

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE CALDEIRAS A LENHA ATRAVÉS DA PRÉ-SE  
CAGEM DE CAVACOS UTILIZANDO GASES EFLUENTES DA COMBUSTÃO

Roberto de Aguiar Peixoto  
Lester Amaral Júnior

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo  
S.A. - IPT

SUMÁRIO

Este trabalho procura mostrar os benefícios obtidos com a pré-secagem de cavacos de madeira utilizando os gases efluentes da combustão através de um sistema integrado secador-caldeira.

Adotando-se algumas hipóteses foi desenvolvido um modelo matemático simplificado que simula a operação deste sistema integrado, permitindo a quantificação das economias de combustível obtidas.

Para a efetivação desta medida, que se coloca dentro de um panorama atual de preocupação com relação ao uso eficiente de fontes alternativas de energia, são apresentadas as diretrizes de continuidade deste trabalho.

---

Trabalho apresentado no 19º Congresso Anual de Celulose e Papel, Semana do Papel, da ABCP, realizado em São Paulo-SP- Brasil, de 24 a 28 de novembro de 1986.

### Nomenclatura e Valores dos Parâmetros Utilizados nas Equações do Item 3

- B : Perdas porcentuais (excluindo-se as perdas pelos gases) da caldeira operando com biomassa combustível na condição de umidade  $\psi_E$ .
- $B \cdot \frac{\epsilon \psi_S}{\epsilon \psi_E}$  : Perdas porcentuais da caldeira operando com biomassa combustível na condição de umidade  $\psi_S$ .
- CPC : Calor específico da madeira seca admitido como um valor constante igual a 1,38 KJ/kg<sup>0</sup>K.
- CPA : Calor específico da água líquida igual a 4,19 KJ/kg<sup>0</sup>K.
- CPV : Calor específico a pressão constante do vapor de água considerado como um valor constante igual a 1,88 KJ/kg<sup>0</sup>K.
- CPG : Calor específico a pressão constante dos gases secos considerado como um valor constante igual a 1,09 KJ/kg<sup>0</sup>K.
- e : Excesso de ar de combustão conforme definido no item 3.1.2.
- $E_C$  : Economia de biomassa combustível, obtida com a utilização de secador, nas condições de umidade  $\psi_S$  e temperatura de entrada na caldeira igual a de saída do secador.
- $E_0$  : Economia de biomassa combustível, obtida com a utilização do secador, nas condições de umidade  $\psi_S$  e temperatura de 293<sup>0</sup>K.
- h : Fração em massa de hidrogênio no combustível seco.
- $h\psi$  : Fração em massa de hidrogênio no combustível com umidade  $\psi$ .
- hGE : Entalpia específica dos gases úmidos na entrada do secador referida à unidade de massa de gás úmido (KJ/kg gases úmidos).
- hGS : Entalpia específica dos gases úmidos na saída do secador referida à unidade de massa de gás úmido (KJ/kg gases úmidos).

- $\dot{m}_{CE}$  : Vazão em massa de combustível úmido na entrada do secador (kg/hora).
- $\dot{m}_{CSE}$  : Vazão em massa de combustível seco na entrada do secador (kg/hora).
- $\dot{m}_{CS}$  : Vazão em massa de combustível úmido na saída do secador (kg/hora).
- $\dot{m}_{CSS}$  : Vazão em massa de combustível seco na saída do secador (kg/hora).
- $\dot{m}_{GE}$  : Vazão em massa de gases úmidos na entrada do secador (kg/hora).
- $\dot{m}_{GSE}$  : Vazão em massa de gases secos na entrada do secador (kg/hora).
- $\dot{m}_{GS}$  : Vazão em massa de gases úmidos na saída do secador (kg/hora).
- $\dot{m}_{GSS}$  : Vazão em massa de gases secos na saída do secador (kg/hora).
- $PCS_{\psi=0}$  : Poder calorífico superior do combustível seco (KJ/kg combustível).
- $PCS_{\psi}$  : Poder calorífico superior do combustível na condição de umidade  $\psi$  (KJ/kg combustível úmido).
- $PG_{\psi E}$  : Perdas por unidade de tempo pelo "calor sensível" dos gases de chaminé da caldeira na condição de operação com combustível com umidade  $\psi E$  (KJ/hora).
- $\overline{PG}_{\psi E}$  : Perdas pelos gases de chaminé da caldeira na condição de operação com combustível com umidade  $\psi E$  em termos de fração do poder calorífico inferior.
- $PG_{\psi S}$  : Idem  $PG_{\psi E}$  na condição de operação com combustível com umidade  $\psi S$  (KJ/hora).
- $\overline{PG}_{\psi S}$  : Idem  $\overline{PG}_{\psi E}$  na condição de operação com combustível com umidade  $\psi S$ .
- $PO_{\psi E}$  : Demais perdas "térmicas" da caldeira por unidade de tempo na condição de operação com combustível com umidade  $\psi E$  (KJ/hora).
- $\dot{Q}_A$  : Perdas de calor para o ambiente no secador por

unidade de tempo (KJ/hora).

- TCE : Temperatura do combustível na entrada do secador ( $^{\circ}\text{K}$ ).
- TCS : Temperatura do combustível na saída do secador ( $^{\circ}\text{K}$ ).
- TGE : Temperatura dos gases na entrada do secador ( $^{\circ}\text{K}$ ).
- TGS : Temperatura dos gases na saída do secador ( $^{\circ}\text{K}$ ).
- TR : Temperatura de referência =  $273^{\circ}\text{K}$ .
- TW : Temperatura de orvalho dos gases úmidos na saída do secador ( $^{\circ}\text{K}$ ).
- WA : Umidade absoluta do ar ambiente considerada com um valor constante igual a  $0,01 \text{ kg } \bar{\text{a}}\text{gua/kg ar se co}$ .
- $\alpha$  : Relação entre a massa de gases de combustão secos e a massa de combustível seco.
- $\beta$  : Quantidade estequiométrica de ar para combustão completa da unidade de massa de combustível seco (kg ar seco/kg combustível seco).
- $\psi_E$  : Umidade do combustível na entrada do secador base úmida (kg  $\bar{\text{a}}\text{gua/kg}$  combustível úmido).
- $\psi_S$  : Umidade do combustível, base úmida, na saída do secador (kg  $\bar{\text{a}}\text{gua/kg}$  combustível úmido).
- $\mu_E$  : Umidade dos gases, base úmida, na entrada do secador (kg  $\bar{\text{a}}\text{gua/kg}$  gases úmidos).
- $\mu_S$  : Umidade dos gases, base úmida, na saída do secador (kg  $\bar{\text{a}}\text{gua/kg}$  gases úmidos).
- $\epsilon_{\psi_E}$  : Eficiência no aproveitamento do combustível na caldeira com base no poder calorífico inferior, na condição de operação com combustível com umidade de  $\psi_E$ .
- $\epsilon_{\psi_S}$  : Idem  $\epsilon_{\psi_E}$  na condição de operação com combustível com umidade  $\psi_S$ .
- $\epsilon_0$  : Idem  $\epsilon_{\psi}$  admitindo porém que o combustível seja alimentado na caldeira à temperatura ambiente.

## 1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES SOBRE A UTILIZAÇÃO DA MADEIRA COMBUSTÍVEL E A SUA PRÉ-SECAGEM PARA QUEIMA EM CALDEIRAS

A combustão de madeira em caldeiras apresenta uma eficiência menor do que aquela obtida na queima de óleo combustível. A elevada umidade com que os cavacos são geralmente queimados é um dos fatores principais de perda de eficiência. Isto se deve ao processo de evaporação da água do combustível que ocorre antes de se processar a combustão. Entretanto, a operação da caldeira pode ser melhorada, deslocando o processo de evaporação da água de dentro para fora da mesma através do aproveitamento da entalpia dos gases efluentes de chaminé num secador de cavacos. Ou seja, em essência, o secador de combustível contribui para a otimização energética do conjunto.

Os principais benefícios da pré-secagem de cavacos de madeira na geração de vapor são:

- . redução do excesso de ar necessário à combustão;
- . aumento da temperatura de fornalha;
- . redução das "perdas" de energia nos gases efluentes devido ao menor excesso de ar necessário à combustão e, principalmente, à diminuição da temperatura final dos gases efluentes;
- . redução das "perdas" por combustível não queimado;
- . aumento na taxa de liberação de calor da fornalha;
- . redução do volume de gases na caldeira, reduzindo a carga nos ventiladores;
- . diminuição de problemas de depósito de fuligem com possibilidade de diminuição do consumo de vapor nos sopradores.

Como consequência destes benefícios, deverá ocorrer a diminuição do consumo de combustível, ou ainda um aumento significativo na capacidade de produção de vapor, limitado pelas características da caldeira. A figura 2.1, em anexo, apresenta uma curva típica da variação da capacidade de produção de vapor em função da umidade da madeira combustível.

Outra vantagem da pré-secagem é a possibilidade de tornar viável a utilização de combustíveis que hoje não apresentam condições de queima devido ao alto teor de umidade. Um exemplo disso é o acúmulo de cascas e resíduos de madeira

existentes nos pátios de empresas do setor de Celulose e Pa-  
pel.

## 2 "ESTADO DA ARTE"

A tecnologia de secagem de madeira (biomassa) combustí-  
vel, tem avançado lentamente ao longo dos anos e persistem  
ainda polêmicas em relação às situações adequadas para a sua  
utilização e ao sistema mais indicado. Dois tipos diferentes  
de sistemas têm sido desenvolvidos e utilizados; secagem em  
suspensão e secadores rotativos ou de bandejas de vários ti-  
pos.

No panorama internacional, através de pesquisas biblio-  
gráficas e contatos com fabricantes de equipamentos, foram  
identificados e obtidos detalhes de funcionamento de dois  
sistemas: "The Midland-Ross Bahco Biomass Drying System" de-  
senvolvido pela Midland-Ross Corporation, Systems Thermal  
Mechanical Group; e "The Fläkt Fuel Drying System for Improved  
Firing with Wood Waste, Peat and other wet Fuels" desenvolvi-  
do pela AB Svenska Fläkt fabriken.

Nacionalmente não existe tecnologia desenvolvida na área  
de secagem de cavacos, cascas ou resíduos de madeira combus-  
tível.

## 3 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SECAGEM DOS GA- SES DA COMBUSTÃO E DAS POSSÍVEIS ECONOMIAS A SEREM OBTIDAS EM UM SISTEMA INTEGRADO SECADOR-CALDEIRA

O objetivo perseguido ao desenvolver esta metodologia  
foi a aquisição de uma ferramenta que permitisse a obtenção  
de resultados preliminares em termos de economia de biomassa,  
particularmente madeira, quando se utiliza como meio de seca  
os próprios produtos de combustão das caldeiras.

Apesar da quase inexistência de desenvolvimento tecnoló-  
gico sobre estes aspectos do problema procurou-se contorná-  
los assumindo algumas hipóteses fundamentadas na experiência  
prática da queima de biomassa em caldeiras e nas informações  
obtidas na literatura nacional e internacional.

### 3.1 Principais Hipóteses Assumidas

#### 3.1.1 Temperatura dos gases na chaminé da caldeira

Com a redução da umidade da biomassa combustível para queima nas caldeiras, aumenta a temperatura de chama e se modificam os coeficientes de troca de calor no interior das mesmas. Além disso, em consequência de possíveis reduções dos excessos de ar as velocidades dos gases são menores ocasionando maiores tempos de permanência. Estes fatores analisados principalmente em caldeiras Aquotubulares - onde prevalece a troca de calor por radiação - nos autoriza a adotar a hipótese preliminar e simplificadora de que a temperatura dos gases na chaminé da caldeira não se altera com a introdução de um secador e conseqüente redução da umidade do combustível.

#### 3.1.2 Excesso de ar na caldeira

A quantidade de excesso de ar a ser utilizado na queima de biomassa em caldeiras dependerá da composição e geometria do combustível utilizado, de sua umidade, do tipo de alimentação e geometrias de grelhas e da própria geometria da caldeira. O que se pode afirmar é que mantidas as demais condições é possível reduzir o excesso de ar quando se queima com combustível mais seco.

Para efeito desta avaliação preliminar são utilizadas duas relações empíricas. A primeira delas foi obtida da literatura (ref. (11)) e se aplica para um alimentador tipo "Spreader-Stoker" operando com cavacos de madeira com umidade superior a 50% (base úmida). A segunda foi obtida a partir de dados compilados em caldeiras já existentes.

$$e = 0,4 \quad \psi_s / (1 - \psi_s) \quad \text{Para } \psi_s > 0.5$$

$$e = 0,4 + (0.2/0.3) \cdot (\psi_s - 0.5) \quad \text{Para } \psi_s < 0.5$$

onde:

$$e = \frac{\text{massa de ar real}}{\text{massa de ar estequiométrica}} - 1$$

$\psi_s$  = umidade da biomassa combustível na saída do secador (base úmida)

### 3.1.3 Temperatura da biomassa combustível na saída do secador

Esta temperatura dependerá das umidades de entrada e saída da madeira no secador, da temperatura e umidade do meio de secagem e da característica e tipo específico de secador utilizado. A tendência é que, fixadas as demais condições, esta temperatura seja tanto maior quanto menor for a umidade da madeira na saída do secador. Este efeito será mais significativo nos casos em que sejam atingidas umidades inferiores à correspondente ao ponto de saturação das fibras dos cavacos. Por outro lado, a partir de determinados valores desta temperatura a liberação de voláteis da madeira é intensificada o que pode ocasionar uma excessiva concentração de voláteis no interior do secador levando a riscos de explosão, particularmente nos transitórios.

Com base nestas considerações, que deverão ser aprofundadas na continuidade deste estudo, foram adotadas nesta análise preliminar temperaturas na faixa de  $373^{\circ}\text{K}$  a  $413^{\circ}\text{K}$ .

### 3.1.4 Temperatura dos gases na saída do secador

Os mecanismos de troca de calor e massa entre o material a ser seco e os gases, os gradientes de temperatura e umidade envolvidos e o tipo específico de secador são fatores determinantes desta temperatura. Em uma situação ideal a "entalpia sensível" dos gases seria utilizada apenas para evaporar água da madeira e a temperatura correspondente dos gases na saída do secador seria a de saturação adiabática.

Na prática ocorrem perdas para o ambiente além de parte da "entalpia sensível" dos gases ser utilizada para aquecimento do material.

Para efeito desta análise preliminar as perdas para o ambiente são avaliadas como uma parcela da variação da "entalpia sensível" dos gases secos ao longo do secador (o valor adotado neste trabalho para esta parcela é de 10%). A temperatura dos gases na saída do secador é adotada como sendo em torno de  $30$  a  $40^{\circ}\text{K}$  maior que a temperatura de orvalho correspondente. Tal hipótese é fundamentada em algumas experiências a nível internacional.



### 3.1.5 Perdas constantes nas caldeiras

Para a obtenção de resultados preliminares as perdas pelos gases de chaminé da caldeira são calculadas para cada situação e as demais perdas - purgas, radiação e não convertidos - são assumidas como uma parcela constante da energia introduzida. O valor adotado para esta parcela é de 14% da energia introduzida através dos cavacos com base no PCI e foi obtido como sendo a média dos valores encontrados em várias caldeiras que operam com madeira em diferentes umidades nas indústrias de Papel e Celulose.

### 3.2 Avaliação do Potencial de Secagem

A figura 4.2, em anexo, ilustra o esquema de um possível sistema integrado secador-caldeira, com fluxo de gases em contra-corrente ao fluxo de combustível no secador. De acordo com a nomenclatura definida anteriormente podem ser escritas as seguintes relações:

$$\alpha = \frac{\text{massa de gases secos}}{\text{massa de combustível seco}} = 1 + \beta(1+e) - 9.h$$

o balanço de massa do secador em função das umidades envolvidas e da relação  $\alpha$ ,

$$\alpha \left( \frac{1}{1-\mu_S} - \frac{1}{1-\mu_E} \right) = \frac{1}{1-\psi_E} - \frac{1}{1-\psi_S} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_A = P \cdot \dot{m} \text{ gases secos} \cdot CPG(TGE - TGS)$$

Introduzindo as hipóteses, comportamento de gás perfeito nos gases da combustão, calores específicos constantes; e as relações de umidades, foi obtida a expressão geral para o balanço de energia no secador,

$$\alpha \cdot CPG(TGE - TGS)(1-P) + \alpha \cdot hlv \left( \frac{\mu_e}{1-\mu_e} - \frac{\mu_s}{1-\mu_s} \right) + \alpha \cdot CPV \left( \frac{\mu_E}{1-\mu_E} \cdot TGE - \frac{\mu_S}{1-\mu_S} \cdot TGS \right) = CPC(TCS - TCE) + CPA \left( \frac{\psi_S}{1-\psi_S} \cdot TCS - \frac{\psi_e}{1-\psi_e} \cdot TCE \right) \quad (2)$$

Desta forma, partindo-se de um combustível com umidade conhecida ( $\psi_E$ ) e conhecendo-se a temperatura dos gases na chaminé da caldeira (TGE) é possível calcular a umidade

( $\psi_s$ ) com a qual o combustível deixa o secador e é queimado na caldeira. Para isto são utilizadas as hipóteses definidas anteriormente e as equações (1) e (2), adotando-se o seguinte procedimento:

- . Adota-se um valor inicial para a umidade  $\psi_s$
- . Com este valor calcula-se o excesso de ar a ser utilizado na caldeira com as relações do item 3.1.2
- . Para um combustível de composição conhecida é então obtida a umidade dos gases na saída do secador ( $\mu_s$ ) que depende apenas do excesso de ar e da umidade do combustível

$$\mu_s = \frac{\frac{\psi_E}{1-\psi_E} + \beta(1+e)WA + 9h}{1 + \frac{\psi_E}{1-\psi_E} + \beta(1+e)(1+WA)} \quad (3)$$

- . Uma vez obtido o valor da umidade dos gases na saída do secador ( $\mu_s$ ) pode-se calcular a temperatura de orvalho correspondente utilizando-se a seguinte relação empírica,

$$TW = \frac{-3928,5}{L_n\left(\frac{\mu_{s,i} \cdot 1,033}{143.790(0,622 + \mu_{s,i})}\right)} + 41,33 \text{ (}^\circ\text{K)}$$

$$\text{onde } \mu_{s,i} = \frac{\mu_s}{1 + \mu_s}$$

A temperatura dos gases na saída do secador (TGS) é então obtida a partir da hipótese discutida no item 3.1.4,

$$TGS = TW + K \quad \text{onde } 30 < K < 40 \text{ (}^\circ\text{K)}$$

- . A temperatura do combustível na saída do secador, conforme discutido no item 3.1.3, é assumida neste trabalho na faixa de 373-413<sup>o</sup>K.
- . O novo valor da umidade do combustível na saída do secador é então calculado de forma a satisfazer simultaneamente as equações (1) e (2).
- . Uma vez obtido o valor correto de  $\psi_s$  através de iterações, todos os demais valores de umidades e temperaturas no secador passam a ser conhecidos.

### 3.3 Avaliação da Economia de Combustível a ser obtida com a Prê-Secagem

Uma vez calculado o valor da umidade do combustível após a prê-secagem e com a qual é queimado na caldeira ( $\psi_S$ ) é possível calcular e comparar, levando em conta as hipóteses assumidas no capítulo 3.1, as eficiências, perdas e consumos de combustível para as duas situações (com prê-secagem e sem prê-secagem), mantendo-se fixa a produção de vapor.

. Situação 1 - umidade  $\psi_E$  sem o secador

. Situação 2 - umidade  $\psi_S$  com o secador

A eficiência na situação 1 é escrita como,

$$\epsilon\psi_E = 1 - B - \frac{1}{PCI\psi_E} \alpha(1-\psi_E) \left( CPG + \frac{\mu_S}{1-\mu_S} CPV \right) (TGE-293) \quad (4)$$

Nesta mesma situação as perdas percentuais pelos gases de chaminé são expressas pela relação,

$$\overline{PG}\psi_E = \frac{1}{PCI\psi_E} \alpha(1-\psi_E) \left( CPG + \frac{\mu_S}{1-\mu_S} CPV \right) (TGE-293) \quad (5)$$

Analogamente, para a situação 2 a eficiência e as perdas percentuais pelos gases de chaminé da caldeira são expressas pelas relações:

$$\overline{PG}\psi_S = \frac{\alpha(1-\psi_S) \left( CPG + \frac{\mu_E}{1-\mu_E} CPV \right) (TGE-293)}{PCI\psi_S + (1-\psi_S)CPC} / PCI\psi_S + (1-\psi_S)CPC \cdot (TCS-293) + \psi_S \cdot CPA(TCS-293) \quad (6)$$

$$\epsilon\psi_S = 1 - \frac{PO\psi_S}{mc\psi_S PCI\psi_S + (1-\psi_S)CPC(TGS-293) + \psi_S \cdot CPA(TCS-293)} - \frac{\alpha(1-\psi_S) \left( CPG + \frac{\mu_E}{1-\mu_E} CPV \right) (TGE-293)}{PCI\psi_S + (1-\psi_S)CPC(TCS-293) + \psi_S \cdot CPA(TCS-293)}$$

tendo em conta que =

$$\frac{PO\psi_S}{(\text{energia introduzida})\psi_S} = \frac{PO\psi_E}{(\text{energia introduzida})\psi_E}$$

chega-se a:

$$\epsilon\psi_S = \frac{1 - \overline{PG}\psi_S}{1 + \frac{B}{\epsilon\psi_E}} \quad (7)$$

Finalmente, a economia de combustível é obtida a partir da comparação do consumo de combustível úmido nas duas situações, ou seja:

$$EC = \frac{\dot{m}_{CE1} - \dot{m}_{CE2}}{\dot{m}_{CE1}}$$

ou ainda:

$$EC = 1 - \frac{(1-\psi_S) \cdot PCI\psi_E}{(1-\psi_E) (PCI\psi_S + (1-\psi_S)CPC(TCS-293) + \psi_S \cdot CPA(TCS-293))} \cdot \frac{\epsilon\psi_E}{\epsilon\psi_S} \quad (8)$$

Na hipótese em que, após a secagem com os gases de combustão, o combustível for armazenado e não queimado imediatamente, a eficiência e a economia com relação à situação 1 serão expressas respectivamente pelas relações:

$$\epsilon_0 = 1 - \frac{P_0\psi_S}{m_C\psi_S \cdot PCI\psi_S} - \alpha(1-\psi_S) \left( CPG + \frac{\mu_E}{1-\mu_E} CPV \right) (TGE - 293) / PCI\psi_S \quad (9)$$

$$EO = 1 - \frac{(1-\psi_S) PCI\psi_E}{(1-\psi_E) PCI\psi_S} \cdot \frac{\epsilon\psi_E}{\epsilon_0} \quad (10)$$

A partir desta metodologia para quantificação da economia de combustível, através de sua pré-secagem num secador integrado ao sistema de geração de vapor, foi desenvolvido um programa de cálculo que possibilitou a obtenção de uma série de resultados.

Adotando-se as hipóteses já mencionadas neste capítulo e considerando um combustível com as características (composição química e poder calorífico superior-base seca) conforme as apresentadas para o cavaco de eucalipto, foram quantificadas as economias obtidas em diversas faixas de operação do sistema integrado secador-caldeira. Os resultados na forma de gráficos, envolvendo os parâmetros mais significativos do sistema integrado, são apresentados em anexo.

#### 4 CONCLUSÕES

A utilização da pré-secagem de biomassa combustível, particularmente de madeira, através de um sistema integrado secador-caldeira, representa uma possibilidade significativa de

racionalização do seu consumo conforme demonstram os resultados obtidos na quantificação dos benefícios. A utilização destes resultados num caso real possibilitou a obtenção da seguinte informação:

Para uma caldeira existente, de uma empresa do setor de Celulose e Papel no Estado de São Paulo, que produz em média 50 t/h de vapor consumindo 18,25 t/h de cavacos de madeira com uma umidade média de 35% (base úmida), com excesso de ar de combustão de 30% e temperatura dos gases na chaminé de 573<sup>o</sup>K; a economia obtida com a pré-secagem dos cavacos de madeira é de 6,7% do consumo.

Admitindo 7.200 h/ano de operação, densidade aparente de cavaco 0,500 t/m<sup>3</sup> e o valor de US\$ 6,10/m<sup>3</sup> estêreo. A economia anual é de US\$ 107.400.

Este trabalho significa um esforço preliminar no sentido de aprofundamento desta alternativa, que a cada dia ganha mais importância, devido à crescente utilização da madeira combustível, como energético substituto aos derivados de petróleo, em vários setores industriais.

Conforme mencionado ao longo deste trabalho, o tratamento adotado no sentido de permitir um equacionamento do problema, contou com uma série de hipóteses simplificadoras com relação à influência da umidade do combustível no seu processo de queima em caldeiras e com relação aos mecanismos de secagem deste combustível. No entanto, o trabalho realizado significa um passo no sentido de tornar claras as linhas de continuidade necessárias para a obtenção de resultados mais conclusivos.

É importante ressaltar que os resultados a serem obtidos interessam a usuários industriais de caldeiras a cavacos, fabricantes de equipamentos de geração de vapor e de secagem e firmas de engenharia que atuam nas áreas de projeto e consultoria sobre esses sistemas.

Para os usuários de caldeiras a cavaco a possibilidade de implantação de sistemas integrados de secagem de cavacos possibilitará a redução de consumo de energéticos e aumento da capacidade de produção de vapor. Para os fabricantes de equipamentos a comprovação da viabilidade técnico-econômica destes sistemas proporcionará o fornecimento de subsídios tecnológicos para os projetos dos mesmos.

Nesse sentido parece possível o projeto de conjuntos de caldeiras com secadores integrados que apresentem com relação às caldeiras convencionais da mesma capacidade, menor custo operacional com um investimento inicial que poderá ser equivalente ou até inferior ao das mesmas devido a:

- . área de grelha menor;
- . área do preaquecedor de ar menor visando o aumento da temperatura dos gases na saída da caldeira e entrada do secador;
- . secador incorporado cujo custo inicial seria compensado pelas diminuições nos investimentos decorrentes dos dois itens anteriores;
- . menor custo operacional devido às melhorias de eficiência tais como diminuição das perdas pela menor temperatura final dos gases efluentes para a atmosfera e pelo menor excesso de ar de combustão.

Ao mesmo tempo proporcionar-se-á a abertura de mercado nacional e internacional constituído pelos atuais e futuros usuários de caldeiras a cavacos. A realização de desenvolvimentos tecnológicos nesta área, evitará a dependência tecnológica externa ao fornecer a projetistas e fabricantes a capacitação necessária para atender as demandas do mercado.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Cálculos de Combustão. In: IPT. Conservação de energia na indústria do vidro, manual de recomendações. São Paulo, 1983. p. 243-269. (Pub. IPT 1245).
- (2) FERM, Bo Ch. Integrated approach to bark burning increases fuel efficiency Enköping.Sweden, AB. Bahco Ventilation, s.d. 4 p.
- (3) FLAKT AB SVENSKA FLAKTFABRIKEN. Fläkt fuel drying system for improved firing with wood waste, peat and other wet fuels. Jönköping, 1979. 5 p.
- (4) KOLMANN, F.F.P. et al. Drying of chips. In: \_\_\_\_\_ . Principles of wood science and technology. s.l.p., s.c.p., s.d. p. 368-383.
- (5) LONGHI, NELSON: Secagem de biomassa e suas influências na

- operação de caldeiras. São Paulo, Jaakko Pöyry Engenharia, 1984, 34 p.
- (6) MARANHÃO, Luis E.C. Secagem do bagaço. In: Avaliação do bagaço da cana de açúcar. São Paulo, SOPRAL, 1983. p. 40-48.
- (7) MILLAN, P. & PAIVA, M.A. Eficiência no aproveitamento de um combustível num gerador de vapor. São Paulo, IPT, 1983, 16 p.
- (8) MITRE, M.N. Caldeiras para a queima de madeira e bagaço. In: Congresso de Utilidades do IBP, 3. 23-27 nov.1981, pág. irreg.
- (9) OLIVEIRA, L.C.S. Perguntas e respostas sobre secagem de madeiras. São Paulo, IPT, 1981. 36 p. (Pub.Int. 9).
- (10) SOUSA, F.D.A. Aspectos técnicos econômicos de energia de biomassa, lenha, carvão vegetal, gases produzidos por gaseificação de lenha, etanol. São Paulo, IPT, 1983. 73 p.
- (11) TILLMAN, D.A. et alii Wood combustion, principles, processes and economics. New York, Academic Press. 1981. 208 p.
- (12) VALA, Tom Fuel predryer improves waste boiler operations and efficiency. Pulp and paper: 154-157, march, 1982.
- (13) WENGERT, E.M. Secagem de madeiras, aspectos práticos. São Paulo, IPT, 1978. 25 p.

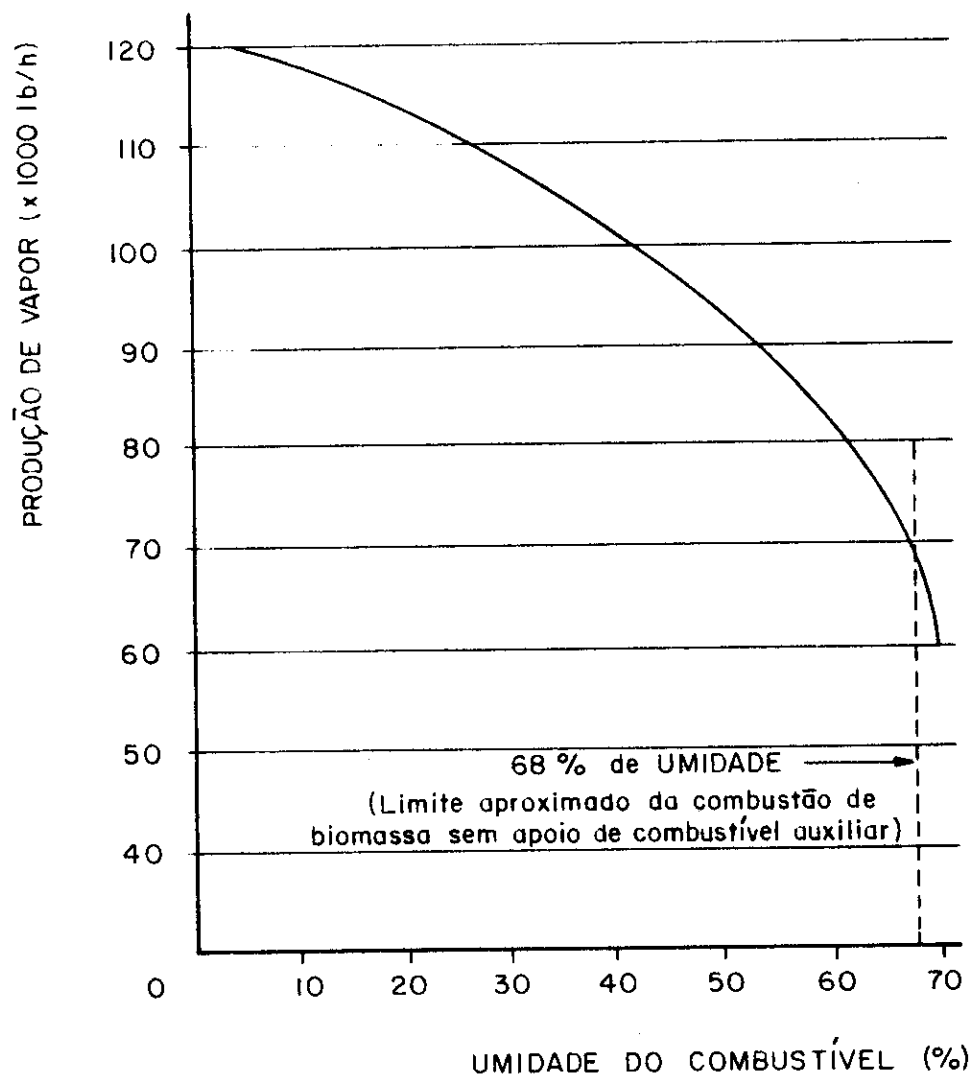


Figura 2.1 - Produção de vapor x umidade (base úmida do combustível).  
 Ref.: (12).



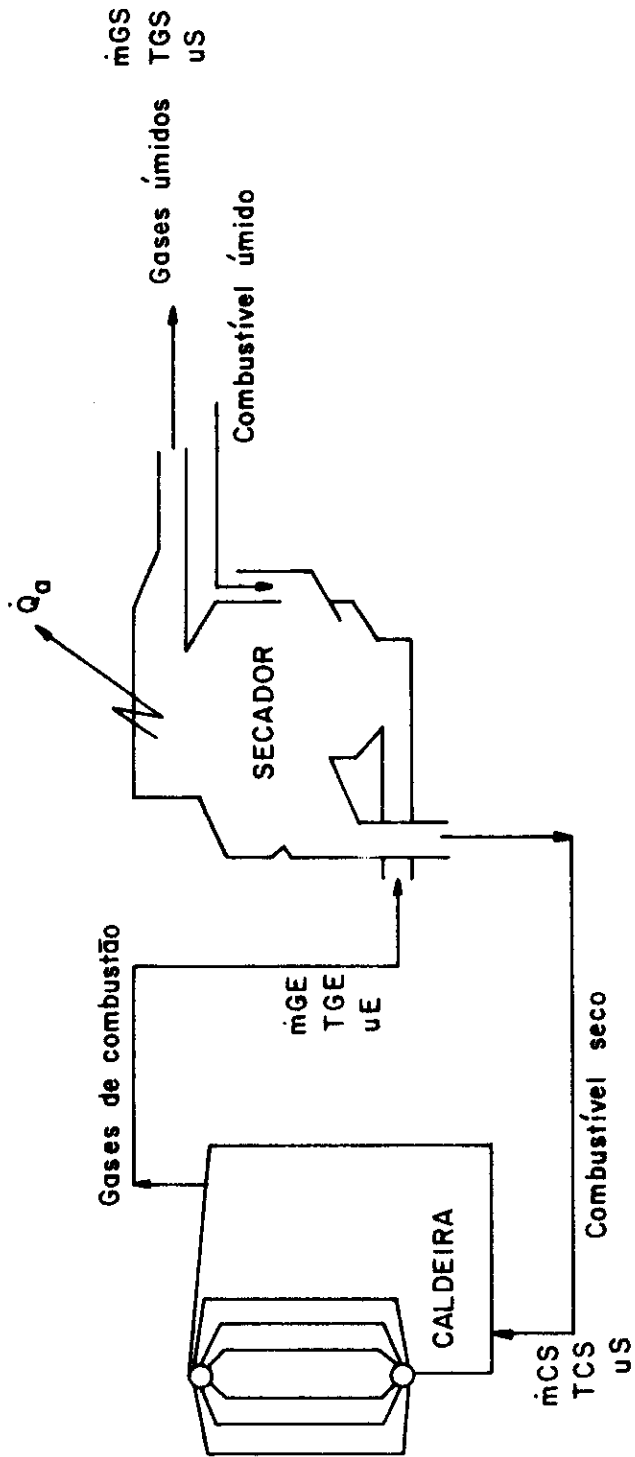


Figura 4.2 - Esquema de um sistema integrado secador-caldeira.

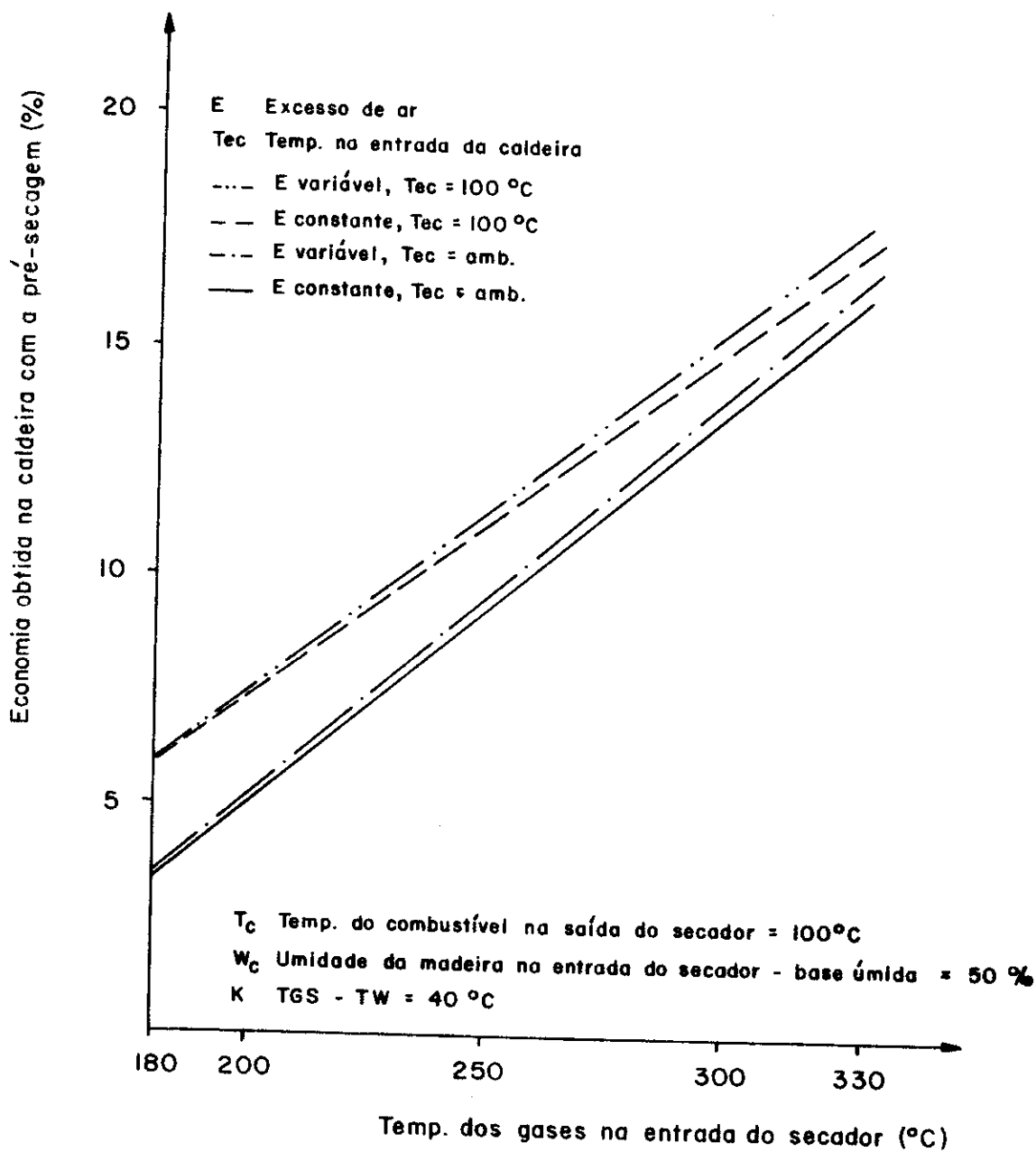


Figura 5.1 - Curvas de economia obtida com a pré-secagem para temperatura do combustível na saída do secador = 100°C.

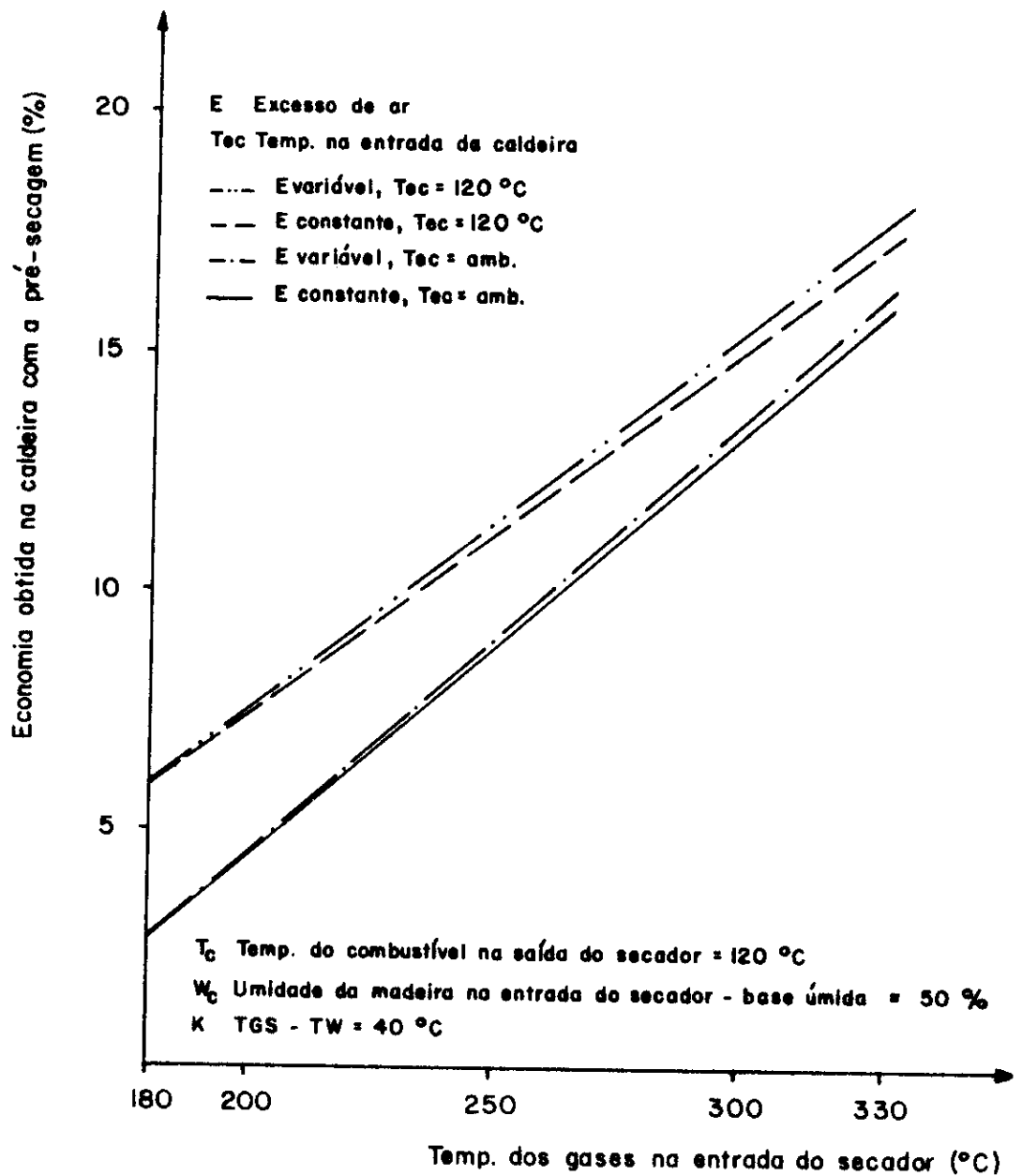


Figura 5.2 - Curvas de economia obtida com a pré-secagem para temperatura do combustível na saída do secador =  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

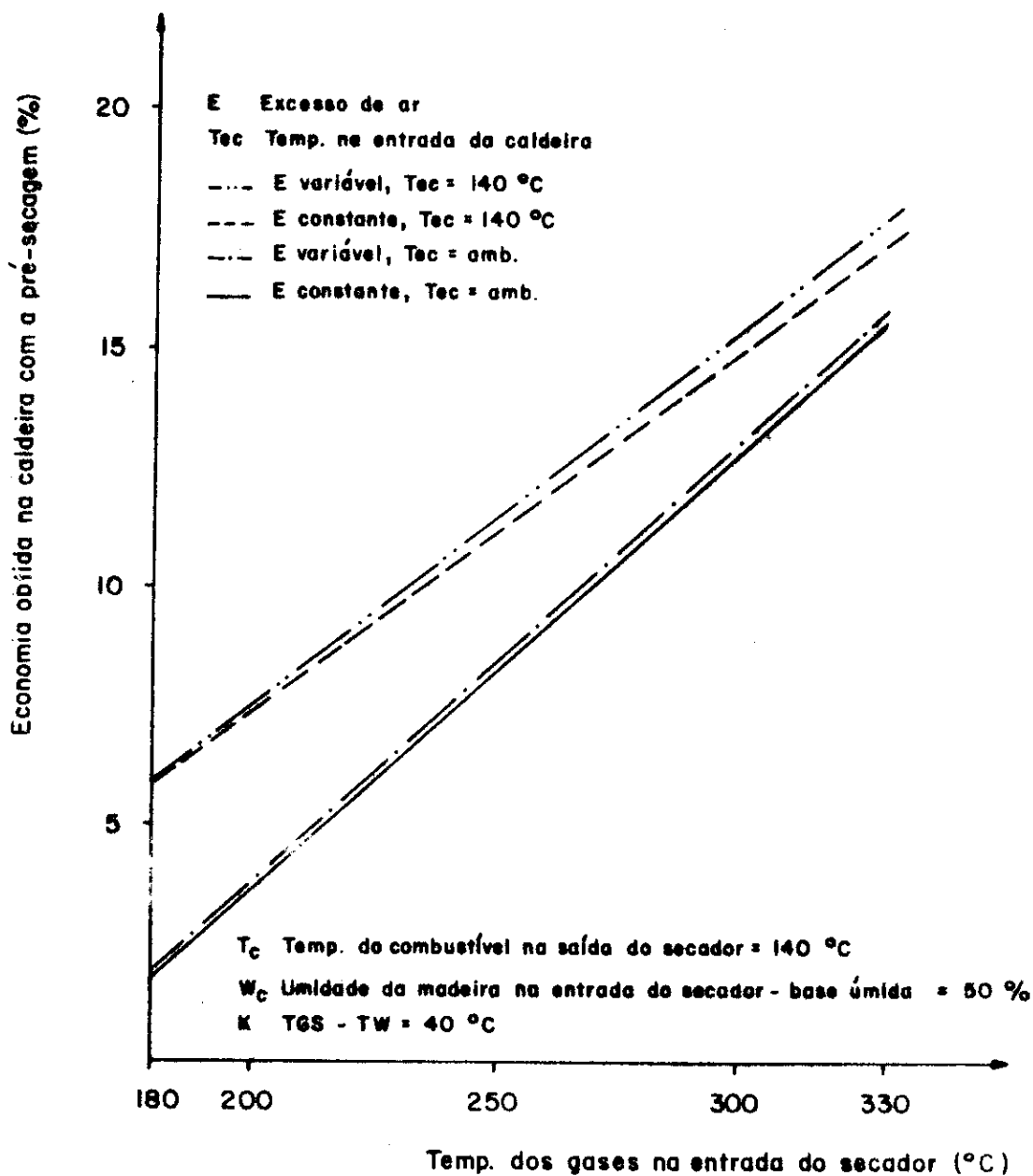


Figura 5.3 - Curvas de economia obtida com a pré-secagem para temperatura do combustível na saída do secador = 140°C

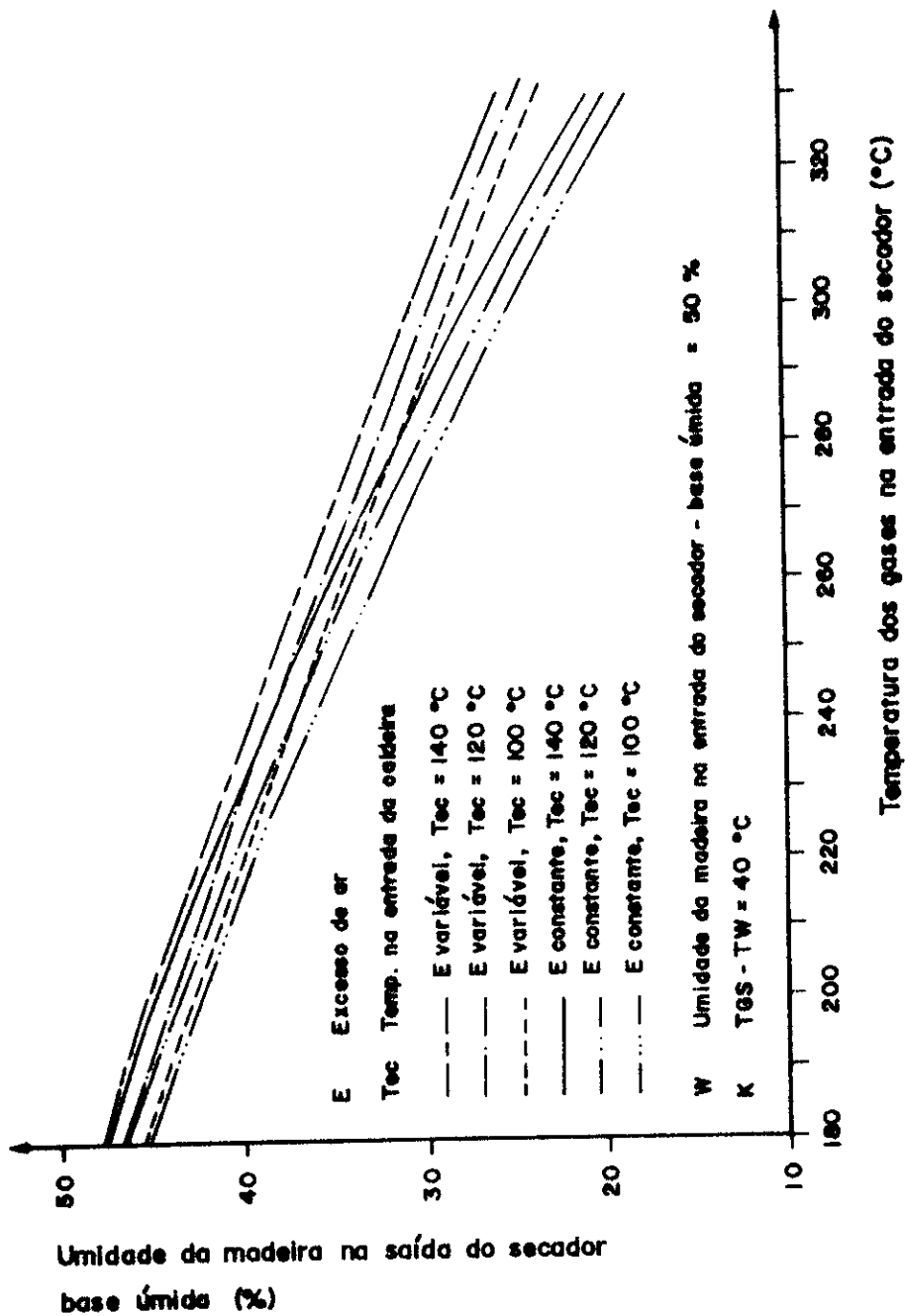


Figura 5.4 - Curvas de umidade do combustível na saída do secador.