

OTIMIZAÇÃO DE PLANTA SUPERCRÍTICA EM USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

Ricardo P. Strambi
rpstrambi@gmail.com

Resumo. Com a desregulamentação do setor sucroalcooleiro no final da década de 90 e a crise no abastecimento de eletricidade, abriu-se para as usinas sucroalcooleiras a oportunidade de vender eletricidade à rede nacional, através do aumento da eficiência na planta de cogeração. Este artigo apresenta a aplicação do ciclo Rankine supercrítico. A otimização do sistema é baseada, sobretudo, na análise exergética. Os resultados indicam um aumento significativo da eficiência de geração de eletricidade, passando de 21% para 40%.

Palavras chave: setor sucroalcooleiro, cogeração, sistemas supercríticos de vapor.

1. Introdução

O Brasil tem sua matriz energética fortemente caracterizada pelo uso de fontes renováveis. Na geração de eletricidade, tem as hidrelétricas ocupando a maior parcela e, nos veículos automotivos, investiu muito na utilização do álcool, extraído da cana-de-açúcar. A Fig. 1.1 mostra esta diferença entre a matriz nacional, em que os renováveis (Biomassa e Hidroeletricidade) somam 45%, e a mundial, em que esta parcela é de 12,7%.

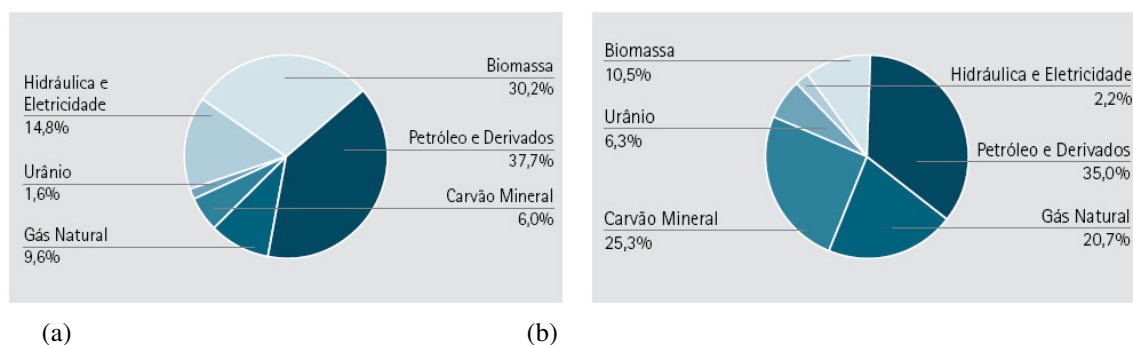


Figura 1.1 - Oferta interna de energia em 2006 (a) no Brasil e (b) no mundo.

Fonte: Balanço Energético Nacional 2007 (MME, 2007)

Esta proporção é muito vantajosa do ponto de vista ambiental, num momento em que se deseja reduzir as emissões de gás carbônico, e do ponto de vista econômico, pois reduz a necessidade de importação de combustíveis fósseis.

Na parcela da biomassa, os produtos da cana têm grande importância, não apenas pelo álcool, já citado, mas também pela queima do bagaço, que gera eletricidade e vapor de processo para o funcionamento de grande parte das usinas sucroalcooleiras.

A situação brasileira e mundial no início deste século apresenta um cenário favorável à modernização das usinas, que pode ser inclusive mais duradouro em comparação ao período de criação do Pró-álcool, devido principalmente ao incentivo mundial para a substituição dos combustíveis fósseis pelos biocombustíveis, à chegada dos carros de motor flexível ao mercado, que têm elevado o consumo de álcool combustível e às previsões de novas crises energéticas num futuro próximo.

Atualmente, as usinas de porte médio ou maior produzem energia suficiente para atender à própria demanda térmica e elétrica com uso de cogeração, sendo independentes do fornecimento externo de eletricidade. O objetivo das recentes pesquisas na área é permitir um excedente de energia que poderia suprir até 10 GW de potência para a rede nacional, segundo estimativas mais recentes.

Em uma usina típica, a geração de vapor é feita através de sistemas convencionais de contrapressão e de condensação-extração. Além de aprimoramentos nestes dois tipos, estuda-se a aplicação de outros dois sistemas mais avançados: o ciclo combinado (turbina a gás/ turbina a vapor) com gaseificação do bagaço (BIGCC), que já tem sido tratado exaustivamente em outros estudos, e o ciclo a vapor supercrítico (SuST), estudado no presente trabalho.

O objetivo deste projeto é estudar a aplicação de sistemas supercríticos às plantas de cogeração de usinas sucroalcooleiras, otimizando a planta através de análises energéticas e exergéticas. Otimização, neste contexto, significa maximizar a eletricidade excedente na usina através da configuração da planta, tendo como variáveis as pressões de extração para aquecimento de água de alimentação.

2. Planta de Cogeração da Usina

A planta de uma usina de açúcar e álcool pode ser dividida em cinco principais subsistemas, que apresentam intensa troca de produtos e energia: sistema de extração, tratamento de caldo, produção de açúcar, produção de etanol e sistema de cogeração.

O sistema que mais interessa a esse projeto é o de geração de energia da usina. Atualmente, o bagaço com 50% por cento de umidade é secado e então queimado numa fornalha para fornecer calor num gerador de vapor. O valor típico de pressão na entrada das turbinas das usinas atuais é de 21 bar, tendo um vapor de 2,5 bar (absoluto) na saída. As turbinas podem ser turbo-bombas, que acionam os picadores, desfibriladores, ternos de moenda e bomba de alimentação das caldeiras, ou turbogeradores, que geram a eletricidade utilizada na usina. O vapor de escape é utilizado então nos processos da usina, principalmente na evaporação, como visto acima (definindo o processo como **cogeração**). O condensado não contaminado retorna então às caldeiras (CAMARGO, 1990).

Tabela 2.1 – Dados de uma usina típica (PELLEGRINI, 2007)

Cana-de-Açúcar Esmagada	20.000 tc / dia
Produção de Açúcar	1.850.900 kg / dia
Produção de Etanol	749 m ³ / dia
Bagaço Excedente	7,8 %
Eletricidade Fornecida à Rede	0 kWh / tc
Consumo de Vapor	541 kg / tc
Taxa de Destruição de Exergia	565 MW

Como citado anteriormente, a maior parte das usinas é auto-suficiente em energia, mas não produz eletricidade para a rede, o que poderia ser feito, como se vê pela grande quantidade de exergia que é destruída. Esta destruição é causada em grande parte pelas irreversibilidades externas associadas às grandes diferenças de temperatura nas trocas de calor características do ciclo Rankine.

Parte das perdas de exergia da caldeira está situada no economizador, em que os gases de combustão quentes fornecem calor para aquecer a água da temperatura ambiente até a temperatura de saturação. As diferenças de temperatura também são acentuadas no tubulão, que opera em temperatura constante, definida pela pressão que se atinge com a bomba. Ainda, alguma quantia de exergia é perdida no superaquecedor.

A Tab. 2.1 apresenta alguns valores importantes na análise energética para uma usina típica (t_c =tonelada de cana).

Entre as propostas atuais para redução das irreversibilidades, está uma solução ainda não explorada no Brasil, que é o ciclo Rankine supercrítico. Este ciclo opera de modo semelhante a um ciclo a Rankine qualquer, com a diferença de que o vapor é gerado em pressões supercríticas (acima de 220 bar). Nesta condição, não há separação entre fases, ou seja, o fluido passa gradualmente do estado líquido para o vapor.

Atualmente, as plantas de geração de eletricidade supercríticas têm alcançado valores de pressão da ordem de 290 a 300 bar, chegando a temperaturas de superaquecimento de 600°C. Algumas pesquisas já prevêem a utilização de vapor de 700°C (BUGGE, 2006).

Os custos iniciais deste sistema são elevados, pois são necessários uma bomba que trabalhe com maiores pressões, materiais que suportem maior temperatura e pressão e, principalmente, a substituição do tubulão de vapor por uma caldeira de passe único. A ausência de separação entre fases impede o uso da circulação da água num tambor, de modo que o fluido que sai do economizador é aquecido em um único passe até o superaquecedor (EL-WAKIL, 1984).

Porém, as altas eficiências atingidas podem compensar este investimento, e coube a este projeto otimizar uma planta supercrítica pra uma usina de açúcar e álcool.

3. Metodologia

Um exemplo de planta supercrítica de cogeração está mostrado na Fig. 3.1.

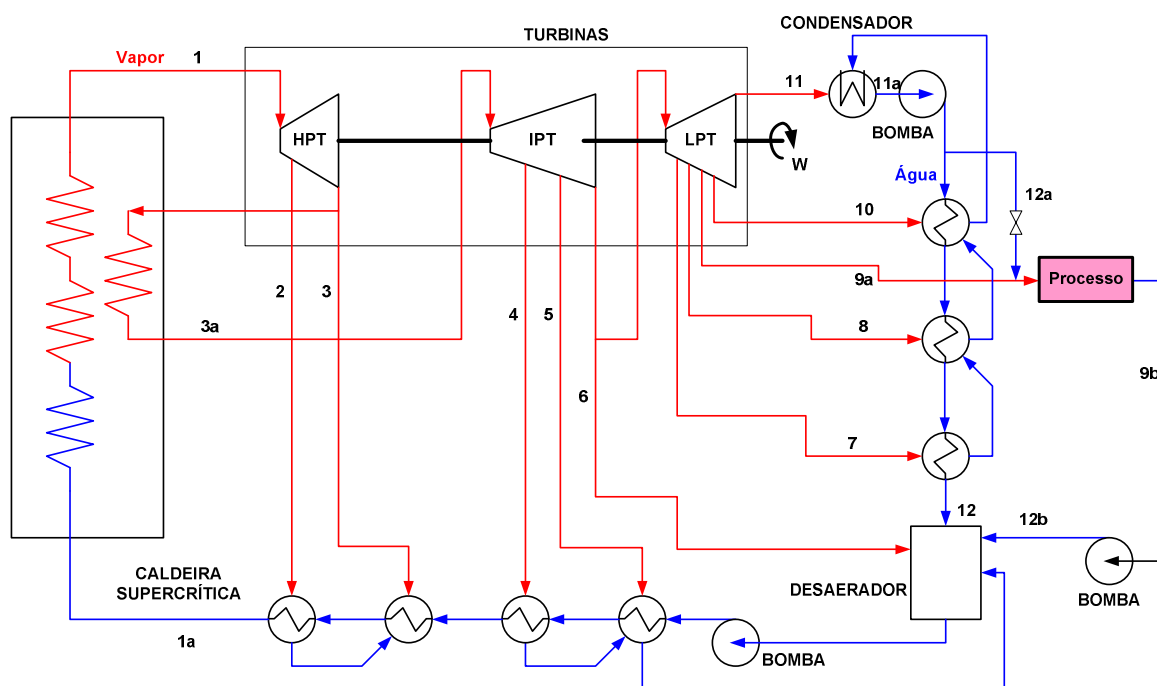


Figura 3.1. Planta do sistema supercrítico.
(modificado de PELLEGRINI, 2007)

Como se vê, o sistema é composto por uma caldeira, três turbinas com extrações intermediárias de vapor para regeneração, algumas bombas, um condensador, um desaerador e uma linha de extração para utilização do calor nos processos da usina, constituindo-se um sistema de cogeração.

O desaerador é um equipamento com a principal função de expulsar os gases da atmosfera que vazam para dentro da tubulação de pressão abaixo da atmosférica. Seu funcionamento exige a utilização de vapor, que é também extraído das turbinas. Como nele ocorre uma mistura entre a água de alimentação e o vapor de alta pressão, ele também atua como regenerador, aumentando a eficiência da planta.

Outros dados sobre o sistema simulado podem ser vistos na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 – Dados do ciclo supercrítico simulado

Produção de cana da usina	20.000 tc / dia
Porcentagem de bagaço extraído da cana	25%
Poder Calorífico Inferior do bagaço	15000 kJ / kg
Eficiência da caldeira	89 %
Vapor necessário ao processo	380 kg de vapor / tc
Pressão do vapor de processo	2,5 bar
Temperatura útil do processo	118 °C
Pressão na entrada da turbina de alta	290 bar
Temperatura na entrada da turbina de alta	600 °C
Temperatura de reaquecimento	600 °C
Pressão no condensador	0,1 bar
Potência elétrica consumida na usina	30 kWh / tc

A partir do resultado da simulação, faz-se a análise exérgica dos equipamentos, em que se vê qual a magnitude da irreversibilidade de cada um. O resultado desta análise direciona a otimização do sistema, pois os equipamentos que produzem maiores irreversibilidades devem ser mais focados na busca de melhorias no sistema.

Para cada configuração, pode-se calcular o fator de utilização de energia da planta, dado por:

$$fue = \frac{\dot{W}_{liq} + |\dot{Q}_{proc}|}{\dot{B}_{comb}} \quad (1)$$

em que $\dot{W}_{liq}$ é a potência líquida da planta de cogeração, $\dot{Q}_{proc}$ é o calor trocado na linha do processo e $\dot{B}_{comb}$ é a energia liberada pelo combustível, dada por $\dot{m}_{comb} \cdot PCI$.

Porém, é de maior importância para a análise o rendimento exérgico da planta, em que se utilizam as grandezas exérgicas, que avaliam o verdadeiro valor termodinâmico dos insumos e produtos. Desta forma, seu valor é dado por:

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\dot{W}_{\text{liq}} + |\dot{B}_{\text{proc}}|}{\dot{B}_{\text{comb}}} \quad (2)$$

Como o objetivo do aumento na eficiência é gerar um excedente de eletricidade para a rede, este valor também deve ser considerado na avaliação dos sistemas.

4. Otimização da Planta

A planta simulada no início do projeto possuía grande quantidade de extrações da turbina para regeneração, o que faz com que o sistema tenha alta eficiência. Porém, na prática, isto leva também a altos custos de investimento. Assim, a escolha sobre a adição de um trocador de calor regenerativo deve ser feita com base na ponderação entre seu custo e os ganhos por ele acarretados.

A primeira etapa deste processo é calcular as variações no rendimento da planta conforme sua configuração é alterada. Assim, retiram-se trocadores ou trocam-se suas posições, otimizando-se as pressões de extração para cada configuração, através do método de busca direta do *EES* (Engineering Equation Solver).

O método de busca direta é uma série de buscas unidimensionais. A cada passo, são fixadas todas as variáveis, exceto uma, para a qual é procurado um máximo. Encontrado este valor, o processo é repetido para as outras variáveis e assim segue, em espiral, até atingir um máximo para todas (KLEIN, 2007).

A análise exergética dos trocadores identifica aqueles em que há maior destruição de exergia, que devem ser alterados ou retirados do sistema, orientando assim a otimização da configuração.

5. Resultados

Um exemplo de sistema supercrítico otimizado apresenta os valores mostrados na Tab. 5.1.

Tabela 5.1 – Resultados da otimização do sistema supercrítico

Potência elétrica gerada	205,5 kWh / tc
Potência elétrica excedente	175,5 kWh / tc
Fator de utilização de energia	70,2 %
Rendimento exergético	41,8 %
Vazão mássica de vapor na caldeira	862 kg de vapor / tc

Uma forma elucidativa de apresentar o balanço exergético é através de um gráfico de “pizza”, em que aparecem as parcelas de exergia útil e a exergia destruída em cada parte da planta, de modo que o total representa a exergia do combustível. Esta figura está mostrada na Fig. 5.1 para certa configuração otimizada.

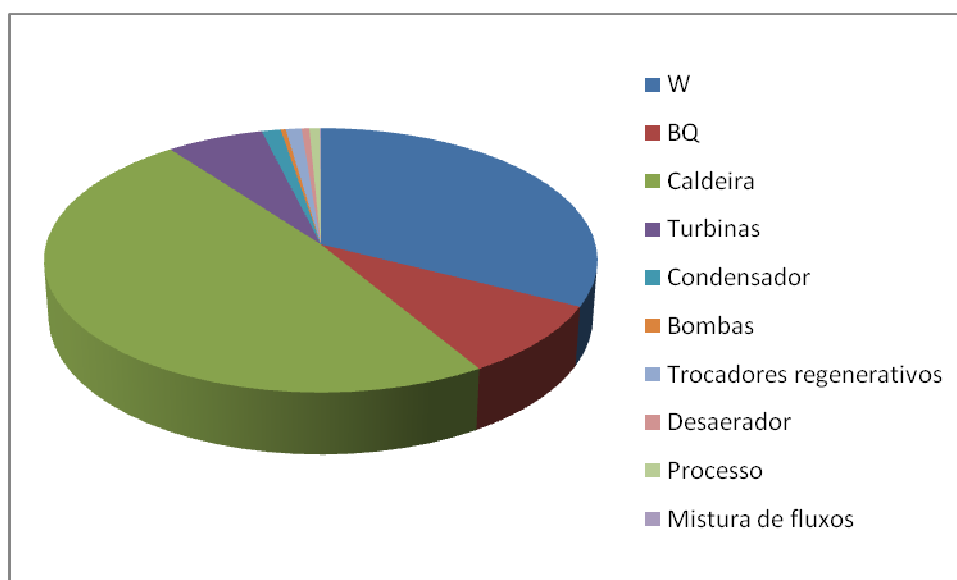


Figura 5.1 – Uso e destruição de exergia na planta

Neste gráfico, W é o trabalho produzido, BQ é a exergia associada ao calor do processo, para cada equipamento, é representada a exergia destruída. Muitas coisas podem ser imediatamente visualizadas nesta figura. O rendimento exergético da planta é o conjunto das parcelas W e BQ. De modo semelhante, vê-se a razão, na saída do sistema, entre o trabalho e o calor fornecido. Finalmente, a distribuição de irreversibilidades também é prontamente visualizada no gráfico.

No processo de otimizar a configuração da planta, tem sido verificadas as variações na potência líquida para cada configuração. Alguns exemplos são mostrados na Tab. 5.2, conforme a seguinte notação:

- Sempre há regeneradores na pressão de reaquecimento
- HARP significa “Heating Above Re-heat Pressure”, ou Aquecimento Acima da Pressão de Reaquecimento, e é uma característica importante na determinação do sistema; se houver, será apenas um trocador
- A configuração é indicada como (A/B/C)
- A é a quantidade de regeneradores entre a pressão de reaquecimento e a do desaerador
- B é a quantidade de regeneradores entre a pressão do desaerador e a do processo
- C é a quantidade de regeneradores entre a pressão do processo e a do condensador
- Estão fixadas apenas a pressão e a temperatura da saída da caldeira (290 bar, 600 °C) e do condensador (0,1 bar, 45°C), assim como a temperatura do reaquecimento (600°C).

Tabela 5.2 – Potência líquida de algumas configurações

Sem HARP	Potência (kW)	Com HARP	Potência (kW)
(2/2/1)	170.320	(2/2/1)	171.564
(2/2/0)	166.483	(2/2/0)	167.717
(2/1/0)	166.126	(2/1/0)	167.372

Deve-se lembrar que, apesar da retirada de alguns trocadores levar a uma pequena queda percentual na potência, o valor de potência perdido pode representar uma grande quantidade de dinheiro.

Os dados dos fluxos da planta, relativos à numeração do esquema na Fig. 3.1, são mostrados na Tab. 5.3. Esta plana representa um sistema otimizado (2/2/1) com HARP.

Tabela 5.3 – Fluxos relativos à Fig. 3.1

Fluxo	Vazão (kg/s)	Pressão (bar)	Temperatura (°C)
1	199,5	290,0	600,0
1a	199,5	290,0	332,3
2	18,0	130,8	471,3
3	23,4	89,1	416,1
3a	158,1	89,1	600,0
4	10,4	44,7	498,3
5	8,3	23,0	410,4
6	6,3	10,2	316,1
7	2,1	5,3	255,6
8	5,6	3,5	197,6
9a	84,3	2,5	193,8
9b	88,0	2,5	127,4
10	0,0006	0,2	59,8
11	41,2	0,1	45,8
11a	48,9	0,1	45,8
12	45,2	10,2	152
12a	3,7	10,2	45,9
12b	88,0	10,2	127,6

Na Fig. 5.2 é mostrado o diagrama T-s (Temperatura VS Entropia) para esta planta, com linhas isobáricas nas pressões da caldeira (290 bar), de reaquecimento (89,1 bar), do processo (2,5 bar) e do condensador (0,1 bar).

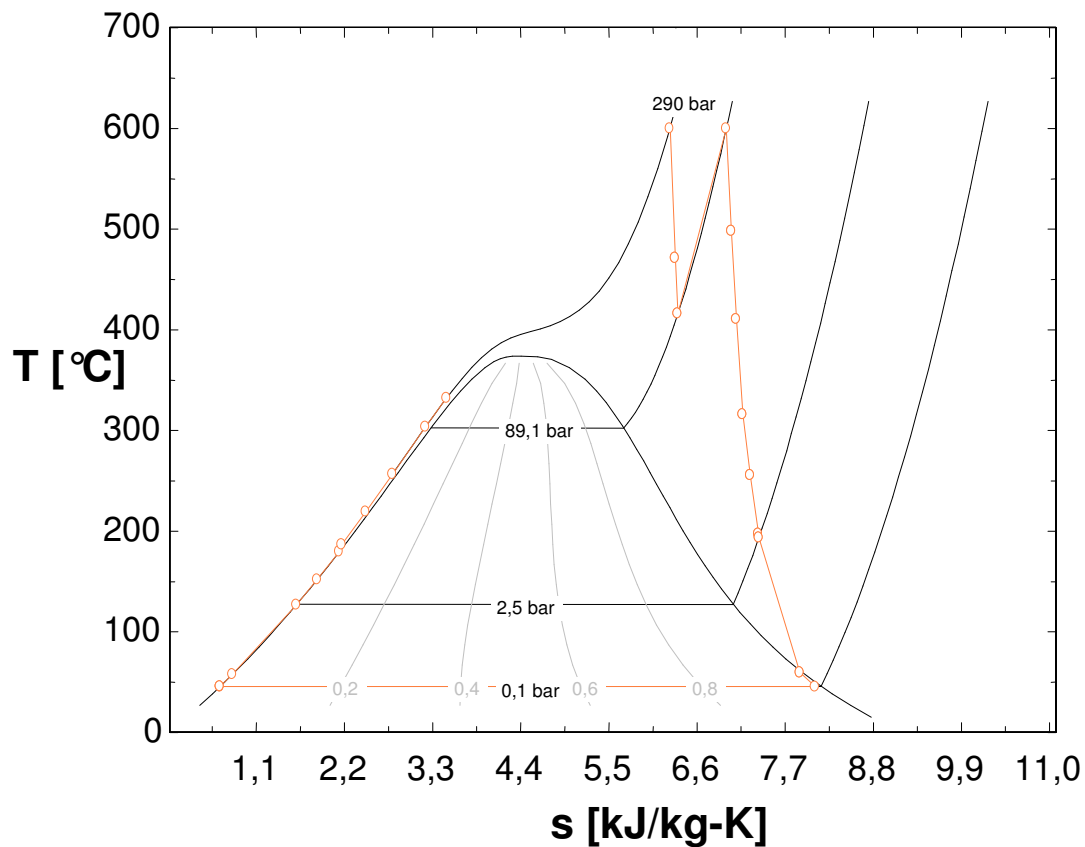


Figura 5.2 – Diagrama T-s da planta mostrada na Fig. 3.1

6. Discussão

Como se vê na Fig. 5.1, grande parte das irreversibilidades está localizada na caldeira. Isto se deve, em grande parte, à reação química que ocorre neste volume de controle, que é um processo altamente irreversível. Quanto a este efeito, não há muito que se possa fazer, dentro dos limites desta aplicação.

Porém, parte considerável desta irreversibilidade está associada à grande diferença entre a temperatura dos gases de combustão e a temperatura média do vapor. A própria caldeira supercrítica já é uma forma de reduzir estas perdas. Mas a pressão de reaquecimento também é um valor que pode ser otimizado através deste valor.

O uso de trocadores regenerativos é uma forma de minimizar as irreversibilidades na caldeira, pois faz com que a água entre nela com temperatura elevada. Porém, isto cria novas irreversibilidades, devido às trocas de calor nos regeneradores. A otimização da planta é uma forma de balancear estes ganhos e perdas.

Em seguida, as turbinas são as maiores geradoras de irreversibilidades, devido a dois fatores principais: atrito do escoamento e o vazamento de vapor através do espaço entre a extremidade das pás e a parede. Sobre este segundo fator, é interessante notar uma limitação da aplicação do sistema supercrítico. Como o vapor terá menor volume específico em pressões supercríticas, as turbinas também terão diâmetro menor que o usual, para uma dada vazão. Com menor diâmetro,

este espaço fica proporcionalmente maior. Disso se conclui que, para plantas de baixa potência (e, portanto, baixa vazão), este vazamento pode ser muito excessivo e inviabilizar a planta (AVRUTSKII, 2005).

No caso das bombas, o valor é pequeno em função da baixa potência utilizada nestes equipamentos.

A Tab. 5.2 mostra que ocorrem quedas significativas de potência com a retirada de alguns trocadores regenerativos, de modo que estas decisões devem ser feitas cuidadosamente. Por exemplo, a utilização do HARP aumenta cerca de 1 MW na potência gerada.

Alguns valores calculados estão distantes daqueles encontrados na literatura, o que pode significar apenas uma diferença de condições ótimas entre este e outros estudos, mas também pode ser que haja uma limitação tecnológica que precisa ser melhor estudada. Como exemplo, tem-se a pressão do desaerador, que varia entre 7 bar e 11 bar, e a pressão de reaquecimento, cujo valor ótimo varia entre 80 bar e 90 bar, sendo que na literatura são encontrados valores de 40 bar.

7. Conclusões

Neste trabalho foi feita revisão histórica da indústria da cana e uma descrição sucinta da planta da usina. Após revisão dos fundamentos para análise comparativa dos sistemas de potência, foi apresentado um estudo da aplicação de sistemas supercríticos de vapor na planta de cogeração das usinas sucroalcooleiras. Os resultados da simulação indicaram uma eficiência exergética significativamente maior do que a das usinas atuais, mostrando a possibilidade de se tornar viável o investimento em geração de eletricidade para a rede.

O sistema supercrítico não é viável em usinas com produção menor do que 20.000 toneladas de cana por dia, devido ao problema das turbinas de pequeno diâmetro. Naquelas em que ele puder ser aplicado, a eficiência exergética irá variar dos atuais 21% para mais de 40%, gerando uma grande eletricidade excedente, da ordem de 175 kWh por tonelada de cana.

A planta a ser utilizada deve ser composta por sete trocadores regenerativos a partir da pressão de reaquecimento, no esquema (2/2/1). A decisão de adicionar um oitavo regenerador em pressão acima daquela de reaquecimento cabe a cada usina, caso considere que o custo adicional compense um ganho de 1MW.

Referências

- AVRAM, P; STARK, T "Integration of ethanol production with a sugar factory producing maximum cogeneration", International Sugar Journal, Vol. 106, No.1263, pp.126-137, 2004.
- AVRUTSKII, GD et al "Development of engineering solutions for creation of turbine plant for power unit with supercritical steam parameters", Power Technology and Engineering, Vol. 39, No. 6, pp. 342-346, 2005
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia "Balanço Energético Nacional 2007" , MME/EPE, Rio de Janeiro, 2007
- BUGGE, J; KJÆR, S; BLUM, R "High-efficiency coal-fired power plants development and perspectives", Energy, Vol. 31, pp. 1437-1445, 2006.
- CAMARGO, CA (coord.) "Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Alcool", IPT, São Paulo, 1990.
- EL-WAKIL, MM "Powerplant Technology", McGraw-Hill Book Co, Cingapura, 1984.
- KLEIN, SA Engineering Equation Solver, Academic Professional V7.942-3D, 2007, 1 CD-ROM
- PELLEGRINI, LF; BURBANO, JC; OLIVEIRA JUNIOR, S "Exergy analysis of advanced cogeneration plants for sugarcane mills: supercritical steam cycles and biomass integrated gasification combined cycles", Proceedings of COBEM, 19th International Congress of Mechanical Engineering, Brasília, 2007.
- PELLEGRINI, LF "Estudo da Cogeração em Ciclos Combinados com Gaseificação de Bagaço de Cana-de-Açúcar", Trabalho de Formatura, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

OPTIMIZATION OF UTILITIES PLANT IN SUGAR AND ALCOHOL MILLS

Ricardo P. Strambi

rpstrambi@gmail.com

Abstract. The de-regulation of the sugar and alcohol sector and the crisis in the supply of electricity in Brazil the end of the 1990's open the possibility for sugarcane mills to sell electricity to the national grid. This paper explores the application of the supercritical steam. Systems optimization is mostly based on exergetic analyses. Preliminary results show a significant increase in the efficiency of electricity generation, rising from 21% to 40%.

Keywords. *Sugar and alcohol sector, cogeneration, combined cycle, supercritical steam turbine.*