

Análise de autosuficiência e excedentes em indústria de papel e celulose empregando turbina de condensação e extração

MFN -0363

N CHAMADA:

TITULO: Análise de autosuficiência e excedentes em indústria de papel e celulose empregando turbina de condensação e extração

AUTOR(ES): SILVEIRA, J.L.BALESTIERI, J.A.P.

EDICAO:

IDIOMA: português

ASSUNTO: 10. utilidades

TIPO: Congresso

EVENTO: Congresso Anual de Celulose e Papel, 23

PROMOTOR: ABTCP

CIDADE: São Paulo

DATA: 05-09.11.1990

IMPRESSA: Sao Paulo, 1990, ABTCP

PAG/VOLUME: p.765-775,

FONTE: Congresso Anual de Celulose e Papel, 23, 1990, São Paulo, p.765-775

AUTOR ENTIDADE:

DESCRIPTOR: geração de energia, cogeração de energia, turbina de condensação, turbina de extração, vapor, pressão de vapor, análise energética

RESUMO: As centrais de geração industriais do setor papel e celulose apresentam, tipicamente, turbinas a vapor de contrapressão. Como existe a necessidade, em algumas indústrias, de níveis estratificados de pressão do vapor de processo, propõe-se neste trabalho um sistema que utiliza turbina a vapor de condensação com duas extrações, onde é avaliada as potencialidades de autosuficiência e de geração de excedentes energéticos para a prática da cogeração, baseando-se na parametrização de dados para uma indústria considerada típica do setor

ANÁLISE DE AUTOSUFICIÊNCIA E EXCEDENTES EM
INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE EMPREGANDO TURBINA DE CONDENSAÇÃO E EXTRAÇÃO

José Luz Silveira e José Antonio Perrella Balestieri
Dept^o de Energia, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetã - UNESP



SUMÁRIO

As centrais de geração industriais do setor papel e celulose apresentam, tipicamente, turbinas a vapor de contrapressão. Como existe a necessidade, em algumas indústrias, de níveis estratificados de pressão do vapor de processo, propõe-se neste trabalho um sistema que utiliza turbina a vapor de condensação com duas extrações, onde é avaliada as potencialidades de autosuficiência e de geração de excedentes energéticos para a prática da cogeração, baseando-se na parametrização de dados para uma indústria considerada típica do setor.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade crescente de economizar energia trouxe entre outras conseqüências a mudança na forma de conceber os processos industriais e gerar energia. Assim como forma racional de utilização de energia foram estimulados os sistemas de cogeração, que visam a produção seqüencial de trabalho e calor útil a partir de um único combustível, nas mais diversas aplicações.

No contexto industrial os fatores principais que influenciam a decisão de se instalar um sistema de cogeração são:

- utilização de combustíveis originados no próprio processo;
- necessidade de um fornecimento confiável de energia elétrica ou mecânica.

Esses fatores estão presentes na indústria de papel e celulose, inclusive o último deles adquirindo um caráter agudo nos próximos anos. Neste setor, em muitas plantas tem-se utilizado da cogeração como uma forma confiável de suprimento para prover potência elétrica e utilizar resíduos industriais para a sua demanda própria, mas não se tem vendido quantidades significativas de energia para as concessionárias, não existindo experiências de operação interligada. O problema maior que tem existido na transação de excedentes de cogeração tem sido a questão institucional e tarifária. Mas não há dúvidas que é a interligação que permite maximizar os benefícios da cogeração.

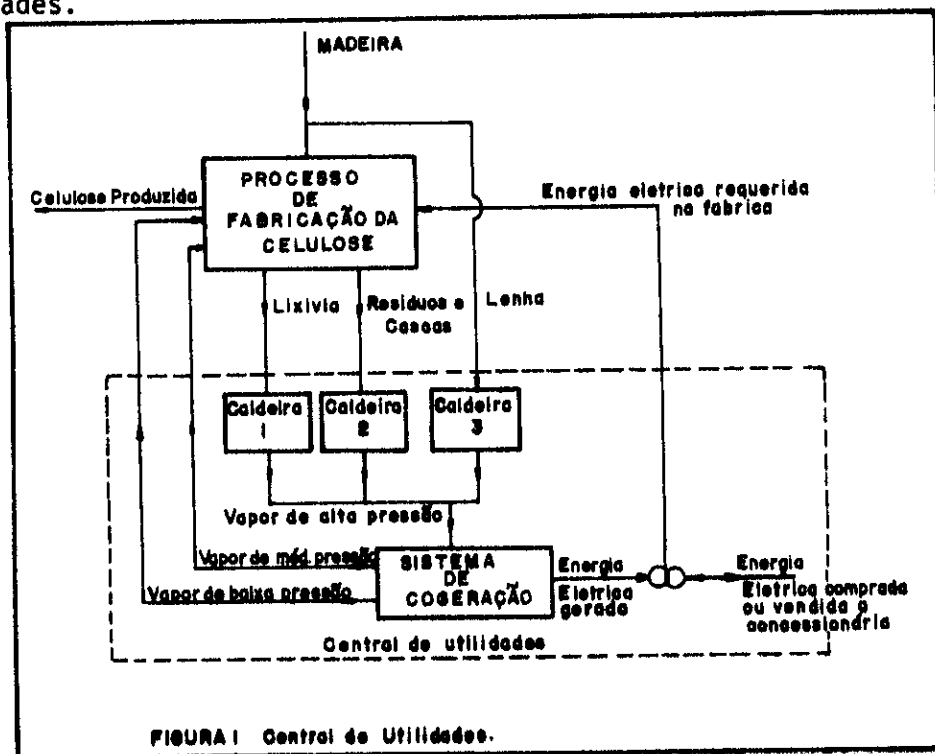
Neste trabalho se apresenta um método de análise termodinâmica, baseado-se na parametrização de dados reais de uma indústria Brasileira, em função do volume de produção, de um sistema de cogeração, visando a geração de energia elétrica e energia térmica para processo em dois níveis de pressão.

O sistema de cogeração aqui discutido utiliza turbina a vapor de condensação com duas extrações onde é avaliada a perspectiva de auto-abastecimento e de excedentes de energia elétrica. Assim é analisado a possibilidade de fornecer todo o vapor e energia necessária pela queima de lixívia na caldeira de recuperação e usando refugo/casca de madeira como combustível numa caldeira para esse fim.

2. A CENTRAL DE UTILIDADES

A central de utilidades recebe da planta (fábrica de celulose) a lixívia e os resíduos e cascas de madeira que são queimados na caldeira de recuperação e na caldeira de resíduos/cascas respectivamente para gerar vapor de alta pressão que aciona o sistema de cogeração fornecendo vapor de média e baixa pressão para os processos, ainda gerando energia elétrica para a planta. Esse sistema de cogeração pode ser interligado a rede da concessionária e na eventual falta de energia elétrica esta pode ser comprada. No caso de haver um excedente de energia elétrica esta poderia ser vendida a concessionária.

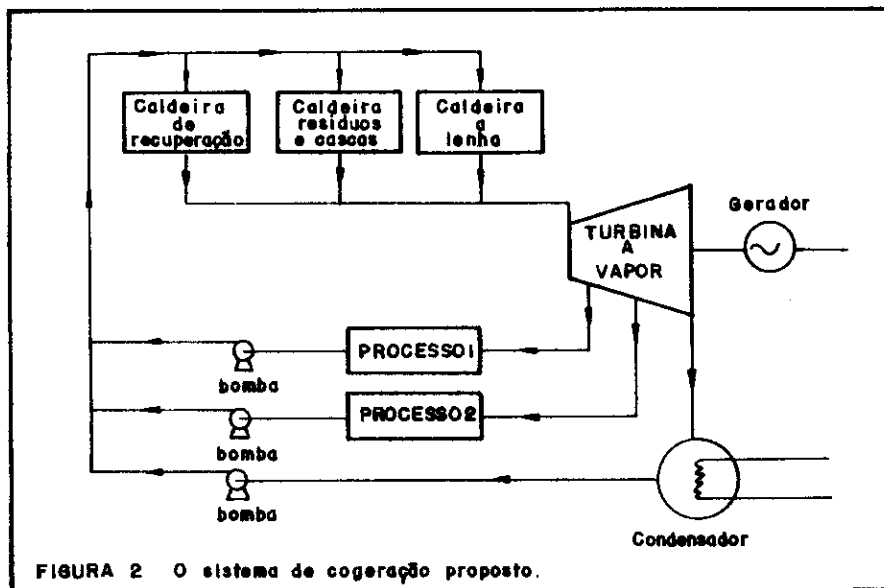
Nesta proposta uma terceira caldeira, a caldeira a lenha só é acionada na hipótese de falta de vapor para balancear a demanda dos processos, o que implica num consumo adicional de lenha. A escolha de lenha como combustível adicional é devido ao fato de que a queima direta da lenha aparece como mais econômica em termos de custos diretos, sobretudo neste setor que tradicionalmente produz lenha. A figura 1 mostra a descrição detalhada dessa central de utilidades.



3. O SISTEMA DE COGERAÇÃO

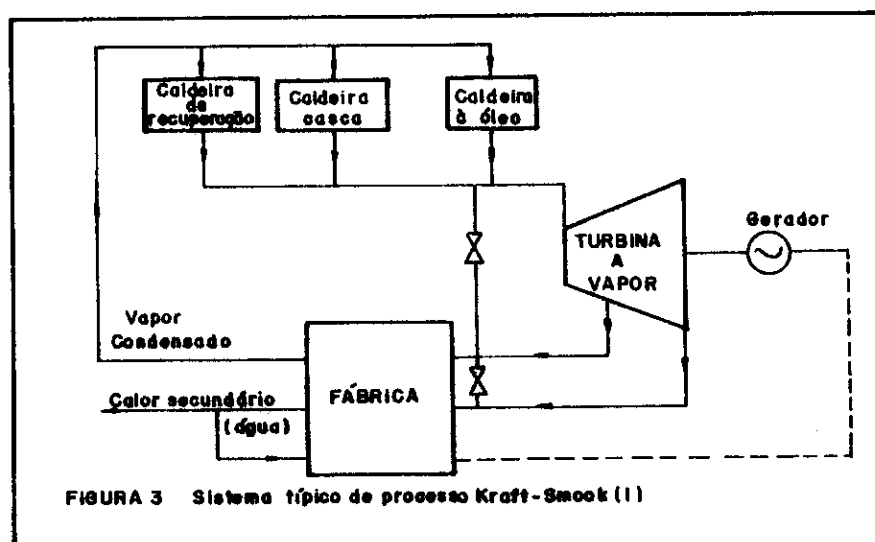
A figura 2 mostra o sistema de cogeração típico considerando dois níveis de pressão de extração. O vapor para o processo em pressão intermediária, em geral 13 kgf/cm², atende aos setores de secagem e outros, enquanto

que o vapor de baixa pressão, geralmente 3 kgf/cm^2 supre os setores de evaporação, branqueamento entre outros. Um mesmo setor pode consumir vapor nos dois níveis de pressão, o que ocorre com a planta química, digestor entre outros.



Este tipo de sistema de cogeração permite grande flexibilidade à instalação, possibilitando atender uma ampla faixa de demandas térmicas e elétricas, dentro de sua zona de operação. Isto se deve ao condensador associado e pela atuação de um sistema de controle automático, que varia adequadamente as vazões de vapor para as extrações e vapor para o condensador.

Outros sistemas de cogeração empregando turbina a vapor tem sido utilizados nas indústrias deste setor, entre esses citaremos alguns bem similares ao anterior. Conforme SMOOK [1], um sistema de cogeração típico para o processo Kraft é o mostrado na figura 3. Já segundo Hu [2] um sistema de cogeração bastante difundido nas indústrias de papel e celulose do nordeste dos E.U.A. é o mostrado na figura 4.



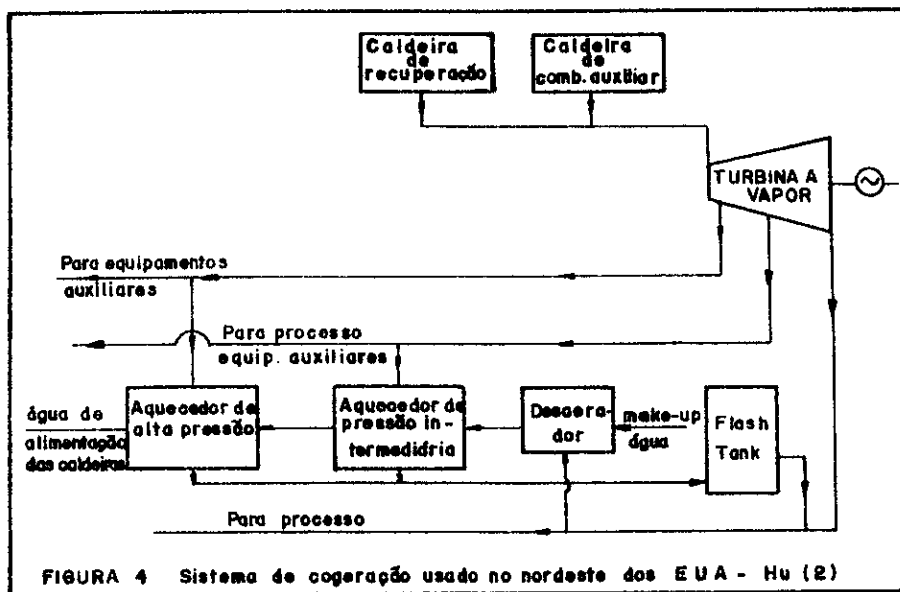


FIGURA 4 Sistema de cogeração usado no nordeste dos EUA - Hu (2)

Estes tipos de sistemas de cogeração mostrados nas figuras 3 e 4 não apresentam o condensador associado e portanto podem operar de forma balanceada somente se a necessidade de vapor nos processos condizer com a necessidade de energia elétrica, já que, a produção de energia elétrica depende só da demanda de vapor aos processos implicando numa pré-fixação da produção de vapor no setor de caldeiras. É interessante ainda comentar o caráter regenerativo do ciclo mostrado na figura 4, que permite maiores eficiências térmicas ao sistema.

4. O PROGRAMA DE ANÁLISE ENERGÉTICA

Baseando-se em dados reais de uma indústria típica, a CENIBRA [3], que produz cerca de 1000 toneladas diárias de celulose, e, cujo consumo médio foi de 855,91 Kwh/TSA (tonelada de celulose seca ao ar) em 1988, bem representativo da média nacional, cerca de 869 Kwh/TSA em 1987 conforme o BEN [4], foi feito em linguagem FORTRAN 77 um programa denominado CELULOSE.FOR. Este programa analisa as condições de auto-suficiência e de geração de excedentes energéticos utilizando o sistema de cogeração considerado.

Em uma primeira etapa este programa calcula a energia elétrica requerida para uma produção diária de determinada quantidade de pasta celulósica e assume esta energia como sendo igual a produzida no sistema de cogeração, impondo assim a condição de auto-suficiência à planta de referência. Posteriormente este programa determina, dependendo das condições de operação, a possibilidade de ocorrer condensação de vapor (no condensador) ou expansão por uma válvula redutora de pressão para suprir a demanda de vapor nos processos. Estas alternativas decorrem da magnitude das demandas térmicas e de potência elétrica, avaliadas como fluxo de vapor.

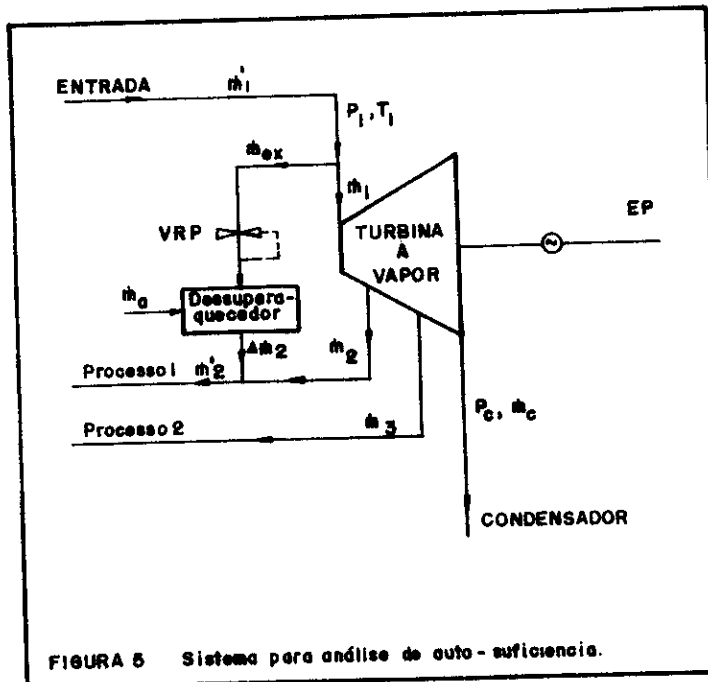
Numa segunda etapa este programa determina as vazões de vapor produzidas pela queima de subprodutos de lixívia e de resíduos/cascas e compara esta disponibilidade com o consumo necessário aos processos. Caso haja necessidade adicional de vapor, o programa determina a quantidade necessária de lenha que deverá ser queimada na caldeira de biomassa para balancear a demanda de vapor. Caso não haja necessidade de vapor adicional, o balanço de vapor fica estabelecido, não havendo portanto necessidade de consumo de lenha.

Depois de estabelecido um ou outro caso, ou seja se há ou não necessidade de consumo adicional de lenha, este programa determina a energia elétrica disponível produzida pelo sistema de cogeração e a compara com a energia elétrica requerida pela fábrica de celulose, analisando assim os excedentes ou não de eletricidade.

5. ANÁLISE DE AUTO-SUFICIÊNCIA EM ENERGIA ELÉTRICA

Para efetuar tal análise não se preocupou de imediato com os combustíveis usados no setor de caldeiras. O interesse maior foi a vazão de vapor produzida neste setor, visando suprir a demanda de processo e com auto-suficiência em energia elétrica.

Ao se impor a condição de que o requerimento de energia elétrica fosse igual a energia elétrica produzida pelo sistema de cogeração, notou-se que pode ocorrer um déficit de vapor para suprir a necessidade dos processos em determinadas condições operacionais. Ou seja, sob determinadas condições a demanda de energia elétrica se associa à uma demanda de vapor na turbina que é inferior a demanda de processo. Nesta hipótese, considerou-se a instalação de uma válvula redutora de pressão (by-pass) ligando a linha de vapor vivo a linha de vapor para o processo a média pressão. A figura 5 mostra o sistema proposto para a análise de auto-suficiência em energia elétrica.



onde:

- \dot{m}_1' - vazão efetiva de vapor na saída do setor de caldeiras
- \dot{m}_1 - vazão de vapor na entrada da turbina
- \dot{m}_1^{ex} - vazão de vapor expandido no by-pass
- \dot{m}_2^{ex} - vazão de vapor a 13 kgf/cm² na 1ª extração da turbina
- \dot{m}_2 - vazão de vapor a 13 kgf/cm² consumida no processo 1
- \dot{m}_3 - vazão de vapor a 03 kgf/cm² consumida no processo 2 (2ª ext. da turbina)
- \dot{m}_3^a - vazão de água necessária no dessuperaquecedor
- \dot{m}_c^a - vazão de vapor no condensador
- E_p^c - energia elétrica produzida/requerida

Poderia ser considerada outra alternativa no posicionamento da válvula redutora de pressão, entre as linhas de vapor à média e baixa pressão. Contudo não se estaria, nesta hipótese, expandindo a maior vazão possível de vapor, o que desejavelmente acontece quando se fixa a vazão de vapor de baixa pressão. Neste sistema temos duas situações a serem analisadas, que dependem das condições do vapor na saída do setor de caldeiras:

- 1ª) a situação em que o by-pass funciona fechado, implicando geralmente num consumo de vapor pelo condensador;
- 2ª) a situação em que o by-pass funciona aberto, implicando que não existe consumo de vapor no condensador.

Como o vapor expandido na válvula redutora de pressão deve manter a entalpia do vapor na entrada da turbina, considerou-se seu dessuperaquecimento com água da alimentação da caldeira, reduzindo assim a massa a ser expandida, especificamente na segunda situação.

Procedendo desta maneira na realidade se otimiza a vazão de vapor a ser produzida no setor de caldeiras, para que a planta de referência possa ser suprida em suas demandas de vapor e de energia elétrica.

5.1. Equacionamento para a análise de autosuficiência

1ª Situação: $\dot{m}_1 > \dot{m}_2 + \dot{m}_3$ (1)

Neste caso existe um consumo de vapor no condensador, não havendo portanto necessidade de expansão de vapor pelo by-pass para suprir a demanda ao processo 1.

Logo, temos:

$$\dot{m}_{ex} = 0; \quad \dot{m}_2 = \dot{m}'_2; \quad \dot{m}_1 = \dot{m}'_1; \quad \dot{m}_c \neq 0 \quad (2)$$

A vazão efetiva de vapor produzida no setor de caldeiras pode ser determinada pela seguinte equação:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}'_1 = \frac{E_p + \dot{m}_2(h_{2r} - h_{cr}) + \dot{m}_3(h_{3r} - h_{cr})}{h_1 - h_{cr}} \quad (3)$$

Então a vazão de vapor no condensador será:

$$\dot{m}_c = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 - \dot{m}_3 \quad (4)$$

2ª Situação: $\dot{m}_1 < \dot{m}_2 + \dot{m}_3$ (5)

Neste caso não existe um consumo de vapor no condensador, havendo portanto necessidade de expansão de vapor pelo by-pass para suprir a demanda ao processo 1.

Logo, temos:

$$\dot{m}_{ex} \neq 0; \quad \dot{m}_2 < \dot{m}'_2; \quad \dot{m}_1 < \dot{m}'_1; \quad \dot{m}_c = 0 \quad (6)$$

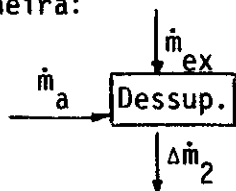
A vazão de vapor na 1ª extração da turbina não é suficiente para suprir a demanda do processo 1 e pode ser calculada através da seguinte equação:

$$\dot{m}_2 = \frac{E_p - \dot{m}_3(h_1 - h_{3r})}{h_1 - h_{2r}} \quad (7)$$

O déficit de vapor necessário para suprir o processo 1 é:

$$\Delta \dot{m}_2 = \dot{m}'_2 - \dot{m}_2 \quad (8)$$

O ganho real de vapor do dessuperaquecimento é analisado da seguinte maneira:



$$\Delta \dot{m}_2 = \dot{m}_a + \dot{m}_{ex} \quad (9)$$

$$\Delta \dot{m}_2 \cdot h_{2r} = \dot{m}_a h_{aec} + \dot{m}_{ex} \cdot h_1 \quad (10)$$

Assim a vazão de vapor expandida pelo by-pass é:

$$\dot{m}_{ex} = \frac{\Delta \dot{m}_2 \cdot (h_{2r} - h_{aec})}{h_1 - h_{aec}} \quad (11)$$

A vazão efetiva de vapor produzida no setor de caldeira pode ser determinada pela equação:

$$\dot{m}'_1 = \dot{m}_{ex} + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (12)$$

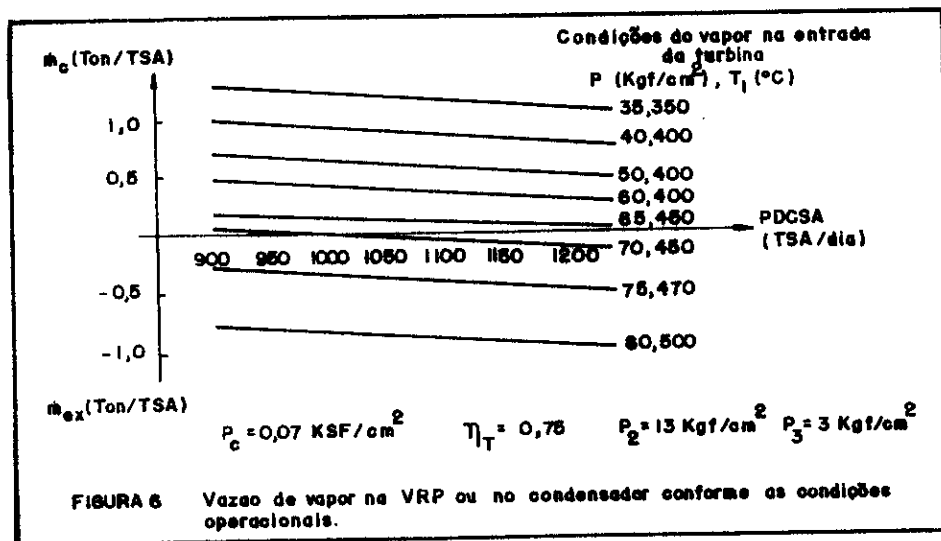
5.2. Resultados da análise de auto-suficiência

A tabela 1 a seguir mostra, dependendo da produção diária de celulose seca ao ar as demandas de vapor, energia elétrica e calor para manter a planta na condição de auto-suficiência. Observou-se que essas demandas independem da pressão e temperatura de operação do setor de caldeiras.

TABELA 1 - DEMANDAS PARA A AUTOSUFICIÊNCIA

Produção diária de celulose	Produção de vapor necessária	Demanda de vapor no Processo 1	Demanda de vapor no Processo 2	Demanda de energia elétrica	Demanda de calor nos Processos
[TSA/dia]	[Ton/TSA]	[Ton/TSA]	[Ton/TSA]	[Mwh/TSA]	[Mwh/TSA]
900	7,00	3,66	3,34	0,91	4,45
950	6,86	3,56	3,31	0,89	4,34
1000	6,72	3,45	3,27	0,87	4,27
1050	6,58	3,34	3,24	0,85	4,18
1100	6,44	3,24	3,21	0,83	4,09
1150	6,30	3,12	3,17	0,81	4,00
1200	6,16	3,02	3,14	0,78	3,92

Já a vazão de vapor pela válvula redutora de pressão ou a vazão de vapor no condensador dependem das condições de pressão e temperatura do vapor na saída do setor de caldeiras. A figura 6 a seguir ilustra esta dependência.



6. ANÁLISE DA GERAÇÃO DE EXCEDENTES DE ELETRICIDADE

Nesta análise preocupou-se de imediato com os combustíveis usados no setor de caldeiras, de maneira que a demanda de vapor para os processos fosse totalmente suprida sem a necessidade do uso de válvulas redutoras de pressão (by-pass).

6.1. Cálculo das disponibilidades de vapor

Através das disponibilidades de insumos energéticos é determinada a produção de vapor como se mostra a seguir:

1º) Caldeira de recuperação (queima de lixivia)

$$\dot{m}_{v1} = \frac{\dot{m}_{lix} \cdot P_{c\,lix} \cdot \eta_{c\,lix}}{h_1 - h_{aec}} \quad (13)$$

onde:

\dot{m}_{v1} - produção de vapor da caldeira de recuperação

\dot{m}_{lix} - produção de lixivia

$P_{c\,lix}$ - poder calorífico da lixivia

$\eta_{c\,lix}$ - eficiência da caldeira de recuperação

h_1 - entalpia do vapor vivo

h_{aec} - entalpia da água na entrada da caldeira

2º) Caldeira para queima de resíduos/cascas

$$\dot{m}_{v2} = \frac{(\dot{m}_{cas} \cdot P_{c\,cas} + \dot{m}_{res} \cdot P_{c\,res}) \eta_{c\,R/C}}{h_1 - h_{aec}} \quad (14)$$

onde:

\dot{m}_{v2} - produção de vapor na caldeira de resíduos/casca

$P_{c\,cas}$ - poder calorífico da casca

$P_{c\,res}$ - poder calorífico do resíduo

\dot{m}_{cas} - produção de casca

\dot{m}_{res} - produção de resíduos

$\eta_{c\,R/C}$ - eficiência da caldeira de resíduos/cascas

Portanto a produção de vapor usando os subprodutos disponíveis é:

$$\dot{m}_{vD} = \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{v2} \quad (15)$$

onde:

\dot{m}_{vD} - vazão de vapor disponível originada da queima de lixívia e resíduos / casca

6.2. Análise do balanço de vapor

Para saber se a disponibilidade total de vapor é suficiente para suprir a demanda pelos processos pode ser utilizada a seguinte equação:

$$\Delta \dot{m}_v = \dot{m}_{vR} - \dot{m}_{vD} \quad (16)$$

onde:

\dot{m}_{vR} = vazão de vapor requerida pelos processos

Desta equação podemos ter duas situações:

1ª Situação: $\Delta \dot{m}_v < 0$ (17)

Nesta situação o balanço de vapor está estabelecido e portanto não há necessidade de consumo adicional de lenha. A vazão de vapor produzida no setor de caldeiras é:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{vD} \quad (18)$$

2ª Situação: $\Delta \dot{m}_v > 0$ (19)

Neste caso o balanço de vapor não está estabelecido, havendo necessidade de consumo adicional de lenha.

A vazão de vapor adicional é

$$\dot{m}_{v3} = \Delta \dot{m}_v \quad (20)$$

Portanto a vazão de vapor produzida no setor de caldeiras, pode ser determinada pela equação:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{v1} + \dot{m}_{v2} + \dot{m}_{v3} \quad (21)$$

6.3. Análise energética

Estabelecido o balanço de vapor é feita a análise de excedentes de energia elétrica produzida no sistema de cogeração é:

$$E_p = \dot{m}_1(h_{1r} - h_{cr}) - \dot{m}_2(h_{2r} - h_{cr}) - \dot{m}_3(h_{3r} - h_{cr}) \quad (22)$$

Então podemos comparar a energia elétrica produzida no sistema de cogeração com a requerida pelo processo de fabricação de celulose, usando a seguinte relação:

$$\Delta EE = EP - EE \quad (23)$$

Se $\Delta EE > 0$ implica que existe um excedente de energia elétrica. Caso contrário, ou seja, se $\Delta EE < 0$, implica que existe um déficit de energia elétrica para suprir a demanda.

6.4. Resultados da análise de excedentes

A figura 7 mostra o comportamento do sistema de cogeração com relação a excedentes ou déficit de eletricidade em função das condições operacionais.

Já a tabela 2 mostra o comportamento detalhado do sistema para a condi

ção mais favorável em termos de excedentes, ou seja, quando o sistema opera a 80 kgf/cm² e 500°C.

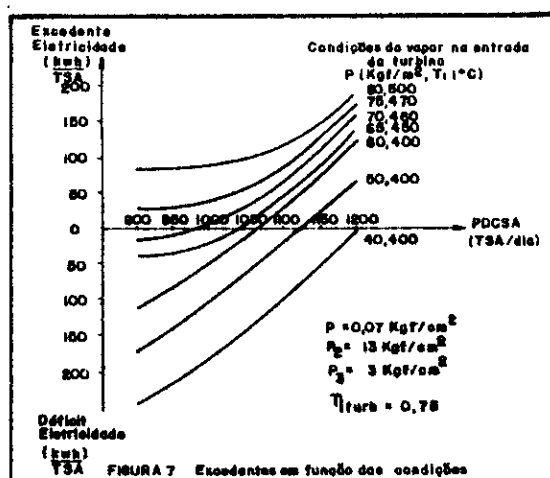
TABELA 2 - Comportamento do sistema para a condição mais favorável $P_1 = 80 \text{ kgf/cm}^2$ e $T_1 = 500^\circ\text{C}$

Produção de celulose (TSA/dia)		900	950	1000	1050	1100	1150	1200	
Geração de vapor em	Com lixívia	140,40	148,20	156,00	163,80	171,60	179,40	187,20	
	Com cascas/resíduos	101,77	107,42	113,07	118,73	124,38	130,03	135,69	
	Com lenha	20,47	16,07	11,07	5,50	-	-	-	
Ton/h	Total de vapor gerado	262,64	271,69	280,04	288,03	295,98	309,43	322,89	
Consumos de vapor (Ton/h)	Processos	262,64	271,69	280,04	288,03	295,32	302,04	308,16	
	Condensador	-	-	-	-	0,66	7,39	14,73	
Energia	Requerida	908,42	887,92	867,42	846,92	826,42	805,92	785,42	
Elétrica	Cogeração	993,35	975,58	957,80	940,02	926,42	949,33	972,26	
	Déficit	-	-	-	-	-	-	-	
Kwh	TSA	Excedente	84,93	87,66	90,38	93,10	100,00	143,41	186,84

7. CONCLUSÕES

Fica constatado da tabela 1 e figura 6 que a CENIBRA que produz cerca de 1000 toneladas diárias de celulose seca ao ar e opera com suas caldeiras em 65 kgf/cm² e 450°C, seria necessário uma produção em torno de 6,72 toneladas de vapor por TSA para a autosuficiência em energia elétrica, o que exige uma geração em torno de 280 Ton/h de vapor no setor de caldeiras, implicando num pequeno consumo adicional de lenha. O que pode também ser comprovado pela figura 7.

Considerando os volumes de produção atual no Brasil e os resultados da tabela 2 é possível inferir os potenciais excedentes de energia cogeração. Assim para uma produção anual de 3.793 mil toneladas de celulose realizada em 1988, segundo informação da Associação Nacional dos Fabricantes de Papel e Celulose, teríamos no cenário mais favorável, 708.684 Mwh excedentes, correspondendo a uma central de 162 Mw operando com um fator de carga de 50%.



De uma desejável racionalidade na condução do planejamento energético nacional, poderiam ser incentivadas através de adequadas medidas tarifárias e normalizadoras a transação de eletricidade entre os auto-produtores e as concessionárias do sistema interligado, o que fica evidenciado pela oportunidade a ser explorada com indiscutíveis vantagens para o país.

8. BIBLIOGRAFIA

- |1| SMOOK, G.A. - "Handbook for pulp and paper technologists" - Editor Technical - M.J.Kocutek. Canadian Cataloging in Publication - 1988.
- |2| HU, S.David - "Cogeneration" - Hu's Technology, Hayward, California Reston Publishing Company, Inc. A Prentice-Hall Company-Reston-Virgínia.
- |3| Relatório mensal de desempenho energético da CENIBRA - CICE - Comissão Interna de Conservação de Energia, dez/88.
- |4| MME - Ministério das Minas e Energia - Balanço Energético Nacional, Brasília, 1987.
- |5| SILVEIRA, José Luz - "Estudos de cogeração aplicados a fabricação de papel e celulose"- Dissertação de Mestrado. Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI - 1990.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CENIBRA pelo precioso apoio no fornecimento de informações e pelo estímulo em estudar a cogeração neste setor.