

# **COBEN 08/93**

## **TEMA: TRATAMENTO DA COGERAÇÃO NOS BALANÇOS ENERGÉTICOS**

**AUTOR: JOÃO ANTONIO MOREIRA PATUSCO**

A presente nota técnica tem por objetivo proporcionar aos técnicos responsáveis pela elaboração de Balanços Energéticos critérios para calcular as quantidades de combustíveis correspondentes à eletricidade gerada nos processos de cogeração.

Por cogeração entende-se o aproveitamento combinado de vapor para geração de eletricidade, para força motriz e para aquecimento, ou seja, o vapor superaquecido em caldeiras passa por uma turbina acoplada a um gerador, gerando energia elétrica, e em seguida, o vapor resultante (vapor saturado) segue no processo industrial atendendo a outros usos motrizes e de calor, como por exemplo, em atividades de secagem, centrifugação, moagem, destilação, higienização, etc.

A cogeração se dá principalmente em Autoprodutores industriais, já que estes, em geral, necessitam de eletricidade, força motriz e calor, entretanto, existem alguns países (com alto índice de geração termoelétrica) onde a cogeração é Pública, sendo o vapor saturado canalizado para uso nas cidades (comumente chamado de calor distrital).

Nos Balanços Energéticos o Autoprodutor é considerado como um Centro de Transformação, onde algumas formas de energia (hidro, carvão mineral, óleo combustível, diesel, bagaço, etc) em diferentes processos (usinas hidráulicas, térmicas a vapor, turbodiesel, turbogás, etc) dão origem a eletricidade.

Na geração térmica convencional o vapor após a turbina (vapor de escape) não é aproveitado, passa por condensadores e a água retorna à caldeira. Neste caso o rendimento do processo é dado pela relação entre as calorias de eletricidade gerada e as do combustível consumido na caldeira. Comumente este rendimento é baixo, não ultrapassando 30%.

Em geral, nos processos de geração mencionados, os dados de consumo de combustíveis e da respectiva eletricidade gerada são conhecidos, sendo possível construir os Balanços Elétricos, com as entradas, saídas e perdas de transformação.

No caso da Cogeração, apesar de ser um processo térmico a vapor, como o vapor após o turbogerador é aproveitado no processo industrial, há que se determinar a parcela de combustível queimado na caldeira que efetivamente gerou eletricidade. A outra parcela será alocada como consumo final da respectiva indústria. O cálculo equivocado destas parcelas pode comprometer, por exemplo, o consumo específico de energia de um determinado produto industrial, já que o consumo final pode estar subestimado ou sobrestimado.

Na maioria das vezes o Autoprodutor informa apenas o combustível queimado na caldeira e a eletricidade gerada, cabendo aos responsáveis por Balanços Energéticos a tarefa de calcular as parcelas para geração e consumo final. É comum se cometer o engano de alocar todo o combustível queimado nas caldeiras como gerando a eletricidade, o que ocasiona baixos rendimentos na autoprodução (não maiores que 10%) e subestimação do consumo final da indústria.

Outras vezes os dados disponíveis são as vendas de óleo combustível e de eletricidade a um determinado autoprodutor, bem como um percentual de geração própria.

Há casos que o Autoprodutor consome mais de um combustível na caldeira conhecendo-se as quantidades e a geração de eletricidade.

Enfim, na prática, apresentam-se diferentes situações quanto aos dados dos Autoprodutores e, desde que devidamente tratados, tornam os Balanços Energéticos mais representativos da realidade energética.

A partir de dados reais coletados em seis Indústrias Autoprodutoras de energia elétrica, bem como a partir de uma configuração típica do fluxo de vapor de usinas de açúcar, propõem-se a seguir uma metodologia para o tratamento do assunto.

A idéia básica da metodologia reside em se determinar o consumo adicional de combustível na caldeira, necessário para aumentar a pressão e superaquecer o vapor e, conseqüentemente, gerar eletricidade. Assim, o combustível resultante seria efetivamente aquele que a Indústria necessitaria para produzir vapor saturado, caso toda eletricidade fosse comprada da rede de distribuição.

Os dados obtidos das Indústrias foram:

p1 - pressão do vapor (superaquecido) antes da turbina

t1 - temperatura do vapor antes da turbina

p2 - pressão do vapor (saturado) após a turbina

t2 - temperatura do vapor após a turbina

C - consumo de combustível na caldeira

E - eletricidade produzida no gerador

y - percentual de vapor que passa pelo turbogerador

Dado estimado pelo autor:

n - rendimento das caldeiras

Entrando com os dados de pressão e temperatura no diagrama de vapor "is" anexo é possível determinar as entalpias "i1" e "i2" do vapor, em kcal/kg, para cada uma das Indústrias, respectivamente, antes e depois da turbina.

A diferença das entalpias é que proporciona a geração de eletricidade. Assim esta diferença dividida pela entalpia antes da turbina dá um percentual que multiplicado por "y" (percentual de vapor que passa pelo turbogerador) e multiplicado por "C" (combustível total) permite chegar à parcela de combustível que efetivamente foi acrescida na caldeira para gerar eletricidade.

(b)  $i_1 - i_2$  → diferença de entalpias do vapor

(c)  $(i_1 - i_2)/i_1$  → % de calorias de vapor para gerar eletricidade

(d)  $C * c * y$  → total de combustível acrescido na caldeira para gerar eletricidade

Dividindo-se a eletricidade gerada "E" pelo combustível acrescido na caldeira obtém-se o rendimento de cogeração. É importante mencionar que segundo este critério o rendimento incorpora proporcionalmente as perdas na caldeira.

$E / (d) \rightarrow$  rendimento na cogeração

Para se calcular apenas o rendimento do turbogerador (sem incluir as perdas na caldeira) procede-se da seguinte forma:

- Calcula-se o vapor em t produzido na caldeira multiplicando o combustível total "C" pelo rendimento da caldeira "n" e dividindo o resultado pela entalpia do vapor antes da caldeira "i1".

(a)  $(C * n)/i_1$  → vapor produzido pela caldeira em t

- Multiplicando-se o total de vapor pelo percentual de vapor que passa pela turbina "y" e pela diferença de entalpias chega-se ao total de calorias utilizadas na geração de eletricidade.

(a) \* y \*(b) → total de calorias de vapor para geração

- Dividindo-se a eletricidade “E” pelo valor utilizado para geração determina-se o rendimento do turbogerador (sem incorporar as perdas na caldeira). Obviamente este rendimento vai ser maior na proporção direta do rendimento estimado para a caldeira.

O quadro anexo apresenta os resultados da metodologia para as sete Indústrias, sendo de destacar:

- a) Calculando-se a média ponderada dos rendimentos para as sete Indústrias, coluna “MÉDIAS(1)”, chega-se a um rendimento médio de 46,3% para cogeração e de 61,7% para o turbogerador .
- b) Eliminando-se da média ponderada as Indústrias 2 e 6, por apresentarem pouca geração de eletricidade e portanto, com maior probabilidade de erros de medição, chega-se a um rendimento médio de 50,0% para cogeração e de 61,6% para o turbogerador.
- c) A equação (e) do quadro determina a parcela de combustível que efetivamente vai para consumo final nos Balanços Energéticos e a equação (d) determina a parcela de combustível que vai para o Centro de Transformação “Autoprodutores”.

## Conclusão

Na falta de dados dos Autoprodutores, pelos exemplos apresentados, recomenda-se adotar 50% como rendimento médio na Cogeração (rendimento que incorpora proporcionalmente as perdas na caldeira).

## Exemplos Práticos

1. Um Autoprodutor consumiu 150.000 t de bagaço de cana nas caldeiras e gerou 20.000 MWh de eletricidade. Calcular a parcela de combustível para cogeração e consumo final.

PC do bagaço de cana = 1.900kcal/kg = 1,9 Gcal/t

PC da eletricidade = 860kcal/kg = 0,86 Gcal/MWh

$0,86 * 20.000 = 17.200$  Gcal → eletricidade em Gcal

adotando-se 50% de rendimento na cogeração temos:

$17.200 / 0,50 = 34.400$  Gcal de bagaço

dividindo-se Gcal de bagaço pelo seu poder calorífico:

$34.400 / 1,9 = 18.105$  t de bagaço para geração, e:

$150.000 - 18.105 = 131.895$  t de bagaço para consumo final

2. Um Autoprodutor consumiu em caldeiras 40.000 t de óleo combustível, 20 milhões m<sup>3</sup> de gás natural e 30.000 t de carvão mineral e gerou 15.000 MWh de eletricidade. Todas as caldeiras geraram vapor superaquecido que passou por turbogerador. Calcular as parcelas de combustíveis para autogeração e para o consumo final.

PC do óleo combustível = 10.100 kcal/kg = 10,1 Gcal/t

PC do gás natural = 9.000 kcal/kg = 9.000 Gcal/milhão m<sup>3</sup>

PC do carvão mineral = 7.000 kcal/kg = 7 Gcal/t

PC da eletricidade = 860 kcal/kg = 0,86 Gcal/MWh

$0,86 * 15.000 = 12.900$  Gcal de eletricidade

adotando-se 50% de rendimento na cogeração tem-se:

$$12.900 / 0,50 = 25.800 \text{ Gcal de combustíveis}$$

a geração de eletricidade é dividida proporcionalmente entre os três combustíveis, assim:

	%
$40.000 * 10,1 = 404.000$ Gcal de óleo combustível	0,51
$20 * 9.000 = 180.000$ Gcal de gás natural	0,23
$30.000 * 7 = 210.000$ Gcal de carvão mineral	0,26
total = 794.000 Gcal	1,00

assim, tem-se como combustíveis para geração:

$$0,51 * 25.800 = 13.158 \text{ Gcal} \quad (/10,1) = 1.303 \text{ t de óleo combustível}$$

$$0,23 * 25.800 = 5.934 \text{ Gcal} \quad (/9000) = 0,66 \text{ milhões m}^3 \text{ de gás natural}$$

$$0,26 * 25.800 = 6.708 \text{ Gcal} \quad (/7) = 958 \text{ t de carvão mineral}$$

e como combustíveis para consumo final:

$$40.000 - 1.303 = 38.697 \text{ t de óleo combustível}$$

$$20 - 0,66 = 19,34 \text{ milhões m}^3 \text{ de gás natural}$$

$$30.000 - 958 = 29.042 \text{ t de carvão mineral}$$

**RENDIMENTO EM COGERAÇÃO**

Casos	Unidade	1	2	3	4	5	6	7	Média (1)	Média (2)	
<b>DADOS</b>											
p1	kgf/cm <sup>2</sup>	42	25	90	42	75	38	21			
t1	C	395	330	510	410	495	380	538			
p2	kgf/cm <sup>2</sup>	2	7	5	13	5	5	2.5			
t2	C	120	165	150	190	150	150	127			
E	kWh	27097	4973	12755	24200	13826	3060	8140			
C	kg	24898	16927	16960	28116	11583	6920	20723			
PC da eletricidade	kcal/kWh	860	860	860	860	860	860	860			
PC do combustível	kcal/kg	10100	10100	10100	10100	10100	10100	1900			
E	Mcal	23303	4277	10969	20812	11890	2632	7000	80883	73974	
C	Mcal	251469	170960	171296	283969	116986	69890	209300			
i1	kcal/kg	765	735	820	775	814	757	848			
i2	kcal/kg	650	660	657	666	657	657	642			
n	%	75	75	75	75	75	75	75			
y	%	100	100	100	100	100	100	27			
<b>CÁLCULOS</b>											
(C * n)/i1	(a)	kg	246538	174449	156673	274809	107788	69244	185112		
I1 - i2	(b)	kcal/kg	115	75	163	109	157	100	206		
(i1 - i2)/i1	(c)	%	15,0	10,2	19,9	14,1	19,3	13,2	24,3		
C * c * y	(d)	Mcal	37803	17445	34050	39939	22564	9232	13728	174761	148083
C - d	(e)	Mcal	213666	153515	137246	244030	94422	60658	195572		
	(d)	kg	3743	1727	3371	3954	2234	914	7225		
	(e)	kg	21155	15200	13589	24161	9349	6006	102933		
(E/(d))*100	(f)	%	61,6	24,5	32,2	52,1	52,7	28,5	51,0	46,3	50,0
(E/(a*b*y))*100	(g)	%	82,2	32,7	43,0	69,5	70,3	38,0	68,0	61,7	66,6
(a) * (b)	(h)	Mcal	28352	13084	25538	29954	16923	6924	10296	131070	111062

p1 e t1	pressão e temperatura do vapor (superaquecido) antes da turbina	(a) total de vapor (superaquecido) produzido
p2 e t2	pressão e temperatura do vapor (saturado) após a turbina	(b) diferença entre as entalpias do vapor
E	energia elétrica gerada	(c) percentual de vapor que efetivamente gerou eletricidade
C	consumo de combustível na caldeira	(d) total de combustível que gerou eletricidade
PC	poder calorífico da eletricidade e do combustível	(e) total de combustível que vai para consumo final
i1 e i2	entalpias do vapor antes e depois da turbina	(f) rendimento na cogeração (inclui perdas das caldeiras)
n	rendimento da caldeira	(g) rendimento no turbogerador (não inclui perdas das caldeiras)
y	percentual de vapor superaquecido que passa pela turbina	(h) total para cálculo das médias ponderadas

## FLUXOGRAMA DE VAPOR EM USINAS DE AÇÚCAR

