



AVALIAÇÃO ENERGÉTICA EM USINA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL UTILIZANDO A ANÁLISE *PINCH*

MÁRCIO HIGA^{1,2}, ANTONIO C. BANNWART¹

¹ Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica
Cidade Universitária Zeferino Vaz – Cx. Postal 6122
CEP 13083-970 – Campinas – SP – Brasil

² Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Química
Centro Tecnológico de Maringá – R. Cantor Raul Seixas 501 – Jd Ipanema
CEP 87053-240 – Maringá – PR – Brasil

(Recibido 5 de abril de 2004, para publicación 16 de noviembre de 2004)

Resumo – Com o propósito de avaliar o potencial de cogeração e a melhor integração térmica em usinas de açúcar e álcool, este trabalho se inicia com uma breve revisão da análise “*Pinch*”. A seguir são realizadas avaliações térmicas de uma usina brasileira que recentemente aumentou o seu potencial de cogeração através da instalação de uma turbina de contra-pressão com extração. Os resultados das avaliações utilizando a análise “*Pinch*” são comparados com os valores previstos pelos projetistas da planta, demonstrando que maior produção de energia elétrica poderia ser alcançada com menor consumo de combustível e melhores eficiências energética e exergética.

1. ANÁLISE “*PINCH*”

A análise ou tecnologia “*Pinch*”, como também é conhecida, foi introduzida em 1979 por Linnhoff *et al* [1]. Com o objetivo de se obter a melhor integração térmica de um processo foram desenvolvidas ferramentas gráficas que combinam correntes quentes e frias de uma planta térmica (*curvas compostas quente e fria e grande curva composta*), permitindo que este método seja utilizado com muito sucesso em milhares de aplicações nas mais variadas indústrias, e identificando as melhores opções de projeto em redes de trocadores de calor (*HENS: Heat Exchanger Networks Synthesis*) [2].

A integração térmica visando a máxima transferência de calor entre uma corrente quente e uma fria em um processo pode ser realizada através da construção de um diagrama *temperatura-entalpia*. Conforme ilustra a Fig. 1a, a sobreposição entre estas correntes, limitada por uma diferença mínima de temperatura (ΔT_{\min}) escolhida pelo projetista de acordo com o custo de capital, indica a máxima recuperação de calor possível, enquanto os extremos indicam os mínimos de utilidades quente ($Q_{H\min}$) e fria ($Q_{C\min}$) necessárias ao processo.

Esta integração é simples quando se trata de apenas duas correntes térmicas, tornando-se mais complexa quando o número de correntes aumenta. A idéia básica de *curvas compostas* está na combinação de todas as correntes quentes do processo em uma única curva, e de todas as correntes frias em uma outra. Isto se obtém através da somatória das capacidades térmicas das correntes envolvidas, em cada nível de temperatura no diagrama *temperatura-entalpia* (Fig. 1b). De forma similar ao que se faz na integração entre apenas duas correntes, a sobreposição da curva composta quente sobre a fria, limitada por uma diferença mínima de temperatura de transferência de calor (ΔT_{\min}) imposta pelo custo de capital, determina a máxima recuperação de calor possível e as metas de consumo de utilidades quente ($Q_{H\min}$) e fria ($Q_{C\min}$) necessárias ao processo.

A *grande curva composta* (GCC), também mencionada anteriormente, combina as duas curvas compostas (quente e fria) transformando-as em uma única curva (Fig. 1c). A vantagem da GCC é a possibilidade de se observar melhor onde o processo deve trocar calor com as utilidades e onde ele pode satisfazer a própria demanda (áreas escuras). Quando se tem mais de uma utilidade (utilidades em

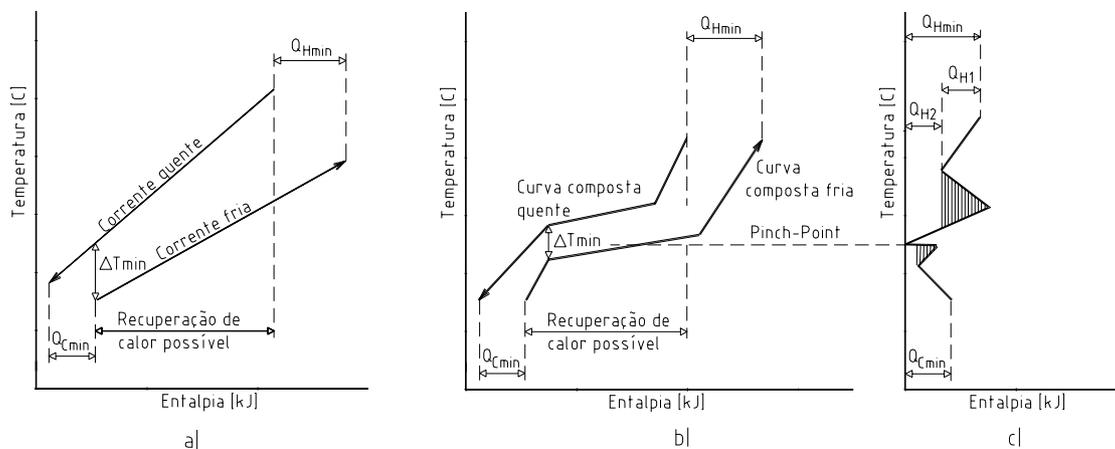


Fig. 1. a) Integração entre 2 correntes; b) Curvas compostas quente e fria; c) Grande curva composta.

múltiplos níveis de temperaturas; ex.: Q_{H1} , Q_{H2}), torna-se possível a escolha de cada uma delas com base no nível de temperatura mais próximo da demanda, o que diminui as irreversibilidades do processo de transferência de calor.

Essencialmente, a utilidade é usada para satisfazer o balanço de energia do processo, e a GCC pode ser vista como um resumo deste balanço em função da temperatura, indicando a quantidade de calor que deve ser fornecido ou removido do processo em uma dada temperatura. Caso este balanço possa ser satisfeito com várias utilidades em diferentes níveis de temperatura (Q_{H1} , Q_{H2}), isto é melhor do que através de uma única utilidade em uma temperatura extrema. O benefício de se ter um conjunto de utilidades em múltiplos níveis de temperatura, é que algum trabalho útil pode ser obtido na degradação do calor de um nível, para outro abaixo. Um exemplo bastante conhecido seria a turbina a vapor, capaz de gerar potência utilizando a degradação do vapor de alta pressão para vapor de baixa pressão [3].

As maiores críticas à análise “*Pinch*” argumentam que a mesma é aplicável quando envolve apenas transferência de calor, não permitindo a otimização do sistema em casos envolvendo também a geração de potência. Entretanto, a construção da *grande curva composta exergética* (GCCE) da planta completa oferece justamente a possibilidade de se trabalhar com a energia térmica e mecânica simultaneamente, sendo um avanço para a utilização da análise “*Pinch*”. Embora o método, como explanado anteriormente, tenha sido introduzido em 1979, somente a partir de 1989 a GCCE passou a ser utilizada como ferramenta de análise para definição de metas do sistema de cogeração [4], ampliando ainda mais a sua utilização com a introdução do “*Total Site Integration*” (TSI) apresentado por Dhole e Linnhoff em 1992 [5].

Enquanto anteriormente o método trabalhava com um único processo, o TSI ampliou esta possibilidade, permitindo que vários processos servidos e ligados por um único sistema central de utilidades sejam analisados, obtendo-se metas de consumo do combustível, de produção na cogeração, de emissão de poluentes e de resfriamentos, antes mesmo da existência do projeto. Estas metas permitem orientar os projetistas nos mais variados casos, tanto de construção de novas unidades, como em ampliações ou modificações de unidades industriais existentes [6].

O desenvolvimento deste método têm sido realizado principalmente na Universidade de Manchester (UMIST), tendo a participação em consórcio de outros institutos de pesquisas e indústrias de vários países. Esta colaboração têm permitido a construção de procedimentos para determinação de metas envolvendo tanto aspectos globais de impacto econômico nas modificações de processos e de custos ambientais, quanto na construção de *softwares* para aplicação industrial na análise de alguns estudos de casos [7].

A análise com a GCCE é ilustrada na Fig. 2. Neste gráfico, o eixo vertical da temperatura utilizada na GCC, é substituído pelo termo da eficiência de *Carnot* ($\eta_{Carnot} = 1 - T_0/T$), onde T_0 é a temperatura ambiente de referência, e T representa as temperaturas envolvidas nos processos ou turbinas. Como a exergia equivale ao máximo de trabalho útil que se pode obter de um portador de energia até a

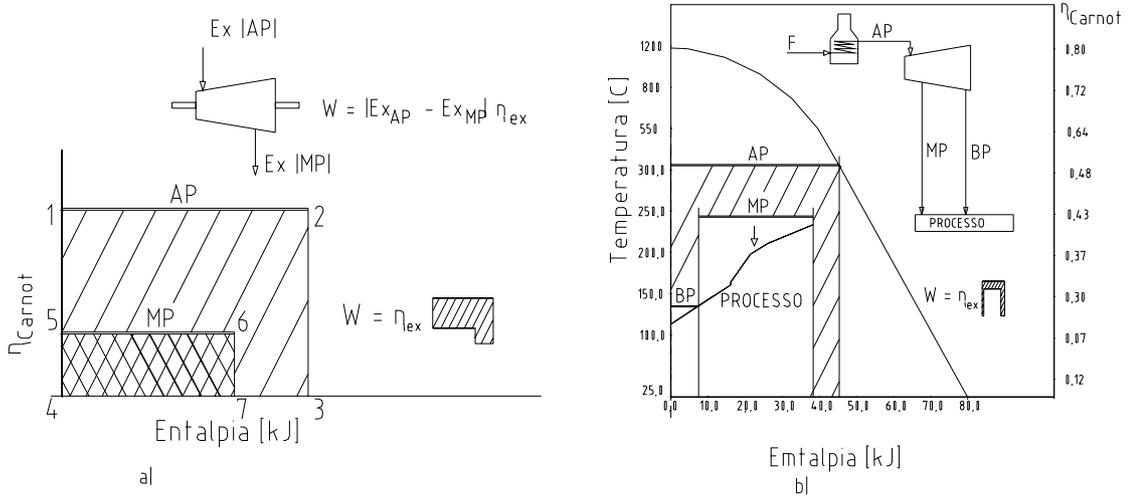


Fig. 2. a) η_{Carnot} x Entalpia (GCCE-ciclo de Carnot); b) η_{Carnot} x Entalpia (GCCE-sistema de cogeração).

temperatura ambiente, na representação do ciclo de *Carnot* (Fig. 2a), a exergia do vapor de alta pressão (AP) é indicada pela área 1-2-3-4, enquanto a exergia do vapor de escape (MP) pela área 4-5-6-7. Assim, o máximo de trabalho que uma turbina pode realizar é a diferença entre estas exergias (área 1-2-3-7-6-5), multiplicada pela eficiência exergética do equipamento (η_{ex}).

Quando se analisa simultaneamente a produção, a demanda de energia do processo é incluída no diagrama (Fig. 2b). Observa-se que a meta de cogeração pode ser obtida através da sobreposição das curvas, conforme os níveis de temperatura de escape do vapor para o processo. Na ilustração, além do vapor de média pressão (MP), utiliza-se também o vapor de baixa pressão (BP) como utilidade para o processo. Desta forma, pode-se visualizar o potencial de cogeração representado pela área listrada da figura, sendo que o valor real é obtido multiplicando-se as mesmas pelas eficiências das turbinas (η_{ex}).

2. ESTUDO DE CASO

Este trabalho se refere a uma usina de açúcar e álcool localizada no estado de São Paulo, Brasil. A capacidade de moagem de cana, o bagaço disponível desta operação e o seu poder calorífico estão na Tabela 1.

A planta “inicial” (Fig. 3a) gerava apenas vapor de 300° C e 2,0 MPa, que era utilizado nas turbinas para os acionamentos mecânicos (7.800 kW) e no turbo-gerador de 9.500 kW, sendo que o escape do vapor nestes equipamentos ocorria na pressão de 0,25 MPa. A potência mecânica se destinava exclusivamente para o auto-consumo da usina, enquanto havia um excedente de 2.620 kW de energia elétrica para venda a rede (24,2 kWh/tb; tb: tonelada de bagaço utilizado). Neste sistema, todo o vapor de escape servia como utilidade quente para o processo, que consumia 484 kg de vapor por tonelada de cana moída (tc).

Como utilizava apenas 87% do bagaço disponível (108,1 tb/h) e visava ampliar a oferta de energia elétrica excedente, a usina investiu na compra de uma nova caldeira (6,0 MPa e 480° C) e de um turbo-

Tabela 1. Dados de Moagem da Usina.

Moagem de Cana [kg/s]	Bagaço Disponível [kg/s]	Poder Calorífico do Bagaço [kJ/kg]
133,3 (480 tc/h)	34,6 (124,6 tb/h)	7.537

tc: tonelada de cana moída; tb: tonelada de bagaço

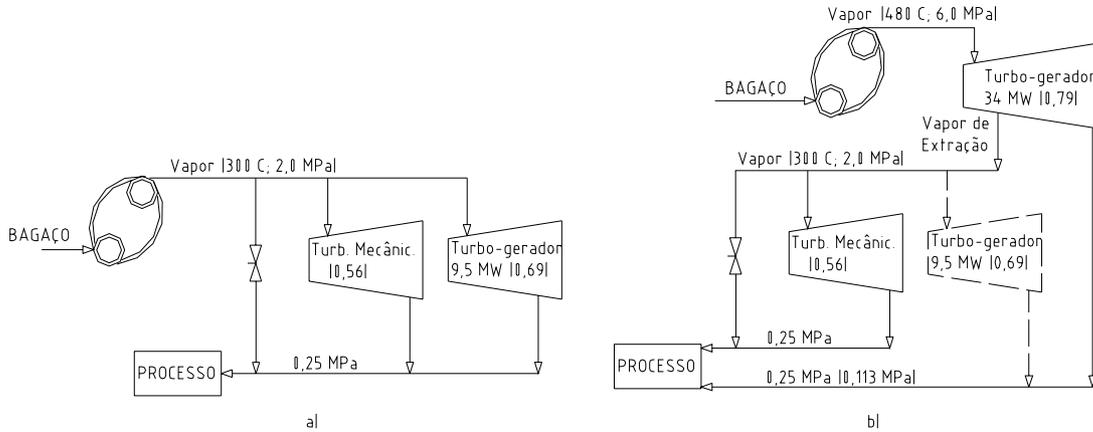


Fig. 3. a) Planta inicial; b) Esquema dos demais projetos de cogeração da usina.

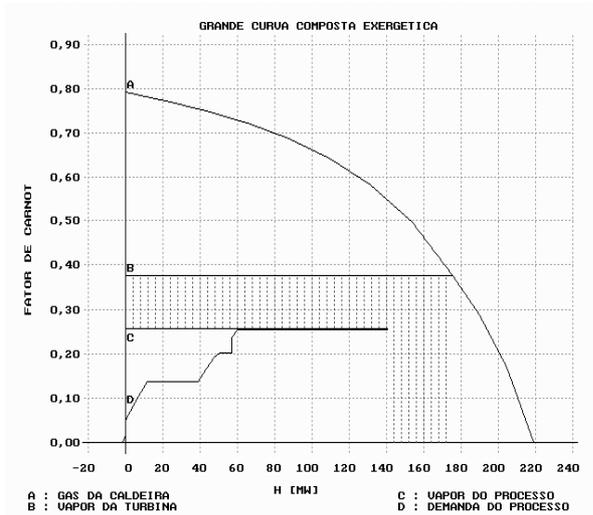


Fig. 4. Análise da planta inicial

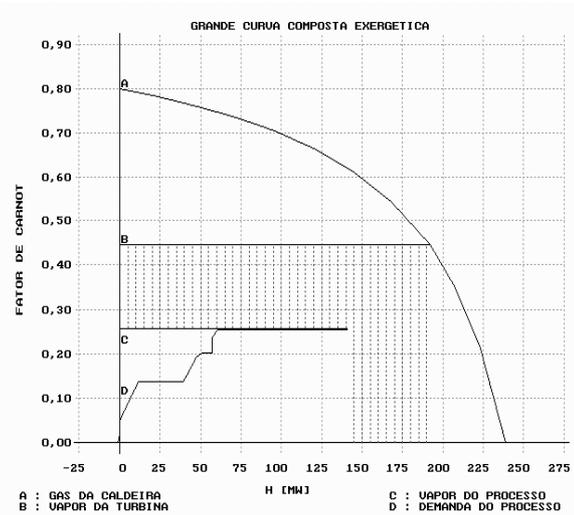


Fig. 5. Análise do projeto 1

gerador de 34 MW. Esta turbina opera com a pressão e a temperatura mencionadas, com extração de vapor a 2,0 MPa, e contra-pressão a 0,25 MPa (Fig. 3b). No novo projeto (projeto 1), a caldeira antiga (300° C, 2,0 MPa) e o turbo-gerador (9.500 kW) deixaram de operar, sendo que as turbinas mecânicas passaram a consumir o vapor de extração (2,0 MPa) do novo turbo-gerador. O escape de contra-pressão das turbinas se manteve como a utilidade quente aproveitada para o processo (0,25 MPa; ~127° C; Calor Latente (Δh) ~ 2.182 kJ/kg). Com as mudanças adotadas, a usina também passou a consumir menos potência mecânica (6.220 kW), a produzir mais energia elétrica (29.467 kW) aumentando o excedente para 20.617 kW. Assim, o consumo passou para 90% do bagaço disponível (111,9 tb/h), resultando no índice de 184,2 kWh/tb.

Construindo-se as GCCE (fator de Carnot X entalpia) para a planta inicial (Fig. 4) e para o “projeto 1” (Fig. 5) e fazendo-se a comparação entre ambas, verifica-se que o ganho de potência decorre do melhor aproveitamento exergetico dos gases da queima do bagaço (curva A) pelo vapor gerado na nova caldeira (curva B). Quando os níveis de pressão e temperatura se elevam, o aproveitamento da exergia do gás de queima do bagaço é maior, o que pode ser observado através da redução da área entre as curvas A e B e

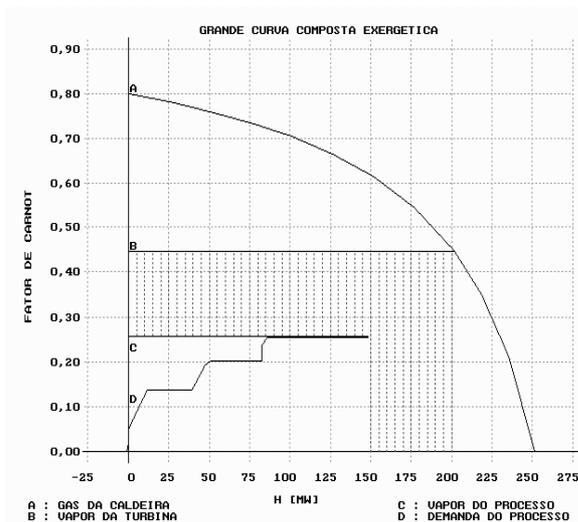


Fig. 6. Análise do projeto 2

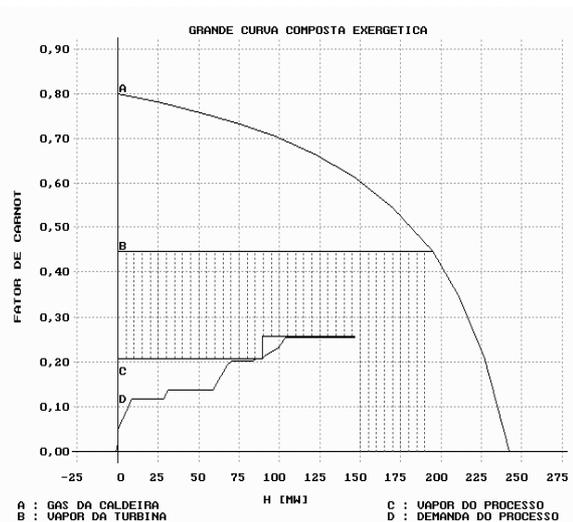


Fig. 7. Análise do projeto TSI

do aumento da área entre as curvas B e C. Isto confirma a importância da medida adotada para o aumento da eficiência térmica do sistema de cogeração.

Através do cálculo das áreas listradas entre as curvas do vapor na turbina (B) e do vapor condensado para o processo (C) nas Fig. 4-7, obtemos as metas de geração de potência para os sistemas de cogeração propostos (Tabela 2). Tomando o exemplo do projeto 1 (Fig. 5), resulta que a exergia disponível para a geração de potência é de 48.781 kW. Sabendo que neste projeto a produção total de potência mecânica da usina é de 6.220 kW com eficiência isoentrópica das turbinas de 0,57, a demanda total de exergia da mesma é de 10.912 kW. Para a produção de potência elétrica de 29.467 kW com eficiência das turbinas de 0,79, há uma demanda de 37.300 kW. Somando-se as demandas de exergia das turbinas mecânicas e do turbo-gerador, o total é de 48.212 kW, que é praticamente o mesmo valor obtido na área calculada anteriormente.

Com o objetivo de aumentar ainda mais o excedente de energia elétrica (projeto 2), os projetistas da usina propuseram algumas modificações no processo que aumentaria o consumo de vapor dos 484 kg/tc para 510 kg/tc, visando condensar maior quantidade de vapor sem perdas do mesmo para o ambiente (Fig. 6). Assim, o excedente de energia elétrica aumentaria ainda mais (22.431 kW), utilizando 95% (117,8 tb/h) do bagaço disponível (190,4 kWh/tb).

Quando os níveis de pressão e temperatura da nova caldeira são considerados constantes, observa-se nas Fig. 6 e 7 que as irreversibilidades para a geração de potência decorrem principalmente dos níveis de pressão do vapor de escape utilizado no processo.

Nos projetos anteriores (Inicial, 1 e 2), o escape de vapor nas turbinas ocorria em apenas um nível de pressão (0,25 MPa). Como neste sistema térmico da usina há mais de uma turbina, pode-se operar com diferentes pressões de escape no mesmo, tornando-se um sistema de utilidades em múltiplos níveis de temperaturas. Procurando eliminar as irreversibilidades entre o escape do vapor e o consumo de processo, neste trabalho (projeto TSI) propõe-se a utilização do escape de vapor também a 0,113 MPa (~103° C). Isto pode ser feito, mantendo o nível de escape do vapor das turbinas mecânicas em 0,25 MPa, e abaixando apenas a pressão de escape do turbo-gerador (0,113 MPa). Fazendo-se algumas modificações na forma de consumo de processo, o mesmo poderia ser de apenas 196 kg/tc na pressão de 0,25 MPa, transferindo a maior demanda para a pressão de 0,113 MPa, que consumiria 298 kg/tc, totalizando um consumo global de 494 kg/tc. Com esta medida seria possível aumentar a geração de energia elétrica excedente para 25.232 kW no turbo-gerador de 34 MW, sendo que este ganho é mais expressivo se considerarmos que o consumo de bagaço 113,5 tb/h também cai em relação ao projeto 2, aumentando ainda mais o índice de excedente da usina (222,3 kWh/tc).

Embora a redução da pressão de escape do vapor permita que se aumente o salto entálpico do turbo-

Tabela 2. Exergias do Processos do Projeto.

Exergia [kW]	Projeto Inicial	Projeto 1	Projeto 2	Proj. TSI
Vapor da Turbina	64.000	83.368	87.803	84.575
Vapor do Processo	34.648	34.586	36.394	30.725
Disp. Geração Potência	29.352	48.781	51.410	53.850
Processo (Ex ^{Qp})	29.467	29.467	29.977	27.092

Tabela 3. Produção e Consumo Energético da Usina.

Sistema	Vapor de Processo [kg/tc]	Consumo Processo Q _p [kJ/s]	Geração de Potência W _{liq} [kW]	E.Elétrica Excedente W _{exd} [kW]	Bagaço Consumo [tb/h]	Bagaço Consumo [%]
Inicial	484	140.799	17.260	2.620	108,1	86,8
Proj. 1	484	140.799	35.687	20.617	111,9	89,8
Proj. 2	510	148.423	37.541	22.431	117,8	94,6
Proj. TSI	494	146.372	39.304	24.214	113,5	91,5

Tabela 4. Índices Comparativos de Eficiência e Produção.

Sistema	¹ η _{P.CG}	² η _{exCG}	³ [kWh/tc]	⁴ [kWh/tb]
Inicial	0,387	0,155	5,5	24,2
Proj. 1	0,453	0,209	43,0	184,2
Proj. 2	0,453	0,206	46,7	190,4
Proj. TSI	0,473	0,210	50,5	213,3

$$1: \eta_{P.CG} = (W_{liq} + Q_p/2)/E_{fuel} \quad 2: \eta_{exCG} = (W_{liq} + Ex^{Qp})/Ex_{fuel}; \quad 3: W_{exd}/tc; \quad 4: W_{exd}/tb \quad ex_{fuel} = 1032,8 \text{ kJ/kg} [8]$$

gerador, esta medida aumenta também o volume específico do fluido diminuindo a capacidade da turbina. Isto pode ser contornado na usina em estudo, utilizando também o turbo-gerador de 9.500 kW que está parado como reserva. Como este turbo-gerador possui uma eficiência isoentrópica menor do que o turbo-gerador novo, a energia elétrica excedente diminuiria para 24.214 kW, com um índice de 213,3 kWh/tb.

A Tabela 2 apresenta os valores de exergia obtidos nas Fig. 4-7, a Tabela 3 contém os resultados gerais de consumo e produção para os projetos analisados, e na Tabela 4 estão os índices comparativos de eficiência energética, exergética e de produção elétrica excedente, tanto em relação a quantidade cana moída, quanto de bagaço utilizado.

3. CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstra que a análise “Pinch” e o “Total Site Integration” são metodologias que podem trazer grandes benefícios ao projeto de um sistema de cogeração em uma usina de açúcar e álcool, apresentando de forma gráfica o potencial máximo de geração de potência, com o mínimo consumo de combustível (bagaço). Mesmo para um projeto existente, as ferramentas de análise térmica se mostraram

bastante eficazes para a visualização das regiões de maiores irreversibilidades, permitindo sugestões de propostas alternativas para a redução das mesmas.

Além de possibilitar o aumento dos índices de produção de energia elétrica excedente, o projeto TSI obteve também melhores índices de eficiência energética e exergetica do sistema de cogeração decorrentes da melhor utilização do combustível. Estes resultados poderiam ser ainda mais significativos, caso as ferramentas de análise fossem utilizadas desde o início das novas implementações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que viabilizou a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Linnhoff, D. R. Mason e I. Wardle, "Understanding Heat Exchanger Networks", *Computer and Chemical Engineering*, 3, 295-302 (1979).
- [2] R. Smith, "State of the Art in Process Integration", *Applied Thermal Engineering*, 20, 1337-1345 (2000).
- [3] I. Singh, R. Riley e D. Seillier, "Using Pinch Technology to Optimize Evaporator and Vapor Bleed Configuration at the Malelane Mill", *Proc. S. Afr. Sugar Technol. Ass.* 71, 207-216 (1997).
- [4] B. Linnhoff e S. Ahmad, "Supertargeting: Optimum Synthesis of Energy Management Systems". *Journal of Energy Resources Technology*, V, 567-573 (1989).
- [5] V.R. Dhole e B. Linnhoff, "Total Site Targets for Fuel, Co-Generation, Emissions, and Cooling", *Computer and Chemical Engineering*, 17, 101-109 (1993).
- [6] B. Linnhoff e V.R. Dhole, "Targeting for CO₂ Emissions for Total Site", *Chemical Eng. Technol.*, 16, 252-259 (1993).
- [7] J. Klemes, V. R. Dhole, S. J. Perry e L. Puigjaner, "Targeting and Design Methodology for Reduction of Fuel, Power and CO₂ on Total Sites", *Applied Thermal Engineering*, 17, Nr. 8-10, 993-1003 (1997).
- [8] J. Szargut, D. Morris, F. e R. Steward, *Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes*, Hemisphere Publishing Co. New York (1988).

ENERGETIC EVALUATION IN SUGAR AND ALCOHOL PLANT USING PINCH ANALYSIS

Abstract – With the purpose to evaluate the cogeneration potential and the better thermal integration in sugar and alcohol plants, this work starts with a brief revision of Pinch analysis. After that, thermal evaluations in a sugar and alcohol plant in Brazil are accomplished. The plant has recently improved its cogeneration potential through the installation of a back pressure extraction turbine. The results obtained using pinch analysis are compared with the values foreseen by the plant designers, showing that higher net work could be obtained with lower fuel consumption and better energetic and exergetic efficiency.

