

09,0
no

I

H.

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

TRABALHO DE FORMATURA

ESTUDO DE POSSIBILIDADE DE APROVEITAMENTO DE
ENERGIA DISPONÍVEL EM GASES DE CHAMINÉ

Autor : AIRTON CHECONI DAVID
Orientador : JOÃO CARLOS MARTINS COELHO

1981

SUMÁRIO

O presente trabalho consiste em um estudo da possibilidade de reaproveitamento de energia disponível nos gases de chaminé, sendo enfocado o problema de uma indústria têxtil, que dispõe de duas caldeiras de óleo térmico com gases de chaminé saindo a temperatura bastante alta.

Essa firma necessita de ar quente em seu processo de estampagem de tecidos, o qual é aquecido por vapor proveniente de caldeiras, que utilizam óleo BPF como combustível.

Inicialmente, foram realizadas várias visitas à firma, a fim de se fazer medições de vazão, temperatura e composição dos gases de chaminé, e vazão e temperatura do ar do processo de estampagem de tecidos, bem como, coletar informações que seriam necessárias para o desenvolvimento deste estudo.

Com os dados coletados na firma, foi feita uma avaliação da energia disponível nos gases das chaminés das caldeiras de óleo térmico, da energia necessária para aquecimento do ar utilizado no processo de estampagem, e uma confrontação das duas, para se verificar a possibilidade de substituição.

Por fim, foi feita uma análise dos custos envolvidos numa possível modificação do sistema e da consequente economia em óleo combustível, para se verificar a viabilidade econômica dessa modificação.

INDICE

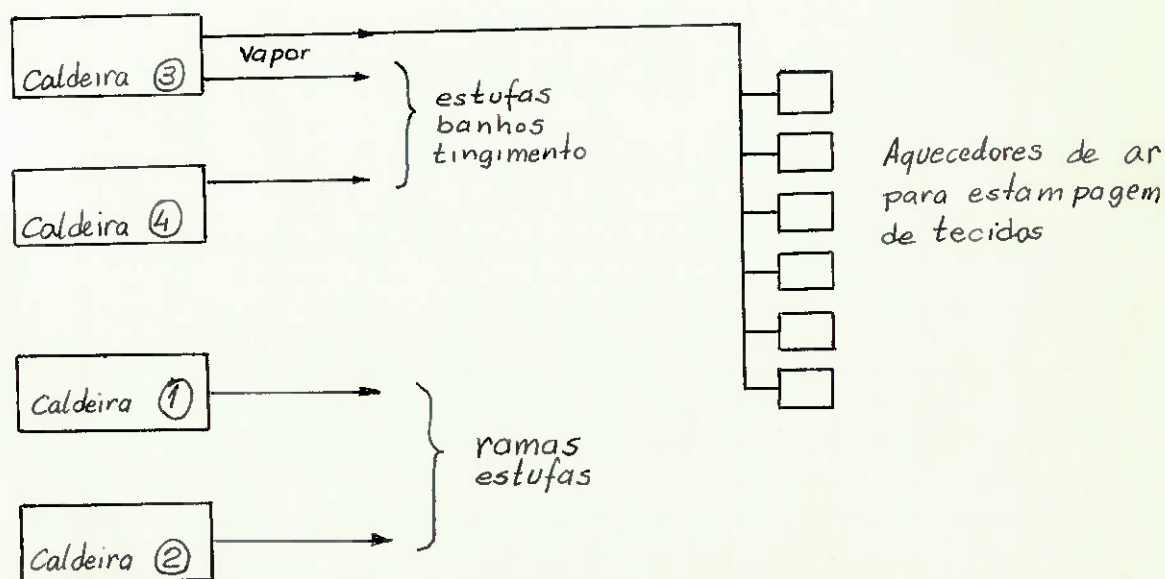
<u>Item</u>	<u>Assunto</u>	<u>Página</u>
	Sumário	II
1	Apresentação do Problema	1
2	Energia dos gases de chaminé	4
3	Energia requerida para o aquecimento de ar	20
4	Comparação da energia requerida com a disponível	28
5	Viabilidade Econômica	31
6	Conclusões	35
	Bibliografia	36

1. Apresentação do problema

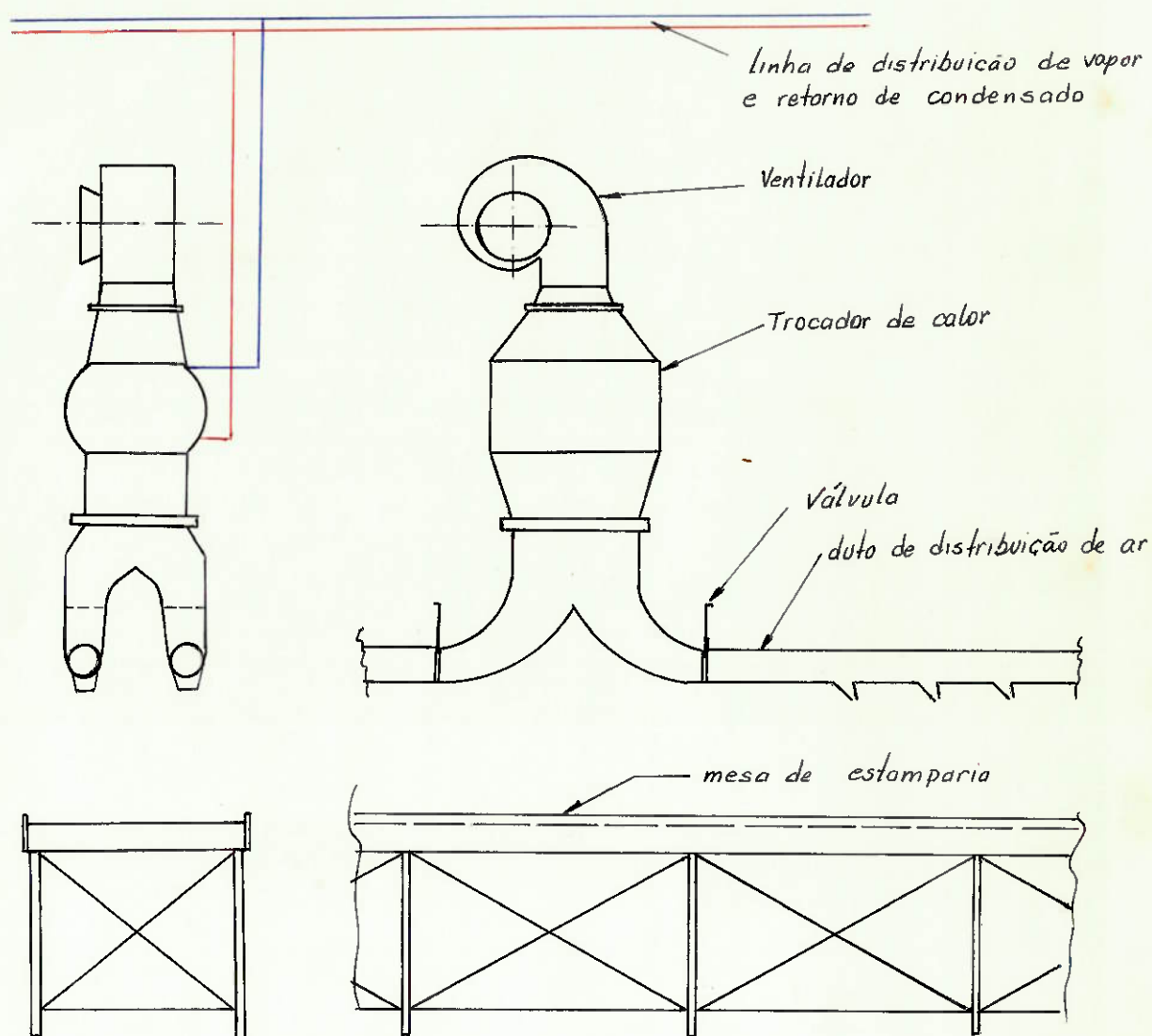
A indústria em questão possui 4 caldeiras, que utilizam óleo BPF como combustível, sendo 2 de vapor e 2 de óleo térmico. O vapor é utilizado para aquecimento de banhos de tingimento, secagem em estufas e aquecimento de ar para estampagem de tecidos. O óleo térmico é utilizado em estufas e ramas de secagem e fixação dos tecidos.

Em uma verificação do consumo de energia pelas caldeiras, notou-se que a temperatura de saída dos gases de chaminé das caldeiras de óleo térmico eram bastante altas, cerca de 400° C, o que é considerado normal, pois, a temperatura do fluido de trabalho é bastante alta. A idéia inicial foi de tentar recuperar a energia dos gases de chaminé, reaproveitá-la para aquecimento do ar utilizado no processo de estampagem de tecidos. Esse ar é atualmente aquecido em trocadores de calor por vapor, proveniente das duas outras caldeiras mencionadas.

Esquema da Instalação (fig. 1)



Esquema da Mesa de estamparia (fig. 2)



São ao todo 6 mesas de estamparia, possuindo cada uma, um conjunto ventilador-trocador de calor, posicionados aproximadamente no centro da mesa, distribuindo ar por intermédio de 4 dutos de distribuição (fig. 2). A temperatura do ar na saída do bocal é de 60°C e sobre a mesa onde é posicionado o tecido, cerca de -45°C . O regime de funcionamento é de aproximadamente 4,5 horas por dia no verão e 9 horas por dia no inverno.

Nota-se neste processo, uma perda bastante grande de energia, pois os dutos não são isolados e o ar quente é soprado ao ambiente sobre a mesa, a temperatura diminui de 70° C no interior do duto para 45°C sobre a mesa de estampagem. No inverno o tempo de operação é o dobro do verão. Em qualquer dos dois casos, é aquecido o ar de todo o ambiente, que tem cerca de - 50 m de comprimento, 20 m de largura e 5 m de altura.

2. Energia dos gases de chaminé

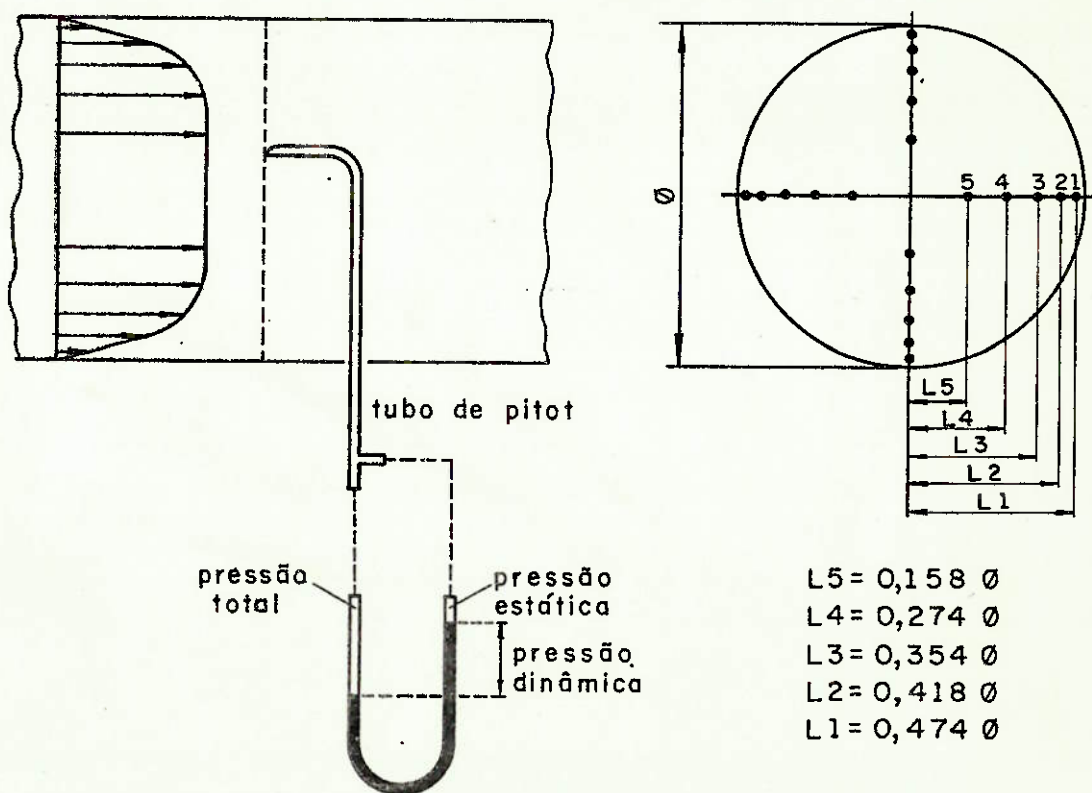
Para se avaliar a energia disponível nos gases de chaminé, algumas medições foram efetuadas, sendo os resultados apresentados na forma de tabelas nas páginas seguintes.

As medições efetuadas foram:

1) Pressão dinâmica dos gases na chaminé

Por meio de um tubo de Pitot e um manômetro diferencial de coluna de água, a pressão dinâmica no interior da chaminé foi medida em 20 pontos diferentes, conforme recomendações constantes na Norma ASME (ref. 3). Esta foi realizada para se determinar o perfil de velocidades para o cálculo da vazão.

fig. 3 - Esquema de utilização do tubo de Pitot



2) Temperatura dos gases de chaminé

Foi medida com termopar acoplado a indicador digital

3) Temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar ambiente

Foram medidas com um psicrômetro em local próximo às caldeiras com a finalidade de se determinar a umidade do ar ambiente utilizado na combustão.

4) Composição dos gases

Foram medidos os teores de O_2 e CO_2 para a determinação - do excesso de ar utilizado na queima do combustível.

5) Pressão atmosférica

Considerada a pressão atmosférica média de São Paulo.

Tabela 1 : Medições Efetuadas na caldeira 1

perímetro do duto (chaminé) = 1600 mm
 diâmetro do duto (D) = 450 mm

Posição relativa	Posição no duto (mm)	Pressão dinâmica ¹ (pol. H ₂ O)	Pressão dinâmica ² (pol. H ₂ O)
0,026 D	13	0,020	0,015
0,082 D	41	0,030	0,020
0,146 D	75	0,030	0,025
0,226 D	115	0,030	0,030
0,342 D	174	0,025	0,030
0,658 D	335	0,035	0,035
0,774 D	395	0,035	0,035
0,854 D	435	0,035	0,040
0,918 D	468	0,030	0,030
0,974 D	497	0,025	0,025

Temperatura dos gases : T = 400 °C

Temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar ambiente:

Tbs = 25 °C

Tbu = 18 °C

Pressão estática na chaminé : - 0,16 pol. H₂O

Teor de O₂ : 14% 12% 11,5% - média 12,5%

Teor de CO₂ : 6,5% 7,5% 8,0% - média 7,3%

Tabela 2 : Medições efetuadas na caldeira 2

perímetro do duto (chaminé) = 1460 mm
 diâmetro do duto (D) = 400 mm

posição relativa	posição no duto (mm)	pressão dinâmica ¹ (pol. H ₂ O)	pressão ² dinâmica (pol. H ₂ O)
0,026 D	12	0,020	0,050
0,082 D	38	0,035	0,055
0,146 D	68	0,045	0,060
0,226 D	105	0,050	0,065
0,342 D	159	0,053	0,070
0,658 D	305	0,070	0,075
0,774 D	359	0,070	0,075
0,854 D	396	0,065	0,070
0,918 D	426	0,065	0,060
0,974 D	452	0,045	0,055

Temperatura dos gases :

T = 400 °C

Temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar ambiente

Tbs = 25 °C

Tbu = 18 °C

pressão estática na chaminé : - 0,16 pol. H₂OTeor de O₂ : 15,5% 14,5% 15,0% - média 15,0%Teor de CO₂ : 4,0% 4,0% 4,0% - média 4,0%

Cálculo da vazão dos gases das chaminés

Para este cálculo será utilizada a equação de Bernoulli:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \text{constante}$$

como a variação de cota é desprezível, $gz = 0$

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} = \text{constante}$$

Essa constante pode ser entendida como a energia de pressão total, que é a soma das energias de pressão e cinética do fluido

A pressão dinâmica é a diferença entre a pressão total e a pressão estática.

A equação acima pode então ser escrita da seguinte forma

$$\frac{v^2}{2} = \frac{\Delta p}{\rho}$$

ou

$$v = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}$$

onde :

p = pressão dinâmica (N/m^2)

v = velocidade do fluido (m/s)

ρ = densidade do fluido (kg/m^3)

ou

$$v = 4,42 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}}$$

Onde :

p = pressão dinâmica ($\text{mm H}_2\text{O}$)

v = velocidade do fluido (m/s)

ρ = densidade do fluido (kg/m^3)

Com essa última equação, calcula-se a velocidade dos gases, e a vazão em massa pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\dot{m} = \rho A v$$

onde:

$$\dot{m} = \text{vazão em massa (kg/s)}$$

$$\rho = \text{densidade do fluido (kg/m}^3\text{)}$$

$$A = \text{área da secção transversal (m}^2\text{)}$$

$$v = \text{velocidade do fluido (m/s)}$$

A densidade dos gases de combustão é aproximadamente igual à densidade do ar a mesma pressão e temperatura

$$\left. \begin{array}{l} p = p_{\text{atm}} \\ T = 400 \text{ } ^\circ\text{C} \end{array} \right\} = 0,525 \text{ kg/m}^3$$

Apressão dinâmica foi medida em 20 pontos diferentes conforme o esquema da figura 3, apresentadas na tabela 1

A média da pressão dinâmica pode ser calculada da seguinte forma:

$$\Delta p = \left[\frac{\sum_{i=1}^{20} \sqrt{\Delta p_i}}{20} \right]^2$$

onde p_i é cada uma das 20 medidas efetuadas.

Para a caldeira 1, tem-se:

$$p = 0,73 \text{ mm H}_2\text{O}$$

aplicando a expressão para o cálculo da velocidade, chega-se a :

$$v = 5,2 \text{ m/s}$$

a área da secção transversal é : $A = 0,159 \text{ m}^2$

Com esses valores na equação para o cálculo da vazão chega-se a :

$$\dot{m} = 0,43 \text{ kg/s}$$

Para a caldeira 2, tem-se:

$$p = 1,44 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$A = 0,126 \text{ m}^2$$

aplicando as mesmas expressões, chega-se a:

$$v = 7,3 \text{ m/s}$$

$$\dot{m} = 0,48 \text{ kg/s}$$

Para calcular a energia disponível nos gases será necessário avaliar o quanto se pode reduzir a temperatura, de maneira que não haja condensação de ácido sulfúrico no trocador de calor. Para isso será necessário calcular a temperatura de condensação do ácido sulfúrico e a condição mais crítica de troca de calor, para se avaliar a temperatura - que os gases deverão deixar a chaminé. Porém antes, para esta primeira avaliação, será admitido que essa temperatura - seja de $200 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$\left. \begin{array}{l} T_i = 400 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_f = 200 \text{ }^\circ\text{C} \end{array} \right\} T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$$

como $\dot{Q} = \dot{m} C_p T$, tem-se

Para a caldeira 1 :

$$\dot{Q} = 86.400 \text{ kcal/h}$$

Para a caldeira 2 :

$$\dot{Q} = 77.400 \text{ kcal/h}$$

Cálculo do excesso de ar de combustão

Composição média do óleo combustível BPF (ref.4)

Carbono :	83,8 %	(porcentagens em massa)
Hidrogênio:	10,4 %	
Enxofre :	4,16%	
Nitrogênio:	1,0 %	
Agua :	0,07%	
cinzas :	0,07%	

Admitindo para es cálculo que a composição média do óleo com bustível BPF seja:

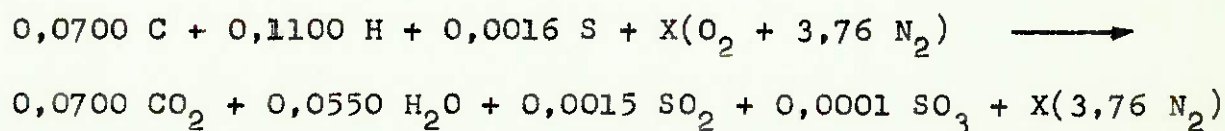
Carbono :	84 %
Hidrogênio:	11 %
Enxofre :	5 %

Para 1 kg de combustível tem-se:

componente	fração em massa	Mol	kmol/kg de comb.
C	0,84	12	0,0700
H	0,11	1	0,1100
S	0,05	32	0,0016

Considerando que 95% do enxofre forma SO_2 e 5% SO_3 , e que a combustão é completa, ou seja, não há formação de CO

Combustão Estequiométrica:



$$X = 0,0991$$

$$\text{Mol do ar} = 28,97$$

$$\text{moles de O}_2 = 0,0991$$

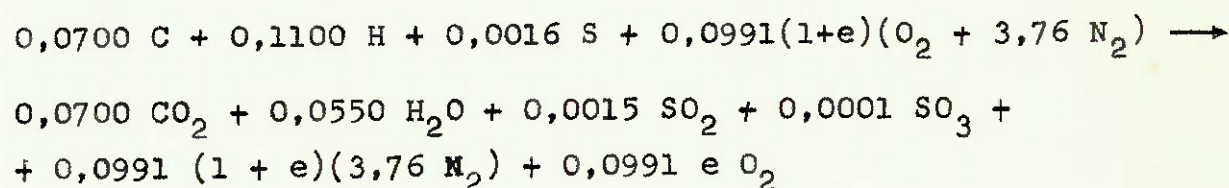
$$\text{Moles de N}_2 = 0,3726$$

$$\text{n}^\circ \text{ total de moles} = 0,4717$$

$$\text{portanto : } 28,97 \times 0,4717 = 13,67 \text{ kg}$$

ou seja, para a combustão estequiométrica, são necessários 13,67 kg de ar por kg de óleo combustível BPF.

Combustão com excesso de ar:



A partir do teor de CO_2 em base seca, calcula-se o coeficiente de excesso de ar (e)

$$e = \frac{\frac{0,0700}{\text{teor CO}_2} - 0,4442}{0,4717}$$

Com o teor de CO_2 medido nos gases de combustão das caldeiras tira-se o valor do coeficiente de excesso de ar utilizado na queima do óleo combustível.

Para a caldeira 1:

$$e = 1,10 \quad \text{ou} \quad e = 110 \%$$

portanto:

$$\text{ar estequiométrico} + \text{excesso} = 2,10$$

$$\text{n}^\circ \text{ de moles de O}_2 + \text{n}^\circ \text{ de moles de N}_2 = \text{n}^\circ \text{ de moles de ar}$$

$$0,0991 \times 2,10 (1 + 3,76) = 0,98$$

$$\text{mol do ar} = 28,97$$

$$0,98 \times 28,97 = 28,52 \text{ kg ar/ kg de comb.}$$

Para a caldeira 2:

$$e = 2,77 \quad \text{ou} \quad e = 277\%$$

$$\text{ar estequiométrico} + \text{excesso} = 3,77$$

$$0,0991 \times 3,77 (1 + 3,76) = 1,78$$

$$1,78 \times 28,97 = 51,52 \text{ kg ar / kg de comb.}$$

Logo de início foi observado que o teor de CO_2 estava muito baixo, principalmente para a caldeira 2, consequentemente o excesso de ar muito alto, o que significa grandes perdas de energia, pois todo o excesso de ar é aquecido até a temperatura de chaminé consumindo energia para isso, portanto, o consumo de combustível é maior para teores baixos de CO_2 .

Para uma combustão completa, normalmente é necessário uma certa quantidade de ar em excesso, além do estequiométrico. Porém, de um modo geral, é interessante operar com o menor excesso de ar possível. Para as caldeiras utilizadas nas indústrias, utilizando óleo combustível BPF, nas condições em que são operadas, de um modo geral, podem ser considerados razoáveis, excesso de ar da ordem de 30 %.

A regulagem do excesso de ar pode ser feita controlando-se o teor de CO_2 nos gases de chaminé. A medida que se diminui a vazão do ar que entra na caldeira para a combustão, o teor de CO_2 aumenta.

Será calculado o teor de CO_2 na chaminé para que se tenha 30% de excesso de ar na combustão.

Utilizando a equação da combustão com excesso de ar da página anterior, tem-se:

$$\text{teor de CO}_2 = \frac{0,0700}{0,4442 + 0,4717 \text{ e}}$$

$$\text{para e} = 30\% \quad \text{ou} \quad \text{e} = 0,30$$

$$\text{teor de CO}_2 = 0,12 \quad \text{ou} \quad 12\%$$

A quantidade de ar que será utilizado nessa combustão será:

$$0,0991 \times 1,30 (1 + 3,76) = 0,61$$

$$0,61 \times 28,97 = 17,76 \text{ kg ar / kg comb.}$$

Não é difícil notar que parte da energia do óleo combustível está sendo utilizada para aquecimento do ar.

Calculando então a energia que está sendo utilizada para o aquecimento do ar excedente dos 30% de excesso, tem-se:

Para a caldeira 1 :

$$\text{vazão de ar} = 28,52 \text{ kg ar / kg comb.}$$

portanto o excedente é de

$$28,52 - 17,76 = 10,76 \text{ kg ar / kg comb.}$$

O calor utilizado para aquecimento desse ar da temperatura ambiente (25 °C) até a temperatura de escape dos gases (400 °C) é:

$$Q = m \text{ Cp } \Delta T$$

$$Q = 1009 \text{ kcal/kg de comb.}$$

Tomando o PCI (Poder calorífico inferior) do óleo combustível BPF como sendo 9.600 kcal/kg, tem-se que 10,5 % do óleo poderá ser economizado fazendo-se a redução do excesso de ar para 30 % .

Para a caldeira 2:

vazão de ar = 51,52 kg ar / kg comb.

portanto o excedente é de

$51,52 - 17,76 = 33,76$ kg ar / kg comb.

O calor utilizado para aquecimento desse ar, da mesma forma feita para a caldeira 1 é:

$Q = 3165$ kcal / kg de comb.

$$\frac{3165 \times 100}{9600} = 33\%$$

portanto, para a caldeira 2, a economia será de 33%

O Cálculo acima não é muito preciso, pois leva em conta apenas a energia envolvida no aquecimento do ar. Na verdade o fenômeno que ocorre é bem mais complexo, para se fazer um calculo exato, deve-se levar em conta uma série de outros fatores como:

- 1) Temperatura de Chama: Ao diminuir o excesso de ar, a temperatura de chama aumenta, aumentando assim a troca de calor por radiação (Note que a troca de calor por radiação é proporcional à quarta potência da temperatura), portanto melhora a eficiência da caldeira.
- 2) Temperatura de escape dos gases de chaminé: A primeira impressão é que a temperatura de chaminé vai aumentar, porém como aumenta a troca de calor por radiação, a temperatura dos gases de combustão vai abaixar mais. Além disso, diminuindo o excesso de ar, a vazão diminui, portanto a velocidade dos gases também diminui, aumentando assim o tempo de permanência dos gases no interior da caldeira, e isto também faz com que aumente a troca de calor, diminu-

indo ainda mais a temperatura dos gases de chaminé, e portanto melhorando a eficiência da caldeira.

Para um cálculo mais exato, deve-se levar em conta ainda outros fatores tais como: entalpia do ar de combustão entalpia do combustível, etc, porém, de uma maneira geral, a economia que se tem na realidade é maior que aquela calculada para as caldeiras 1 e 2; portanto, a redução do excesso de ar para 30% do estequiométrico trará uma economia maior que 10,5% para a caldeira 1, e maior que 33% para a caldeira 2. Como esta é uma primeira avaliação, estes valores serão admitidos como a economia real.

Cálculo da nova vazão de gases de chaminé

Admitindo-se que seja feita uma regulagem nas caldeiras de modo que o excesso de ar fique em 30% do estequimétrico, pode-se calcular a nova vazão de gases para uma nova condição de operação.

$$\text{para } e = 30\% \quad \text{ou} \quad e = 0,30$$

$$m_{ar} = 17,76 \text{ kg ar / kg comb.}$$

para a caldeira 1 na condição de ensaio ($e = 1,10$)

$$\dot{m}_g = 0,43 \text{ kg/s}$$

$$m_{ar} = 28,52 \text{ kg ar / kg comb.}$$

Admitindo que não há escape de gases, pela equação da continuidade tem-se:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_o$$

onde:

$$\dot{m}_g = \text{vazão em massa de gases na chaminé}$$

$$\dot{m}_{ar} = \text{vazão em massa do ar de combustão}$$

$$\dot{m}_o = \text{vazão em massa do óleo combustível}$$

$$\dot{m}_g = 28,52 + 1 = 29,52 \text{ kg gases}$$

portanto, para cada kg de óleo combustível queimado tem-se 29,52 kg de gases de combustão na chaminé. Esta quantidade corresponde à vazão medida de 0,43 kg/s

Para $e = 0,30$, $m_{ar} = 17,76 \text{ kg ar / kg comb.}$, fazendo a mesma hipótese acima, e utilizando a mesma equação,

$$\dot{m}_g = 17,76 + 1 = 18,76 \text{ Kg gases}$$

portanto, para cada kg de óleo combustível queimado, tem-se

18,76 kg de gases de combustão na chaminé. Esta quantidade corresponde à vazão que se quer saber, portanto:

$$\begin{array}{rcl} 29,52 & \text{—————} & 0,43 \text{ kg/s} \\ 18,76 & \text{—————} & x \\ x & = & 0,27 \text{ kg/s} \end{array}$$

ou seja, a nova vazão em massa dos gases de chaminé será - de 0,27 kg/s.

para a caldeira 2 na condição de ensaio ($e = 2,77$)

com o mesmo procedimento feito para a caldeira 1 chega-se a :

$$\begin{array}{rcl} 52,52 & \text{—————} & 0,48 \text{ kg/s} \\ 18,76 & \text{—————} & x \\ x & = & 0,17 \text{ kg/s} \end{array}$$

Cálculo da energia disponível na chaminé
para a nova condição de operação ($e=0,3$)

Admitindo que a temperatura de saída dos gases seja ain da 400 °C, e fazendo as mesmas considerações feitas anteriormente, tem-se:

$$\left. \begin{array}{l} T_i = 400 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ T_f = 200 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{array} \right\} \Delta T = 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Q = m \text{ } C_p \Delta T \quad \text{com } C_p = 0,25 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}$$

Para a caldeira 1

$$Q = 48.600 \text{ kcal/h}$$

Para a caldeira 2

$$Q = 30.600 \text{ kcal/h}$$

A energia total disponível nas chaminés, com as caldeiras operando em melhores condições será bem menor, ou seja 79.200 kcal/h, isto significa que a quantidade de ar que se pode aquecer na sala de estamparia também será menor. Porém, o que se quer é economizar energia, e com essa medida de abaixar o excesso de ar para um valor mais razoável está se fazendo uma economia de maneira mais simples e sem nenhum custo adicional. Estando as caldeiras operando em boas condições, aí então poder-se-a tentar reaproveitar a energia disponível nos gases de chaminé.

Para se fazer uma avaliação mais precisa, seria necessário antes de qualquer outra medida, regular o funcionamento da caldeiras, e depois efetuar novas medições de vazão e temperatura dos gases para se calcular então a energia disponível que poderá ser reaproveitada. Para este estudo, serão admitidos como válidos os valores obtidos até aqui para avaliar a energia que se pode economizar no aquecimento do ar do processo de estamparia.

3. Energia Requerida Para o aquecimento de ar

Para se avaliar a energia necessária para o aquecimento do ar do processo de estampagem de tecidos, foram feitas medições de duas maneiras:

- 1) Foram medidas pressão dinâmica, pressão estática, e temperatura do ar no interior do duto de distribuição da - mesma maneira feita para os gases de chaminé, descrita - no item 2 .
- 2) Foram medidas a vazão e a temperatura da água de retorno para a caldeira (condensado) na saída do trocador de calor.

Para cada trocador de calor, existem 4 dutos de distribuição de ar, que podem funcionar de duas formas principais

- 1) Todos os 4 dutos abertos com livre escoamento de ar para toda a mesa.
- 2) Apenas dois dutos abertos de maneira a haver escoamento de ar apenas para a metade direita ou para a metade esquerda da mesa (ver figura 2)

Desta forma, o sistema foi colocado em operação e efetuadas as medições com todos os dutos abertos, em seguida foram fechados 2 dutos e as mesmas medições efetuadas novamente. Os resultados estão apresentados a seguir.

Tabela 3 :Medições efetuadas com os 4 dutos abertos

Perímetro do duto = 572 mm
 diâmetro do duto = 182 mm

posição relativa	posição no duto (mm)	pressão dinâmica ¹ (mm H ₂ O)	pressão dinâmica ² (mm H ₂ O)
0,026 D	4,7	15,2	12,5
0,082 D	14,5	16,5	15,5
0,146 D	26,4	19,0	18,5
0,226 D	41,0	19,2	19,2
0,342 D	62,0	19,2	18,7
0,658 D	119,0	18,0	17,5
0,774 D	140,4	17,0	17,7
0,854 D	155,0	16,5	17,0
0,918 D	167,0	15,7	16,0
0,974 D	177,0	12,0	12,2

Temperatura do ar no interior do duto : 70 °C

Temperatura do ar na saída do bocal : 60 °C

Temperatura do ar sobre a mesa : 45 °C

Temperatura da parede do duto : 50 °C

Temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar ambiente

Tbs = 28°C

Tbu = 20°C

pressão estática no interior do duto = 9 mm H₂O

Tabela 4 : Medições efetuadas com 2 dutos abertos

Perímetro do duto = 572 mm
 diâmetro do duto = 182 mm

posição relativa	posição no duto (mm)	pressão dinâmica ¹ (mm H ₂ O)	pressão dinâmica ² (mm H ₂ O)
0,026 D	4,7	30,7	30,0
0,082 D	14,5	30,8	30,7
0,146 D	26,4	40,3	40,3
0,226 D	41,0	40,5	40,5
0,342 D	62,0	40,5	40,5
0,658 D	119,0	40,5	40,5
0,774 D	140,4	40,3	40,2
0,854 D	155,0	40,2	30,9
0,918 D	167,0	30,7	30,4
0,974 D	177,0	30,2	28,0

Temperatura do ar no interior do duto : 70 °C
 Temperatura do ar na saída do bocal : 60 °C
 Temperatura do ar sobre a mesa : 45 °C
 Temperatura da parede do duto : 50 °C
 Temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar ambiente
 Tbs = 28 °C
 Tbu = 20 °C
 pressão estática no interior do duto : 18 mm H₂O

Cálculo da vazão de ar

Utilizando a equação de Bernoulli, da mesma forma feita para os gases de chaminé, chega-se à equação:

$$v = 4,42 \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho}} \quad (\text{ver item 2})$$

onde:

v = velocidade do ar no interior do duto (m/s)

Δp = pressão dinâmica do ar no duto (mm H₂O)

ρ = densidade do ar a temperatura de 70 °C (kg/m³)

$$\text{e } \dot{m} = \rho A v$$

onde $\dot{m}$ = vazão em massa do ar (kg/s)

A = área da secção transversal (m²)

A densidade do ar a temperatura de 70 °C e a pressão atmosférica é 1,026 kg/m³

A pressão dinâmica foi medida em 20 pontos diferentes conforme o esquema da figura 3, apresentadas nas tabelas 3 e 4 , e feita a média pela equação:

$$P = \left[\frac{\sum_{i=1}^{20} \sqrt{\Delta P_i}}{20} \right]^2$$

onde ΔP_i é cada uma das 20 medidas efetuadas para os 4 dutos abertos.

$$P = 16,57 \text{ mm H}_2\text{O}$$

$$A = 0,0232 \text{ m}^2$$

$$v = 17,76 \text{ m/s}$$

$$\dot{m} = 0,42 \text{ kg/s}$$

$$\dot{m} \text{ para cada mesa} = \dot{m} \times 4 = 1,69 \text{ kg/s}$$

A vazão em massa de ar para todos os dutos, ou seja, 6 mesas será:

$$\dot{m} \text{ total} = \dot{m} \times 24 = 10,16 \text{ kg/s}$$

Cálculo da energia necessária para aquecimento do ar

Considerando que a temperatura média do ar na entrada de ventilador seja 20 °C tem-se que $T = 50 \text{ °C}$

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p T$$

$$\dot{Q} = 457.200 \text{ kcal/h}$$

este é o calor útil cedido ao ar pelo vapor no trocador de calor.

Cálculo do calor cedido pelo vapor no trocador de calor

Para a avaliação do calor cedido pelo vapor, foi feito um desvio na tubulação para recolher o condensado e medir sua temperatura e vazão.

Para a medida da vazão, foi montado um circuito conforme a figura 4 :

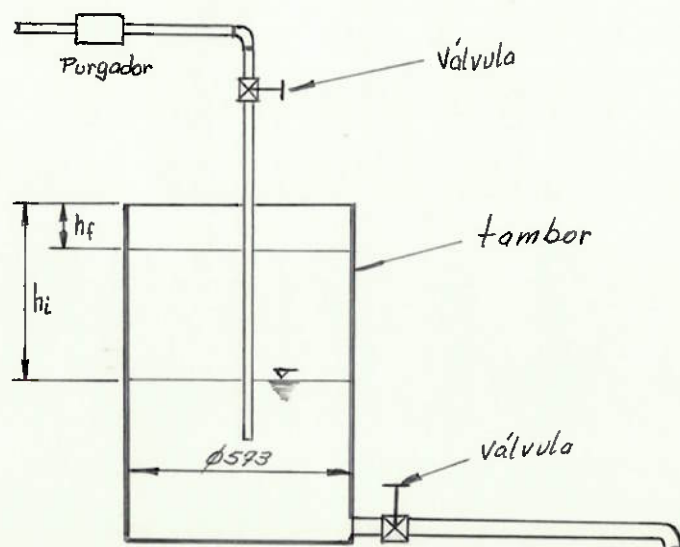


Fig. 4

Esquema da instalação montada para medida - de vazão de condensado

Na saída de vapor do trocador de calor, antes da linha de retornode condensado para a caldeira, foi feito um desvio na tubulação para um tambor previamente preparado. Foram instalados um purgador para evitar a saída de vapor e válvulas para as manobras necessárias . No tambor foi colocada água à temperatura ambiente até um certo nível para que se misturasse a água quente saída da tubulação, evitando assim muita evaporação (a água quente era jogada dentro da água fria conforme figura 4) .

Foram medidos os níveis inicial e final de água no tambor, conforme figura 4, e cronometrado o tempo decorrido. Esses dados são apresentados na tabela seguinte.

Tabela 5 : Medição de vazão de condensado

horário : (h:min)	15:21	15:24	15:28	15:33	15:37
nível (mm)	200	170	135	80	38

Obs.: As 15:37 a água do tambor foi drenada, iniciando novamente as medições.

horário(h:min)	15:38	15:39	15:40	15:41	15:42
Nível (mm)	218	210	200	190	180

horário(h:min)	15:43	15:45	15:46	15:48	15:50
nível (mm)	170	148	140	115	100

horário(h:min)	15:51	15:52	15:53	15:54
nível (mm)	90	80	72	60

diâmetro do tambor : 573 mm

Temperatura do condensado : 100 °C

Em média, o aumento do nível da água do tambor foi de 1 cm por minuto.

Area da secção transversal do tambor = 25,8 dm²

portanto, a vazão foi de 2,58 l/min = 154,8 l/h

Considerando a mesma vazão em todos os 6 trocadores de calor tem-se:

vazão total = 930 l/h

O vapor sai da caldeira saturado a uma pressão de 120 lb/pol² = 8,44 kgf/cm². Com esse valor, na tabela de vapor saturado, tira-se a temperatura : T = 172 °C

O calor cedido pelo vapor é:

$$\dot{Q} = \dot{m} (h_v - h_l)$$

onde :

$\dot{Q}$ = calor cedido pelo vapor (kcal/h)

$\dot{m}$ = vazão em massa de vapor (kg/h)

h_v = entalpia do vapor na entrada (kcal/kg)

h_l = entalpia do líquido na saída (kcal/kg)

$$T_e = 172 \text{ °C} \quad \text{---} \quad h_v = 661 \text{ kcal/kg}$$

$$T_s = 100 \text{ °C} \quad \text{---} \quad h_l = 102 \text{ kcal/kg}$$

$$\dot{m} = 930 \text{ kg/h}$$

$$\dot{Q} = 519.870 \text{ kcal/h}$$

Considerando que o PCI do óleo combustível utilizado nas caldeiras seja 9.600 kcal/kg, e considerando um rendimento na queima de 80 %, sem contar as perdas nas tubulações, tem-se:

$$\dot{m}_c = 67,7 \text{ kg/h}$$

onde $\dot{m}_c$ é a vazão de óleo combustível queimado na caldeira correspondente ao aquecimento do ar.

O tempo de funcionamento dos aquecedores de ar é de - 4,5 horas por dia no verão e de 9 horas por dia no inverno, para 25 dias de trabalho em um mes, tem-se então :

$$67,7 \times 4,5 \times 25 = 7.616 \text{ kg} \quad (\text{verão})$$

$$67,7 \times 9 \times 25 = 15.232 \text{ kg} \quad (\text{inverno})$$

ou seja, um consumo de óleo combustível de 7616 kg/mes no - verão e de 15.232 kg/mes no inverno, apenas para o aqueci-mento do ar utilizado na estampagem de tecidos.

4. Comparação da energia requerida com a disponível

Das medições efetuadas nas caldeiras 1 e 2, foram obtidas vazões de 0,48 e 0,43 kg/seg de gases respectivamente perfazendo um total de 0,91 kg/seg, o que representa uma energia total de 163.800 kcal/h. Com uma redução no excesso de ar para 30 % do estequiométrico, foram obtidas novas vazões conforme item 3 que representa um total em energia de 79.200 kcal/h.

Admitindo um rendimento total do equipamento de 50 % (que englobe eficiência do trocador de calor e perdas pelas tubulações) será feita uma comparação da energia disponível nos gases de chaminé com a requerida no aquecimento de ar

A energia útil disponível será portanto:
 81.900 kcal/h na condição atual de operação
 39.600 kcal/h na condição melhorada
 como a energia necessária para o aquecimento do ar é de -
 519.870 kcal/h tem-se um aproveitamento de:

15,7 % na condição atual
 7,6 % na condição melhorada

Essas porcentagens também podem ser entendidas como sendo a economia que se faria em óleo combustível para o aquecimento do ar; a redução no consumo de óleo combustível seria então:

na condição atual:	1196 kg/mes	(verão)
	2392 kg/mes	(inverno)
na condição melhorada:	579 Kg/mes	(verão)
	1158 kg/mes	(inverno)

Os tempos de funcionamento do equipamento para aquecimento de ar, dado como 4,5 horas por dia no verão e 9 horas por dia no inverno, são condições extremas, pode-se fazer - uma média para o ano todo como sendo 6,5 horas por dia, assim, em média a redução no consumo será:

$67,7 \times 6,5 \times 25$	$=$	11.001	kg/mes (consumo atual)
na condição atual		1727	Kg/mes (economia)
na condição melhorada		836	kg/mes (economia)

O tempo de funcionamento das caldeiras de Óleo térmico é de aproximadamente 22 horas por dia, durante todo esse período de tempo 0,91 kg/seg de gases de combustão são jogados na atmosfera a temperatura de 400 °C, o que dá um total de:

$3,6 \times 10^6$	kcal/dia (condição atual)
$1,7 \times 10^6$	kcal/dia (condição melhorada)

Os aquecedores de ar, para uma média de funcionamento de 6,5 horas por dia consomem:

$930 \times 6,5 = 6045$ kg de vapor / dia, o que representa um consumo de energia de:

$519.870 \times 6,5 = 3,4 \times 10^6$ kcal/dia

Observa-se aqui que a energia necessária para o aquecimento de ar é praticamente igual à energia que poderia ser reaproveitada, e que esta sendo jogada fora na atual condição de funcionamento. Com a redução para 30% de excesso de ar, a energia disponível representa ainda aproximadamente a metade da necessária para o aquecimento do ar do processo - de estampagem.

Porém, não existe um meio prático para se armazenar a energia disponível nos gases de chaminé para utilizá-la - posteriormente; pode-se então pensar em outras possibilidades de reaproveitamento dessa energia em outros equipamentos que requeiram uma quantidade menor de energia por unidade de tempo, porém com tempo de funcionamento mais prolongado, como por exemplo o aquecimento do próprio ar de combustão.

5. Viabilidade Econômica

Para uma possível modificação no sistema de aquecimento de ar do processo de estampagem de tecidos, utilizando a energia disponível nos gases de combustão dos aquecedores de óleo térmico, será necessário um investimento em equipamentos, tubulações, e mão de obra. Por outro lado, - essa modificação trará uma diminuição no consumo de óleo - combustível utilizado para o aquecimento de vapor. Cabe - então, fazer uma avaliação da viabilidade econômica dessa possível modificação, ou seja, verificar em quanto tempo a economia de óleo combustível consegue recuperar o capital-investido.

Para uma avaliação mais precisa, seria necessário ter um projeto de toda a modificação bem definido, assim se poderia verificar todos os custos com mais exatidão.

Neste trabalho serão considerados os custos dos equipamentos principais e estimado um valor para outros materiais e acessórios menos significativos em termos de custo.

Equipamentos:

- Trocador de Calor : tipo casca - tubo

Os gases de combustão passando por dentro dos tubos e o ar por fora.

vazão de gases: 0,91 kg/s

vazão de ar : 10 kg/s

Temperatura de entrada dos gases : 400 °C

Temperatura de saída dos gases : 200 °C

Temperatura de entrada do ar : 20 °C

Custo avaliado : Cr\$ 500.000 (novembro/81)

- Tubulações

Tubos fabricados com chapa de aço comum de 1/8"

diâmetro de 500 mm

custo por metro linear : Cr\$ 7.000

custo total (90 m) Cr\$ 630.000 (Novembro/81)

- Suportes para tubulação e trocador de calor

custo estimado em Cr\$ 200.000

- Acessórios, materiais

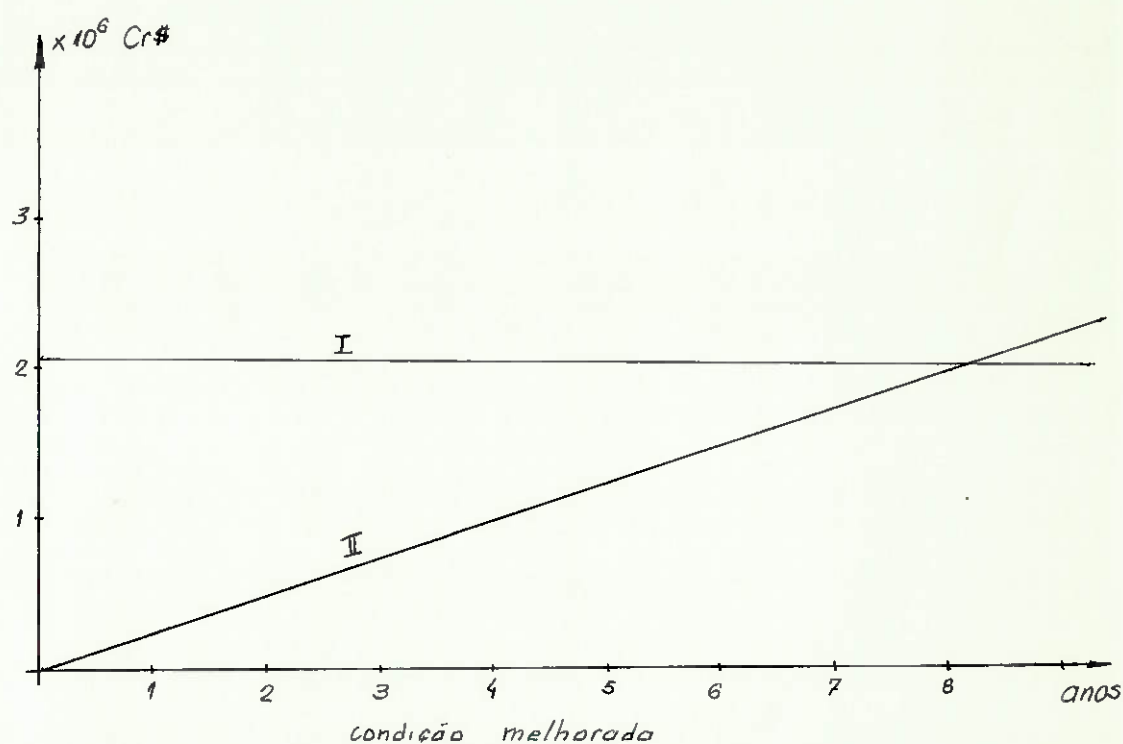
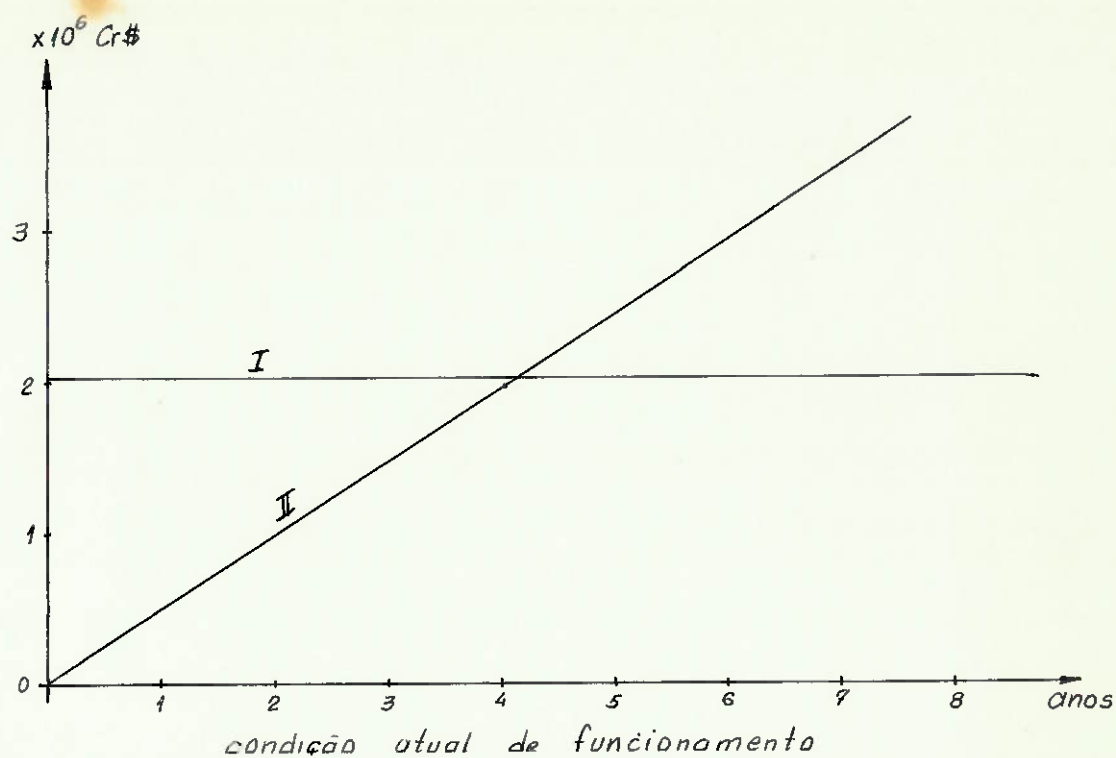
custo estimado em Cr\$ 100.000

- Mão de Obra:

custo estimado em Cr\$ 600.000

Custo total Cr\$ 2.030.000

Por intermédio de um gráfico, pode-se comparar o custo da modificação com o valor acumulado da economia em óleo - combustível. Colocando-se na ordenada o custo em cruzeiros e na abscissa o número de anos tem-se:



curva I : Valor atual do custo do equipamento
 curva II : valor atual da economia de energia obtida pela modificação do equipamento.

FIG. 5 Gráficos comparativos de custos.

Essas curvas foram levantadas considerando o preço do óleo combustível BPF de Cr\$ 23 (preço de novembro de 1981) por kg.

Não foram levados em conta taxas de juros, nem aumento de preço de óleo combustível (em relação à ORTN)

6 - Conclusões

Do que foi exposto até aqui, nota-se que a energia disponível nos gases de chaminé é bem maior na condição atual de operação do que na condição melhorada (com redução do excesso de ar para 30%). Isto quer dizer que um valor considerável de energia está sendo desperdiçado no aquecimento - de excesso de ar muito alto. A economia que se consegue melhorando as condições de operação das caldeiras é maior que a economia que se conseguiria reaproveitando o calor dos gases de combustão conforme calculado nos itens 3 e 4, visto-que o consumo global das caldeiras é aproximadamente igual.

O investimento necessário para a modificação do sistema de aquecimento de ar do processo de estampagem utilizando a energia dos gases de combustão é bastante alto comparado - com o retorno em economia de óleo combustível, conforme se-observa no gráfico da figura 5. O tempo necessário para a recuperação do capital investido também é muito grande mesmo na condição atual de operação, que conforme já foi vista, não é boa e deve-se portanto abandoná-la.

Conclui-se então que não é economicamente viável essa - substituição, pelo menos para a condição em que estão ope - rando as caldeiras. Como o objetivo principal é a economia de combustíveis, o ideal seria melhorar as condições de ope - ração das caldeiras, principalmente pela diminuição do ex - cesso de ar de combustão, e somente após isso tentar fazer um estudo mais profundo da possibilidade de aproveitamento da energia disponível nos gases de chaminé para algum pro - cesso onde o custo da modificação se revele satisfatório.

BIBLIOGRAFIA

- 1) VAN WYLEN, G.J. e Sonntag, R.E. - Fundamentos da Termodinâmica clássica - 2ª edição, Editora Edgard Blucher, 1976
- 2) SILVA, Benedito Remi - Manual de Termodinâmica e Transmissão de calor - 4ª edição, Grêmio Politécnico DLP.
- 3) ASME Power test code - Test Code For Fans, New - York, 1946
- 4) IPT conservação de energia na indústria cerâmica Manual de recomendações, 1980, publicação IPT nº 1161