

## Cogeração

# Potencial de energia da indústria depende do bagaço de cana disponível

Celso Procknor\*

ACERVO UNICA

O rendimento das usinas é sempre um fator primordial, que define a eficácia da agroindústria. Discutem-se sempre quantos sacos de açúcar e quantos litros de álcool são produzidos por tonelada de cana processada. Agora, na era da bioenergia, é necessário prever também quanta energia será vendida por tonelada de cana. Assim, além de sacos/tc e de m<sup>3</sup>/tc, começa-se a pensar em kW.h/tc. Normalmente, o potencial de venda de energia elétrica, em uma usina de açúcar e álcool, varia de 60 kW.h/tc a 80 kW.h/tc, dependendo do grau tecnológico em que se encontra a instalação. Essa faixa de variação é grande, de mais de 30%. Assim, é interessante discutir os fatores que a influenciam, para verificar em qual ponto cada unidade industrial se encontra. Para facilitar a discussão, admite-se que toda a energia esteja sendo vendida na safra, embora todos os conceitos aqui mencionados possam ser facilmente aplicados para a geração na entressafra, com bagaço excedente.

O primeiro passo para avaliar o potencial de co-geração é estimar a disponibilidade de combustível: o bagaço de cana. A quantidade de bagaço depende, basicamente, do teor de fibra da cana e da quantidade de palha que está sendo trazida da lavoura. Mas a umidade do bagaço também influencia a quantidade



Cortes de mudas na Usina da Barra; Barra Bonita, SP; 2001

produzida. Com teor médio de fibra na cana variando de 12% a 13,5% e umidade do bagaço na faixa de 50%, produzem-se de 25% a 28% de bagaço, em relação à cana. Nesse caso, admite-se que palha não é trazida da lavoura. Caso a palha seja considerada, é preciso levar em conta, nos cálculos a seguir, que o seu poder calorífico é diferente do poder calorífico do bagaço. É sempre prudente admitir que uma parcela de pelo menos 5% do bagaço deve ser reservada para as diversas partidas e paradas da planta durante a safra e, ainda, para estoque que viabilizará pôr em marcha a safra seguinte. Dessa maneira, o bagaço líquido produzido passa a ser de 23,7% a 26,6%, em relação à cana.

As caldeiras modernas e com boa eficiência, recebendo água a 115°C e bagaço com 50% de umidade, conseguem produzir 2,2 kg de vapor a alta pressão e a alta temperatura (acima de 67 bar e de 520°C). Portanto, o nosso combustível nos permite produzir de 52,1% a 58,5% de vapor, em relação à cana. Para simplificar as contas, admite-se um valor médio de 55% de vapor em relação à cana, mas nunca esquecendo de que a fibra na cana pode fazer variar a disponibilidade de vapor em até 12,3% ou mais, se for considerada a palha, por exemplo. O consumo de vapor no processo vem se reduzindo progressivamente. Era de cerca de 55% no passado e, hoje em dia, já existem várias unidades trabalhando na faixa de 40% de vapor, em relação à cana. A tendência é fazer esse valor baixar ainda mais, quando se conseguir, principalmente, baixar o consumo de energia para a produção de álcool. Por outro lado, esse consumo no processo depende de várias particularidades de cada usina. O processo pode ser mais complexo, com produção de açúcar refinado e de açúcar líquido, além de outros subprodutos, como levedura seca.

A produção de álcool anidro em maior escala ou de álcool neutro também altera as condições de consumo de vapor no processo. Considere-se, no exemplo, um consumo de 40% de vapor, em relação à cana. Com as considerações acima,

verifica-se que, por tonelada de cana, vamos passar 400 kg de vapor (40%) em turbinas de contrapressão, para poder atender às necessidades do processo; e vamos passar 150 kg de vapor (55%-40%) em turbinas de condensação. O consumo específico de vapor nas turbinas vai depender das condições de pressão e de temperatura do vapor, bem como da eficiência das turbinas. Cada vez mais será compensador passar a usar turbinas de reação, em lugar das tradicionais turbinas de ação. Admitindo um vapor com 66 bar/515°C, as turbinas de contrapressão têm um consumo aproximado de 5,7 kg/kW.h, e as turbinas de condensação têm um consumo aproximado de 4,0 kg/kW.h, sendo que, nesse último valor, considera-se o consumo de energia parasita (bombas e torres para a água de resfriamento). Fazendo as contas, fica evidente a geração de até 107,7 kW.h/tc ( $400/5,7 + 150/4,0 = 107,7$ ).

Esse valor é a energia gerada, mas a energia a ser vendida deve levar em conta o consumo interno da planta. Normalmente, o consumo de energia elétrica nas usinas com moendas varia de 30 a 35 kW.h/tc. Mais ou menos a metade desse valor é consumida nas instalações de preparação e de extração do caldo e a outra metade é consumida nos muitos motores elétricos da instalação. Em usinas com difusor, o valor global fica na faixa de 25 a 30 kW.h/tc. Considerando-se uma usina com moendas e adotando-se um valor médio de consumo de 32,7 kW.h/tc, o saldo para venda ficaria em  $107,7 - 32,7 = 75$  kW.h/tc. Com aumento da pressão do vapor para 100 bar, pode-se chegar a 80 kW.h/tc. É indispensável mencionar que estamos falando de números aproximados. Cada caso deve ser analisado cuidadosamente, com suas particularidades.

#### DIFUSOR

Pode-se ter a falsa impressão de que, com difusor, vamos sempre vender pelo menos 5 kW.h/tc a mais, mas não é verdade. Normalmente, o difusor trabalha com mais umidade e produz um bagaço

com maior umidade. Bagaço mais úmido produz menos vapor e mais embebição, significando maior consumo de vapor no processo. É preciso fazer as contas. No exemplo acima, o consumo de energia na planta varia de 27,8% a 32,5% da energia gerada. Com um projeto eficiente do ponto de vista energético, pode-se aumentar o faturamento de energia em até 4,5%, um valor considerável.

Ainda no caso acima, com um processo consumindo 45% ou 35% de vapor, serão vendidos, respectivamente, 71,2 ou 78,7 kW.h/tc. Ou seja, passar de 45% para 40% aumenta a venda em 5,3%. Mas passar de 40% para 35% aumenta a venda em 4,9%. Como geralmente a segunda mudança é muito mais cara que a primeira, é preciso verificar cuidadosamente a relação custo/benefício dos investimentos. Por outro lado, um ciclo de condensação é sempre menos eficiente do que um ciclo de contrapressão. Na verdade, a palavra co-geração deveria ser aplicada somente ao ciclo de contrapressão, pois significa, em realidade, gerar a energia elétrica ao mesmo tempo em que se gera a energia térmica para o processo. Com turbinas de condensação não se está gerando energia térmica para o processo, mas jogando calor fora para a atmosfera, pelas torres de resfriamento. Oxalá chegue logo o tempo em que seja possível produzir álcool a partir do bagaço excedente, eliminando os ciclos de condensação nas usinas. Então, o processo como um todo será ainda mais eficiente. Se, no exemplo acima, com a venda de 75 kW.h/tc, houver uma safra de 2.500.000 t, considerando os preços dos últimos leilões, a receita com a venda de energia será de aproximadamente R\$ 26 milhões. Nada mal!

#### PRESSÃO MAIS ALTA

Mas, até agora, foi considerado sempre vapor com pressão de 68 bar. E se a pressão for mais alta, compensa? Existem dificuldades que os empresários do setor estão enfrentando, já que precisam encomendar caldeiras de grande porte para poder iniciar projetos de novas plantas

para produzir etanol e energia. A caldeira é o equipamento da nova planta com o maior custo individual. É um bem de capital com vida útil prevista de 30 anos, no mínimo. Modificações ou adaptações posteriores podem custar muito dinheiro. Dessa maneira, uma decisão inadequada pode gerar arrependimento que não é de fácil correção. Há cerca de oito anos, havia muita discussão a respeito da conveniência de passar de 42 bar para 65 bar. Hoje em dia, a pressão de 42 bar está praticamente abandonada. A grande questão agora é: vale a pena continuar a subir a pressão do vapor? Até quando? E a temperatura?

A geração de energia com turbina a vapor é um ciclo Rankine que pode ser bem observado em um diagrama T/s (temperatura/entropia). A teoria mostra que o trabalho é gerado em função das variações de temperatura e de entropia. Quanto maior for a temperatura do vapor motriz (vapor vivo) e quanto menor for a temperatura do vapor de contrapressão (ou de condensação), maior será o trabalho que poderá ser produzido. No diagrama T/s, a maior temperatura é a de saturação do vapor; analisando o diagrama, é fácil entender porque se trabalha sempre com vapor superaquecido. Com o aumento da temperatura do vapor, aumenta o diferencial das temperaturas e há casos em que se ganham até 50% a mais de trabalho com vapor superaquecido, em comparação com vapor saturado.

Entretanto, o ciclo indicado no diagrama T/s é teórico e, na prática, deve-se lidar com as eficiências dos equipamentos reais. Nem a turbina a vapor e nem a bomba de alimentação de água da caldeira são 100% eficientes, havendo limitações práticas para as várias partes do ciclo teórico. Para uma visualização mais fácil do que ocorre com os equipamentos na prática, é mais indicado o diagrama de Mollier, um diagrama H/s (entalpia/entropia). Para determinar qual seria o trabalho produzido (diferença de entalpia) por uma turbina com eficiência teórica de 100%, basta traçar uma linha vertical (condição

isoentrópica), do ponto da pressão alta (vapor vivo) até o ponto da pressão baixa (vapor de escape ou de condensação).

Infelizmente, na realidade, uma boa turbina a vapor tem eficiência na faixa de 85% a 88% e, portanto, é preciso caminhar para a direita do diagrama H/s, em cima da linha da pressão do vapor de escape, até chegar à temperatura real do vapor, e, então, encontrar o valor da diferença efetiva das entalpias, na entrada e na saída da turbina. Esta pequena introdução teórica serve para embasar as recomendações que seguem. A diferença de temperatura é que vai definir o potencial de geração de energia. A temperatura do vapor motriz é definida pelo projeto da caldeira, mas a temperatura do vapor de escape é definida pela eficiência da turbina. Portanto, antes de subir a temperatura do vapor, é indispensável conversar com os fornecedores potenciais das turbinas, verificando seus custos e as suas eficiências, para se ter certeza de que vai haver, efetivamente, um aumento do diferencial de temperaturas.

No processo, o vapor de escape possui usualmente temperatura de 125 a 127°C. Para evitar riscos de condensação por perdas de calor, é recomendável trabalhar com um grau de superaquecimento na faixa de 10 a 15°C, o que significa vapor de escape a 140°C, mais ou menos. Se o vapor de escape tiver temperatura muito mais

elevada, além de não se produzir trabalho suficiente na turbina, dever-se-á usar energia na bomba de água do superaquecedor. Assim, para subir a temperatura do vapor, é preciso conversar antes com os fabricantes das turbinas, para se ter certeza de que o mercado está pronto para fornecer turbinas de reação suficientemente eficientes. Por exemplo, para vapor a 100 bar e 535°C, em uma turbina com 84% de eficiência, o vapor de escape teria uma temperatura de cerca de 140°C. A questão fundamental é: Os fabricantes garantem? Em caso de resposta afirmativa, quanto custaria o equipamento?

Em outras palavras, a análise dos diagramas mencionados mostra que para cada pressão de vapor e para uma dada temperatura do vapor de escape, existe uma combinação ideal de grau de superaquecimento do vapor vivo para uma dada eficiência de turbina. Temperaturas abaixo da ideal vão exigir turbinas menos eficientes, ou o risco de haver condensação de vapor e conseqüente erosão das palhetas na saída. Temperaturas acima do ideal vão exigir turbinas mais eficientes (se existirem), ou o risco de se ter vapor de escape com alto grau de superaquecimento. Admitindo que o mercado disponha de turbinas eficientes e econômicas, restam as dúvidas relativas aos materiais da tubulação e ao tratamento de água. As



ACERVO UNICA

Vista de canalial; Sertãozinho, SP; novembro 2001

TABELA 1 | GANHOS EM GERAÇÃO DE ENERGIA COM O AUMENTO DA PRESSÃO

ALTERNATIVA DO SISTEMA (BAR/°C)	66/480	68/520	92/520	100/540	120/540
Potencial de geração (MW)	48,7	51,9	54,5	56,7	58,1
Caldeira (t/h)	1 x 300				
Turborredutor (MW)	2 x 24,5	2 x 26,0	2 x 27,5	2 x 28,5	2 x 29,0
Gerador (MVA)	2 x 30,5	2 x 32,5	2 x 34,0	2 x 35,5	2 x 36,5
Combustível (kg vapor/kg bagaço)	2,23	2,16	2,18	2,15	2,17
Incremento na geração (parcial)	-	7%	5%	4%	2%
Incremento na geração (total)	-	7%	12%	16%	19%
Caldeira (R\$ x 10 <sup>6</sup> )	39	41	45	46	48
Turbogeradores (R\$ x 10 <sup>6</sup> )	12	13	14	15	16
Total (R\$ x 10 <sup>6</sup> )	51	54	59	61	63
Incremento no investimento (parcial)	-	7%	9%	4%	4%
Incremento no investimento (total)	-	7%	16%	20%	25%

Fonte: Elaborada pelo autor.

válvulas para pressões na faixa de 68 bar (para garantir 65 bar no bocal da turbina) podem ser da classe 900, desde que a temperatura não ultrapasse 480°C e os materiais de construção sejam os adequados. Já a tubulação deve usar material ASTM A-335 grau P-II. Entretanto, com os preços de energia praticados no Brasil, já está comprovado que é vantajoso chegar a 520°C na pressão de 68 bar. Nesse caso, as válvulas já devem ser da classe I200 ou I500 e a tubulação deve ser de material ASTM A-335, grau P-22.

O material P-22 pode ser utilizado até 550°C. Se se subir a pressão até 100 bar e 540°C, ainda se pode usar esse material, com espessuras de parede (*schedule*) disponíveis no mercado. Mas seriam espessuras muito elevadas, com tubulações muito pesadas e, portanto, muito caras. Para essa última pressão, deve-se usar o mesmo material ASTM A-335, mas com grau P-91. A verificação do diagrama de Mollier comprova que, para uma temperatura de 540°C, a entalpia do vapor, a 120 bar, é menor do que a entalpia do vapor a 100 bar. Ou seja, mais vapor é gerado a 120 bar, com certa quantidade de bagaço, do que a 100 bar. Mas, para pressões acima de 100 bar, mesmo o material grau P-91 exige espessuras muito elevadas. Será

preciso estudar com mais detalhes, do ponto de vista econômico, os prós e os contras dessa solução.

### QUALIDADE DA ÁGUA

Com relação à qualidade da água de alimentação da caldeira, há poucas diferenças nas recomendações das normas para caldeiras, até 70 bar e até 100 bar. O teor de ferro total passa de 0,02 ppm para 0,01 ppm e a dureza total (expressa em CaCO<sub>3</sub>) passa de 0,05 ppm para n.d. (não detectável). Os demais parâmetros são os mesmos para os dois níveis de pressão. Já a água da caldeira apresenta exigências distintas, principalmente o teor de sílica, que passa de 8 ppm para 2 ppm. Na prática, vai significar uma purga maior e, por consequência, maior reposição de água tratada. Portanto, é importante ter em mente que quanto maior for a pressão do vapor, maiores devem ser os cuidados para a recuperação dos condensados.

Felizmente, na usina de açúcar é possível recuperar 95% ou mais dos condensados, desde que sejam adotadas práticas adequadas e materiais mais nobres. Tubos de aço inoxidável nos pré-evaporadores, por exemplo; sistemas de polimento de condensado, para o início da safra, e assim por diante. Para

exemplificar os ganhos em geração de energia com o aumento da pressão, apresentamos na Tabela I dados comparativos. Nesse estudo, foram consideradas apenas turbinas de contrapressão alimentadas por uma caldeira de 300 t/h de capacidade, e os investimentos se referem exclusivamente aos equipamentos principais (caldeira e turbogeradores).

Analisando os valores da Tabela I, vê-se que chegar a 120 bar pode não ser interessante no momento (talvez no futuro, dependendo do preço da energia), mas vapor a 100 bar e 540°C pode ser muito rentável, principalmente porque a diferença de investimento fica diluída, quando se trata de uma planta nova. Por outro lado, embora a termodinâmica não mude, as condições do mercado se alteram permanentemente. É preciso considerar sempre aspectos como o preço final na negociação e o prazo de entrega estipulado. São fatores importantes que podem alterar a decisão técnica. Se a decisão for por chegar à pressão de 100 bar ou mais, é indispensável contar com profissionais qualificados e experientes para a soldagem dos materiais de alta liga, como o P-91 ou T-91. 

\* Celso Procknor é diretor da Procknor Engenharia (celso.procknor@procknor.com.br).