alguns arranjos mais viáveis mencionados por Bowell (1996) são apresentados a seguir.

**Turbinas de Contra Pressão:** É o esquema utilizado na Fig. (1). Alguns diferenciais podem ser implementados quando se deseja maximizar a geração de potência elétrica de forma simples, mas efetiva. Um esquema diferente com o normalmente utilizado nas usinas é a exclusão da válvula redutora de pressão e a sua substituição por outra turbina de contra-pressão. Neste caso todo vapor disponível é expandido das turbinas para o processo e o excesso é condensado em condensador atmosférico.

**Combinação de Turbinas de Contra Pressão e de Condensação:** Neste arranjo, sistemas eletrônicos garantem o controle de passagem de vapor com prioridade para o processo e passando através das turbinas de contra-pressão, enquanto o excedente de vapor é utilizado em turbinas de condensação (Fig. (2-a)). A vantagem é o melhor aproveitamento do vapor disponível para geração de eletricidade, porém este arranjo apresenta desvantagens com o alto custo, devido ao maior número de estágios e tamanhos das pás da turbina, além dos condensadores a vácuo, que requerem mais bombas, água e torres de resfriamento do que condensadores atmosféricos. Outro fator a se levar em conta é a falta de flexibilidade para ligar e desligar a turbina de condensação, devido às perdas de vapor para o acionamento do equipamento quando o mesmo está frio.

**Extração-Condensação (CEST: Condensing-Extraction Steam Turbine):** Este sistema pode operar com uma única turbina, ou através de uma combinação com turbinas de contra-pressão. No caso de uma única turbina, a extração ocorre na pressão do vapor de processo de acordo com a demanda (Fig. (2-b)), enquanto que em esquemas de combinação de turbinas de contra-pressão, a extração ocorre com nível de pressão mais elevada para o suprimento das mesmas. Em ambos os casos, o excedente de vapor é expandido até a condensação, aproveitando melhor o vapor disponível para geração de eletricidade. Uma dificuldade é que no caso da extração requerida diretamente para o processo, a pressão do vapor é muito baixa (0,2-0,3 MPa) do que o usual em outras indústrias (0,8-2,0 MPa). Neste caso o custo pode ser muito elevado devido ao tamanho necessário para o equipamento, causado pelo aumento do volume específico do vapor nestas condições.

## 2.1. Geração de Vapor

Em usinas brasileiras, a geração de vapor normalmente ocorre em níveis de pressão entre 1,8 e 2,1 MPa (abs.) e de temperatura entre 280 e 300° C, sendo o vapor utilizado nas turbinas de contra-pressão. Nesta configuração, embora haja possibilidades de pequeno excedente de energia para a venda, a produção média de potência é de 20 kWh/TC, praticamente o mesmo consumo da usina (este valor pode cair para 12,9 kWh/TC, quando se utiliza novos sistemas de CEST ou BIG-GT, o qual substituem as velhas caldeiras com seus ventiladores e bombas, Odgen-1990). No caso em que se deseja maximizar a geração de potência é essencial que ocorra o aumento de pressão e da temperatura. Os valores sugeridos por Odgen et all (1990) eram em escala crescente de 3,2 MPa e 360° C, 6,0 MPa e 450° C ou 8,0 MPa e 470° C. Para estes níveis de pressão a geração de potência utilizando sistemas com CEST pode aumentar para valores entre 70 a 120 kWh/TC, disponibilizando um excedente de 50-100 kWh/TC para a venda.

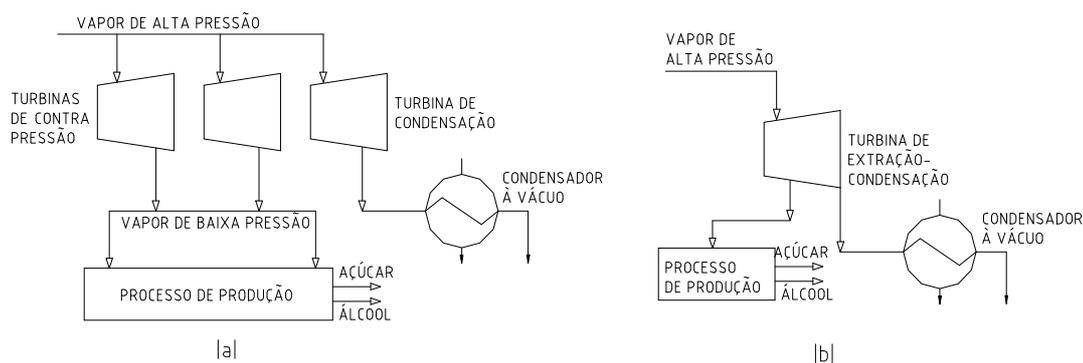


Figura 2. Arranjos de ciclos de turbinas a vapor  
 (a) Combinação de turbinas de contra-pressão e condensação  
 (b) Utilização de turbinas de extração-condensação (CEST)

### 3. EVAPORAÇÃO EM MÚLTIPLOS EFEITOS (EME)

Na produção de açúcar, a evaporação tem como objetivo aumentar a concentração do caldo de cana, através da eliminação da água, formando o xarope para o cozimento. A fonte de calor é sempre indireta, não havendo contato direto entre o fluido de aquecimento e o caldo em concentração, sendo que o meio de aquecimento mais encontrado é o vapor proveniente do escape de turbinas (VE). A grande vantagem do EME é que o equipamento é dividido em vários corpos denominados estágios ou efeitos que podem utilizar o próprio vapor vegetal (VV) formado no mesmo, como meio de aquecimento em outros efeitos (Fig. (1)).

São vários os tipos de alimentação possíveis para o uso de EME, conforme ilustra a Fig. (3). Eles podem ser classificados em: alimentação frontal, reversa, mista e paralela. Na alimentação frontal tanto o caldo diluído quanto o VE são alimentados no primeiro efeito (ou no pré-evaporador como também é conhecido), e aproveitando o sentido decrescente de pressão, seguem paralelamente até o último efeito. Nos sistemas de alimentação reversa, o caldo é alimentado no último efeito com relação ao fluxo de vapor, sempre no sentido crescente de pressão, exigindo portanto, a utilização de bombas. Os arranjos com alimentação mista não possuem uma configuração típica, procurando explorar as vantagens dos dois arranjos anteriores. Já os sistemas com alimentação paralela utilizam a divisão do fluxo do caldo no número de efeitos e posterior mistura do produto concentrado.

Na produção de açúcar e álcool nas usinas brasileiras, o tipo de alimentação frontal é o comumente encontrado, sendo o mesmo utilizado na maioria das publicações sobre o assunto, inclusive em Higa e Bannwart (1999), que demonstraram que é possível uma redução significativa do consumo de vapor na produção dependendo dos níveis de extrações de vapor vegetal nos efeitos do EME. Neste arranjo, o VE é utilizado apenas no primeiro efeito, enquanto que para os demais efeitos utiliza-se o VV do efeito anterior. Como o VV formado e a solução concentrada se encontram à mesma temperatura na saída de cada efeito, e é necessário que exista uma diferença de

temperatura entre os fluidos para a transferência de calor, a evaporação no efeito posterior ocorre sempre em pressão inferior à do efeito anterior (Westphalen, 1999).

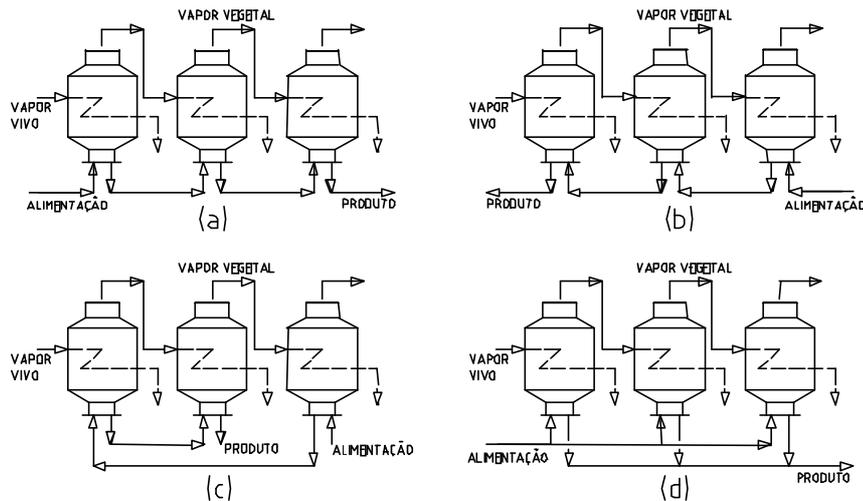


Figura 3. Configurações de alimentação para evaporador múltiplo efeitos  
 (a) alimentação frontal      (b) alimentação reversa  
 (c) alimentação mista      (d) alimentação paralela

A utilização de outros arranjos para o EME é pouco comum na indústria de açúcar. Em Urbaniec *et al* (2000) trabalha-se com uma opção de EME misto, em que o caldo é concentrado primeiro em um efeito com temperatura mais baixa, para então utilizar o efeito com temperatura mais elevada, para seguir em sentido decrescente de temperatura e pressão nos efeitos posteriores. Para a otimização neste trabalho, embora a maioria das simulações ainda sejam realizadas no arranjo tradicional, em algumas simulações foram utilizados arranjos com o fornecimento de vapor em outros níveis de pressão, além do 0,24 MPa (abs.) normalmente utilizado. Como será visto posteriormente, isto pode permitir a utilização de vapor de processo em outros efeitos além do primeiro, maximizando a produção de energia elétrica.

#### 4. ANÁLISE PINCH

A análise “Pinch” (método do “Pinch-Point”) foi introduzida por Linnhoff *et al.* em 1979 com o objetivo de se obter a máxima recuperação de calor em um processo e o mínimo consumo de utilidades externas. A análise utiliza as combinações de correntes quentes e frias de uma planta térmica, obtidas através das somatórias das capacidades térmicas das correntes em cada nível de temperatura (curvas compostas - CC - Figura 4a.), que determina a máxima recuperação de calor possível observado no intervalo sobreposto das curvas, enquanto os extremos indicam os mínimos de utilidades quente ( $Q_{Hmin}$ ) e fria ( $Q_{Cmin}$ ) necessários ao processo (“targets”). A sobreposição das curvas é limitada pela diferença mínima de temperatura ( $\Delta T_{min}$ ) imposta pelo projeto e necessária para que os fluidos possam trocar calor.

Com outra ferramenta da análise, a grande curva composta (GCC - combinação das curvas compostas quente e fria em uma única) é possível observar melhor os níveis de temperatura onde o processo necessita de utilidades quente e fria, e os pontos em que pode suprir a própria demanda, como demonstram as áreas escuras da Figura 4b. Em caso de mais de uma utilidade (utilidades em múltiplos níveis de temperatura), torna-se possível a escolha de uma delas com base no nível de temperatura mais próximo da demanda, minimizando as irreversibilidades de transferência de calor.

#### 5. ESTUDO DE CASO

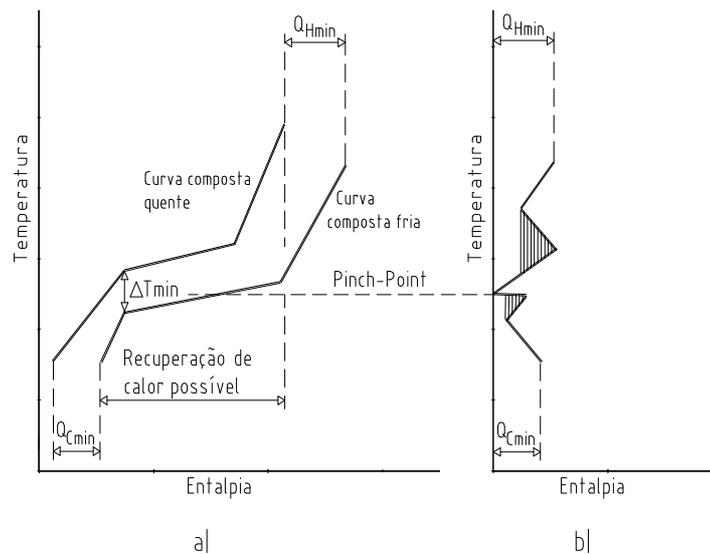


Figura 4. a) Curvas compostas quente e fria; b) Grande curva composta

Para o presente trabalho os dados gerais da planta analisada estão nas Tab. de (1) a (3). Na Tab. (1) está a capacidade da usina, que possui um tamanho comum para os padrões brasileiro, e a produção, que está concentrada principalmente no açúcar. Observa-se na Tab. (2) um pequeno excedente de energia elétrica para a venda (3.438 kW) para um consumo de vapor de processo de 500 kg/TC (TC: Tonelada de cana moída), acompanhando a média das usinas de açúcar e álcool do Brasil. Os acionamentos dos equipamentos mecânicos representados na Tab. (3) consomem aproximadamente ~10,4 kWh/TC, enquanto o consumo de potência elétrica fica em torno de 13 kWh/TC, resultando em 23,4 kWh/TC.

Tabela 1. Capacidade e produção da usina

Moagem de Cana [ton/h]	400
Fração de Produção Açúcar-Álcool	0,9
Bagaço Disponível [ton/h]	116

Tabela 2. Dados específicos para cada simulação

Tipo de Turbina	Temperatura Máxima [°C]	Pressão [MPa]		Consumo de Vapor de Processo [kg/TC]	Eletricidade Disponível para Venda [kW]	Utilização do Bagaço Disponível [%]
		Alta	CP <sup>1</sup>			
Contra-Pressão	280	2,1	0,239	500	3.438	80,9

1- CP: Contra-Pressão.

Tabela 3. Consumo de potência mecânica e elétrica na usina

Equipamento	Potência		Consumo de vapor	
	[kW]	[kWh/TC]	[kg/s]	[kg/TC]
Picador	440	1,10	2,67	24,03
Nivelador	300	0,75	1,82	16,38
Desfibrador	440	1,10	2,67	24,03
Turbo-moenda	2880	7,2	17,45	157,05
Turbo-bomba	93,3	0,23	0,58	5,22
<b>Total Mecânica</b>	<b>4156,3</b>	<b>10,39</b>	<b>25,18</b>	<b>226,62</b>
Turbo-gerador	5200	13	18,16	163,44
<b>Total Geral</b>	<b>9.356,3</b>	<b>23,39</b>	<b>43,44</b>	<b>390,06</b>

## 6. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A integração térmica no processo de produção de açúcar e álcool permite que se obtenha uma redução significativa do consumo de vapor como fonte de aquecimento na usina. Isto está fortemente relacionado com o efeito no qual é fornecido o vapor de escape e com as extrações de vapor vegetal (sangrias) no EME, conforme demonstra a Tab. (4). Nas simulações de 1 a 7, verifica-se que embora o consumo de vapor no EME possa aumentar com as extrações de vapor vegetal nos efeitos, a tendência é que haja uma redução no consumo geral da usina, enquanto nas simulações de 8 a 11, observa-se a utilização de vapor de escape no último efeito do evaporador e no processo em geral. Nestas últimas simulações, os consumos de vapor no EME estão relacionados com o objetivo de se maximizar a produção de energia elétrica.

Desde que a redução do consumo de vapor de processo, também diminui a disponibilidade para a geração de potência, no caso da manutenção dos atuais níveis de pressão e temperatura de trabalho em turbinas de contra-pressão, a redução do consumo de vapor de processo tem um limite para que o suprimento de energia elétrica e os acionamentos mecânicos da usina não sejam comprometidos. Para o estudo de caso, este valor é de 392 kg/TC [Tab. (5): simulação 1], este número porém, pode ser menor quando o consumo de potência mecânica e elétrica da usina diminuem, ou quando a eficiência das turbinas são melhores.

A importância da redução do consumo de vapor de processo neste caso, pode ser verificado na quantidade de bagaço utilizado, que passa de 80,9% para 63% do total disponível, e também com a capacidade dos equipamentos. Para Srivastava (1997), o tamanho do turbo-gerador deve ser de acordo com a demanda máxima de vapor de processo, pois isto conduz para uma melhor rentabilidade obtida com a economia em custos de capital. Verifica-se na [Tab. (5): simulação 2] que esta redução pode ter níveis inferiores a 50% para um consumo de vapor de processo de 301 kg/TC e um déficit de 2.852 kW de energia elétrica. Dependendo da relação dos custos do bagaço e da energia elétrica pode ser vantajoso vender o bagaço e comprar eletricidade da rede. Como esta não é a situação mais comum, para um consumo de vapor de processo em 301 kg/TC, os níveis de pressão e temperatura devem ser elevados para suprir a demanda de eletricidade na usina. A elevação da pressão para 6,3 MPa e da temperatura para 450 °C nos turbo-geradores de contra-pressão, com extração de vapor em 2,1 MPa para os turbo-acionadores mecânicos, permite que se recupere a produção de potência elétrica para os níveis iniciais [Tab. (5): simulação 3], disponibilizando um excedente de 3.257 kW para a venda, e utilizando apenas 46 % do total de bagaço disponível.

Tabela 4. Consumo de vapor na usina, no EME e extrações de vapor vegetal nos efeitos

Simulação	Consumo de Vapor Processo [kg/TC]		Consumo de Vapor de Escape nos Efeitos [kg/TC]						Extração de Vapor Vegetal para o processo [kg/s]				
	CP <sup>1</sup>	Cd <sup>2</sup>	1	2	3	4	5	Total	1	2	3	4	5
Referência	500	---	181	--	--	--	--	181	8	--	--	--	--
1	392	---	214	--	--	--	--	214	4,3	10,9	--	--	--
2	301	---	215	--	--	--	--	215	0	0	24,5	--	--
3	301	---	215	--	--	--	--	215	0	0	24,5	--	--
4	500	---	181	--	--	--	--	181	8	--	--	--	--
5	500	---	181	--	--	--	--	181	8	--	--	--	--
6	500	---	181	--	--	--	--	181	8	--	--	--	--
7	301	---	215	--	--	--	--	215	0	0	24,5	--	--
8	224	149	189	--	--	--	--	189	2,3	2,8	9,0	--	--
9	175	288	165	--	--	--	148	313	2,3	2,8	12	--	--
10	175	288	165	--	--	--	148	313	2,3	2,8	12	--	--
11	175	288	165	--	--	--	148	313	2,3	2,8	12	--	--

1- CP: Contra-Pressão; 2- Cd: Condensação.

Além da elevação dos níveis de pressão e temperatura de trabalho, o aumento da produção de eletricidade com turbinas de contra-pressão é possível desde que se aumente o consumo de bagaço.

Neste caso, o consumo de vapor de processo deve ser o maior possível para condensar todo o vapor de escape da turbina. Na [Tab. (5): simulação 4] verifica-se um excedente de 14.064 kW com utilização de apenas 86,1% do bagaço disponível, para o consumo inicial de 500 kg/TC do vapor de processo. Caso o consumo de vapor de processo seja menor do que das turbinas, deve-se adicionar ao ciclo condensadores para o excedente de vapor de escape, o que evitará o aumento de utilização de água de reposição para o ciclo. Na [Tab. (5): simulação 5] é utilizado 100% do bagaço disponível para uma geração de 17.821 kW de energia elétrica excedente, sendo que aproximadamente 30% do vapor de escape deve passar por condensadores.

A adição de condensadores ao ciclo permite que o vapor de escape da turbina seja condensado em níveis de pressão e temperatura inferiores aos realizados atualmente. Devido à demanda de utilização do vapor de processo, o escape da turbina de contra-pressão geralmente ocorre no nível de pressão de 0,24 MPa, quando ainda possui uma exergia considerável. Entretanto, quando o vapor não é utilizado para o aquecimento no processo ele pode sair em pressões mais baixas e aproveitar melhor a exergia disponível (Higa e Bannwart, 2001). Isto pode ser feito em turbinas de condensação, que operam com níveis de pressão de 0,03 MPa, ou em valores ainda mais baixos, como 0,015 MPa. Para o fornecimento do vapor de processo com 0,24 MPa, utiliza-se o escape dos turbo-acionadores mecânicos, que por sua vez utilizam vapor de extração com pressão de 2,1 MPa, tornando-se necessária à combinação das turbinas de contra-pressão com turbina de condensação, ou uma configuração de turbina de extração-condensação automática. Desta forma, apenas a demanda das turbinas de contra-pressão e do vapor do processo é expandida e extraída em 2,1/0,24 MPa, enquanto o restante pode ser aproveitado até 0,03 MPa.

Verifica-se com a utilização de 100% do bagaço disponível, que o excedente de energia elétrica pode chegar a 20.898 kW [Tab. (5): simulação 6], aumentando em 17,3% em relação a turbina de contra-pressão, para as mesmas condições de consumo de vapor de processo (500 kg/TC) da [Tab. (5): simulação 5]. Este valor não é superior, pois 70% do vapor de escape é utilizado para o processo, não sendo permitido que se expanda até 0,03 MPa. Enquanto a redução do consumo de vapor de processo para 301 kg/TC com a utilização de turbinas de contra-pressão visa principalmente aumentar a economia de bagaço para outra utilização ou venda, para as turbinas de extração condensação ela permite um aumento na geração de energia elétrica excedente, conforme verifica-se na [Tab. (5): simulação 7] onde há 22.934 kW de energia elétrica disponível.

Embora a utilização da turbina extração-condensação tenha como objetivo principal o aumento direto da produção de energia elétrica, decorrente da melhor utilização da exergia disponível no vapor da caldeira, pode-se obter indiretamente um aumento através da redução do consumo de vapor do processo. Como a pressão de condensação do vapor da turbina escolhida é de 0,03 MPa, a temperatura ainda é 69° C. Neste caso, este vapor também pode ser utilizado como utilidade quente no processo, já que algumas correntes estão abaixo deste nível de temperatura. Na [Tab. (5): simulação 8], obtém-se 24.101 kW de energia excedente, observando que o consumo de vapor de processo é de apenas 224 kg/TC para o escape de contra-pressão e 149 kg/TC para o escape de condensação a 0,031 MPa. Com a utilização de 100% do bagaço disponível e 149 kg/TC para o processo, aproximadamente 40% do vapor na pressão de 0,031 MPa passa por trocadores de calor, diminuindo a área dos condensadores. Este ganho é reduzido pela maior área de trocadores de calor necessária para o processo, devido a menor diferença de temperatura entre os fluidos.

É importante observar na simulação 8 que embora o consumo de vapor de processo em 0,24 MPa tenha diminuído, na realidade houve um total de consumo de 373 kg/TC, já que 149 kg/TC foram utilizados em 0,031 MPa. Desde que o aumento da quantidade de vapor expandindo até 0,031 MPa, aumenta também a quantidade de potência elétrica excedente gerada, uma forma de diminuir ainda mais o consumo de vapor de processo em 0,24 MPa é a utilização do escape em 0,031 MPa no EME, já que este é o setor de produção com maior consumo de vapor. Isto deveria ser verificado na [Tab. (5): simulação 9], onde o consumo de 0,24 MPa diminui para 175 kg/TC e o consumo em 0,031 MPa aumenta para 288 kg/TC. O excedente de energia elétrica, entretanto permanece em 24.101 kW. Isto ocorre em razão do consumo de vapor dos turbo-acionadores ser de 227 kg/TC

[Tab. (3)], impedindo que o vapor de processo economizado em 0,24 MPa seja expandido para 0,031 MPa.

Tabela 5. Dados específicos para cada simulação

Simulação	Tipo de Turbina	Temperatura Máxima [°C]	Pressão [MPa]			Consumo de Vapor de Processo [kg/TC]		Pot. Elétrica Disponível p/ Venda [kW]	Utilização Bagaço Disponível [%]
			Alta	CP <sup>1</sup>	Cd <sup>2</sup>	CP	Cd		
Referência	CP <sup>1</sup>	280	2,1	0,239	---	500	---	3.438	80,9
1	CP <sup>1</sup>	280	2,1	0,239	---	392	---	0	63,0
2	CP <sup>1</sup>	280	2,1	0,239	---	301	---	- 2.852	48,1
3	CP <sup>1</sup>	450	6,3	0,239	---	301	---	3.257	46,0
4	CP <sup>1</sup>	450	6,3	0,239	---	500	---	14.064	86,1
5	CP <sup>1</sup>	450	6,3	0,239	---	500	---	17.821	100
6	CEST <sup>3</sup>	450	6,3	0,293	0,031	500	---	20.898	100
7	CEST <sup>3</sup>	450	6,3	0,293	0,031	301	---	22.934	100
8	CEST <sup>3</sup>	450	6,3	0,293	0,031	224	149	24.101	100
9	CEST <sup>3</sup>	450	6,3	0,293	0,031	175	288	24.101	100
10	CEST <sup>3</sup>	450	6,3	0,293	0,031	175	288	24.760	100
11	CEST <sup>3</sup>	450	6,3	0,293	0,031	175	288	23.801	100

1- CP: Contra-Pressão; 2- Cd: Condensação; 3- CEST: .Condensing-Extraction Steam Turbine.

Como o consumo de vapor nos turbo-acionadores mecânicos está estimado em 227 kg/TC, qualquer redução do vapor de processo abaixo deste valor não aumenta o excedente de energia elétrica. Isto só ocorre em caso de substituição de turbo-acionadores mecânicos por motores elétricos, permitindo desta forma a expansão para 0,031 MPa. Na [Tab. (5): simulação 10] os picadores, niveladores e turbo-bombas foram substituídos por acionadores elétricos, mantendo apenas os desfibradores e turbo-moendas através de forma mecânica. Isto resulta em 24.760 kW de energia elétrica excedente. Caso a eletrificação do sistema mecânico seja completa, o excedente chega a 23.801 kW, conforme os valores da [Tab. (5): simulação 11].

## 7. CONCLUSÃO

Além de suprir todas as demandas da produção de açúcar e álcool, a cogeração nas usinas pode diferir em seus objetivos. Dependendo dos custos de bagaço e energia elétrica, uma usina pode ter como meta reduzir o consumo de bagaço, ou maximizar a produção de energia elétrica excedente. Conforme a escolha do objetivo ou da tecnologia utilizada, a integração térmica deve ser diferente, alterando principalmente o consumo do EME e a sua integração com o escape das turbinas.

Para a economia de bagaço, a primeira medida é o aumento das extrações de vapor vegetal no EME, permitindo a redução do consumo de vapor de processo. Para que não haja um comprometimento no suprimento mecânico e elétrico na usina com utilização apenas de turbina de contra-pressão, o consumo de vapor de processo não deve ser menor do que 392 kg/TC, para os atuais níveis de pressão e temperatura, ou 301 kg/TC para níveis de pressão de trabalho de 6,3 MPa e 450 °C. Já para o aumento de geração de energia elétrica excedente, a elevação da pressão e temperatura deve ser a primeira medida, podendo-se obter de imediato um acréscimo para 9.055 kW com utilização de 67,5% do bagaço disponível, ou até 17.821 kW com 100% do bagaço.

Com o aumento dos níveis de pressão e temperatura, torna-se viável a utilização de turbinas de extração-condensação, que embora aumente a geração de eletricidade excedente diretamente quando da sua utilização, alcançando 20.898 kW sem reduzir o consumo de vapor de processo (500 kg/TC), pode atingir 22.934 kW com uma redução para 301 kg/TC, ou até 24.101 kW quando se utiliza vapor de condensação (0,031 MPa) para o processo. Outra medida para o aumento da geração de excedente energia para a venda é a eletrificação de alguns equipamentos, que entretanto deve ser feito apenas quando a redução do consumo de vapor de processo for abaixo de 227 kg/TC.

Além das diferenças na integração da usina no sistema de cogeração para a economia de bagaço, ou para o aumento da geração de energia elétrica excedente, é possível concluir das simulações

realizadas que as medidas para alcançar estes objetivos devem ser priorizadas de acordo com o consumo de vapor de processo e a integração do EME.

## 8. REFERÊNCIAS

- Bowel, R., 1996, "Steam turbine selection for co-generation in a sugar mill", *International Sugar Journal*, Vol. 98, No. 1167, pp. 113-115.
- Higa, M., 1999, "Otimização do Consumo Energia em Usinas de Açúcar e do Álcool através dos Métodos do *Pinch-Point* e Programação Linear", Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP, Campinas, 157 p.
- Higa, M., Bannwart, A., 1999, "Energy Consumption in Sugar Plant Using Pinch Technology and Linear Programming", *Proceedings of the 15th Brazilian Congress Mechanical Eng.*, Vol. 1, São Paulo, Brazil.
- Higa, M., Bannwart, A., 2001, "Process Integration and Reduction of Steam Consumption in Sugar-Alcohol Industries", *Proceedings of the 16th Brazilian Congress Mechanical Eng.*, Vol. 1, Uberlândia, MG, Brazil.
- Lora, E.S., Arrieta, F.P., Carpio, C., Nogueira, L.H., 2000, "Clean production: efficiency and environment", *International Sugar Journal*, Vol. 102, No. 1219, pp. 343-351.
- Odgen, J.M., Hochgreb, S., Hylton, M., 1990, "Steam economy and cogeneration in cane sugar factories", *International Sugar Journal*, Vol. 92, No. 1099, pp. 131-142,146-148.
- Srivastava, V.C., 1997, "Planing and engineering of cogeneration projects". *International Sugar Journal*, Vol. 99, No. 1178, pp. 85-88.
- Urbaniec, K., Zalewski, P., Zhu, X.X., 2000, "A Decomposition approach for retrofit Design of Energy Systems in the Sugar Industry", *Applied Thermal Engineering*; Vol. 20,pp. 1431-1442.
- Westphalen D. L., 1999, "Modelagem, Simulação e Otimização de Sistemas de Evaporação", Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP, Campinas., 227 p.

## 9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

## COGENERATION AND THERMAL INTEGRATION OF MULTIPLE EFFECT EVAPORATOR IN SUGAR AND ALCOHOL FACTORIES

**Márcio Higa**

UNICAMP-FEM-DE Cx. P. 6122 - 13083-970 – Campinas, SP – Brasil,  
higa@fem.unicamp.br

**Antonio Carlos Bannwart**

UNICAMP-FEM-DEP Cx. P. 6122 - 13083-970 – Campinas, SP – Brasil,  
bannwart@fem.unicamp.br

**Abstract.** *Besides the energy rationing issues and the black-out threat, the crisis of the electric sector in Brazil in 2001 confirmed the urgent need of construction of new hydroelectric and thermoelectrical plants, and the increase of the electric power production through cogeneration. In the cogeneration context, the sugar-alcohol sector has a great potential for energy generation, presenting economical and environmental interest, mainly by the use of bagasse as fuel. For the most common arrangements operating in back-pressure turbine steam cycles, and the most advanced systems using condensation-extraction steam turbines, the recovery of energy by thermal integration and the reduction of the steam consumption in the plant are of great influence in the power generation. In this case, multiple effects evaporation (EME) and the thermal recovery of its vapor streams (i.e. the vegetable vapor) are essential, since they concentrate the largest demand and potential sources of energy. Although the EME in the Brazilian sugar industry has a typical co-current arrangement of juice and process vapor feeding, where the first effect operates in higher temperature, proceeding in the subsequent effects in decreasing sense of temperature and pressure, other arrangements altering the juice feeding system and the temperature levels (mixed EME) are possible. In this work we use Pinch analysis in order to simulate different cogeneration technologies and arrangements of EME, with the aim of optimize electric power production.*

**Keywords.** *cogeneration, sugar and alcohol industry, pinch analysis, energy conservation, thermal integration.*