

2302505

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica
Projeto Mecânico

Gerador de Vapor

Alberto Wrege
Professor orientador:
Engº Hildo Pera

1987

TF-87
W 925g

ÍNDICE

1. Introdução	1
2. Dados de projeto	2
3. Cálculos térmicos	3
Ábaco 1	6
Ábaco 2	7
Ábaco 3	9
Ábaco 4	11
4. Bibliografia	16

1. INTRODUÇÃO

Um gerador de vapor, seja de água, mercúrio ou outros fluidos vaporizantes, é um trocador de calor composto de diversos elementos, com finalidade de produzir vapor em pressão e temperatura especificadas, a partir de energia térmica fornecida por combustível.

Os primeiros modelos foram construídos tal que os gases de escape circulavam por tubos cercados pela água (caldeiras de tubos de fogo, de tubos de fumo, flamo-tubulares). Com a necessidade de se trabalhar com pressões elevadas, desenvolveram-se as caldeiras aquo-tubulares, nas quais os gases de escape circulam em torno dos tubos ferveadores contendo então a água.

No projeto desenvolvido a seguir trabalhou-se nos cálculos de uma caldeira aquo-tubular, de tubos curvos e dois tambores, funcionando com circulação natural, isto é, não há bombas além daquela que alimenta o sistema. Os estudos realizados para elaboração do projeto levam ao aprofundamento dos conhecimentos técnicos envolvidos. Além das aplicações do uso de uma caldeira, este item pode ser encarado como motivador da realização deste projeto.

2. DADOS DE PROJETO

Capacidade	60000 Kg/h
Qualidade do vapor	Superaquecido a 350°C
Pressão de operação	28 Kgf/cm ² ef
Temperatura da água de alimentação	110°C
Temperatura do ar	25°C
Eficiência térmica	83%
Combustível	Carvão vapor de SC
Grelha	Rotativa
Carga da câmara	250000 Kcal/m ³ h
Excesso de ar	30%
Temperatura das cinzas	800°C

Características do combustível

"Carvão vapor" de Santa Catarina

-Análise elementar em base seca

C 46%

H 3%

N 1%

S 3%

O 0%

Z 47%

PCS = 4500 Kcal/Kg

ou 18840 KJ/Kg

-Em base úmida, o teor de água é 10%:

C' 41,4%

H' 2,7%

N' 0,9%

S' 2,7%

O' 0,0%

Z' 42,3%

W 10,0%

3. CÁLCULOS TÉRMICOS

CONDIÇÕES DE ESTADO:

Vapor superaquecido,	350°C,	29 Kgf/cm ²	- $h_v = 744,7$ Kcal/Kg
Vapor saturado,	230,9°C,	29 Kgf/cm ²	- $h_v = 670,1$ Kcal/Kg
Líquido saturado,	230,9°C,	29 Kgf/cm ²	- $h_l = 237,4$ Kcal/Kg
Líquido comprimido,	110°C,	29 Kgf/cm ²	- $h_l = 110,6$ Kcal/Kg
Líquido saturado,	110°C,	1,46 Kgf/cm ²	- $h_l = 110,12$ Kcal/Kg

CALOR PARA VAPORIZAÇÃO:

$$Q_v = D(h_v - h_a)$$
$$D = 60000 \text{ Kg/h}$$
$$h_v = 744,7 \text{ Kcal/Kg}$$
$$h_a = 110,12 \text{ Kcal/Kg}$$
$$Q_v = 60000(744,7 - 110,12)$$
$$Q_v = 38074800 \text{ Kcal/h}$$

DETERMINAÇÃO DO PCI:

$$PCI = PCS - (9h + w).600$$
$$PCI = 4500 - (9.0,027 + 0,1).600$$
$$PCI = 4294 \text{ Kcal/Kg}$$

CONSUMO DE COMBUSTÍVEL:

$$B = Q_v / (PCI \cdot \eta) ; \eta = 83\%$$
$$B = 38074800 / 4294.0,83 = 10683 \text{ Kg/h}$$

VOLUME DOS FLUIDOS:

$$v_{ar}^t = 8,876c + 26,443h + 3,32s - 3,332o$$
$$c = 0,414 \quad h = 0,027 \quad s = 0,027 \quad o = 0$$
$$v_{ar}^t = 4,478 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$$
$$v_{ar}^r = m v_{ar}^t = (1 + 0,3). 4,478 = 5,82 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$$
$$v_g^t = 1,8535c + 0,693s + 0,8n + 0,79v_{ar}^t + (9h + w).1,24$$
$$n = 0,009 \quad w = 0,10$$
$$v_g^t = 5,816 \text{ Nm}^3/\text{Kg}$$

$$S_1 = 3,978.4200 + 1,000^2 + 2,964.(2,200 + 0,500/2) = 24,969m^2$$

$$2.\pi.r = 2.\pi.300 = 1884,96; + 4 = 417,2; + 2 = 235,6.$$

$$350 - 650 - 3.471 - 1900 - 450 - 2700 - 236 - 1100 = 8,80 \text{ m}$$

$$450 - 3500 - 471 - 4900 - 236 - 1100 = 10,66 \text{ m}$$

LARGURA DA CÂMARA:

$$L_c = V_c/S_1 = 185,4/24,969 = 7,425 \text{ m}$$

PERÍMETRO TOTAL:

$$C_t = 8,8 + 10,66 = 19,46 \text{ m}$$

SUPERFÍCIE PROJETADA:

$$S_{proj} = 2.S_1 + C_t.L_c = 2.24,969 + 19,46.7,425$$

$$S_{proj} = 194,43 \text{ m}^2$$

PERDA NO CINZEIRO:

$$P = \frac{z.cp.\Delta t}{pci} . 100$$

z = porcentagem de cinzas do combustível = 42,3%

cp = calor específico das cinzas = 0,3 Kcal/Kg°C

Δt = diferença de-temperatura entre o combustível na entrada e as cinzas no cinzeiro

$$P = \frac{0,423.0,3.(800 - 25)}{4294} . 100$$

$$P = 2,3\%$$

OUTRAS PERDAS:

incombustos 1%

carbono fixo 5%

combustível volante 0,5%

TOTAL DE PERDAS:

$$P_t = 2,3 + 1 + 5 + 0,5 = 8,8\%$$

CALOR DA FORNALHA:

$$Q_T = (1 - P_t) . Q_t = 0,912.46357767 = 42278283 \text{ Kcal/h}$$

CALOR TROCADO NOS TUBOS:

$$\text{Carga da fornalha: } Q_T/V_C = \frac{42278283}{185,4} = 228038 \text{ Kcal/m}^3\text{h}$$

$$\text{Carga da superfície: } Q_T/S_{\text{proj}} = \frac{42278283}{194,43} = 217447 \text{ Kcal/m}^2\text{h}$$

No ábaco 1, $c_{\text{irr}} = 3,7$. Usamos 3,5 na prática.

Superfície reduzida:

$$S_{\text{red}} = \frac{S_{\text{proj}} \cdot c_{\text{irr}} \cdot 1000}{4 \cdot V_g^r}$$

$$S_{\text{proj}} = 194,43 \text{ m}^2; V_g^r = 76490 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$S_{\text{red}} = 194,43 \cdot 3,5 \cdot 1000 / 4 \cdot 76490 = 2,22$$

Com os valores de:

$$q_{\text{esp}} = Q_T/V_g^r = 552,7 \text{ Kcal/Nm}^3$$

$$m = 1,3$$

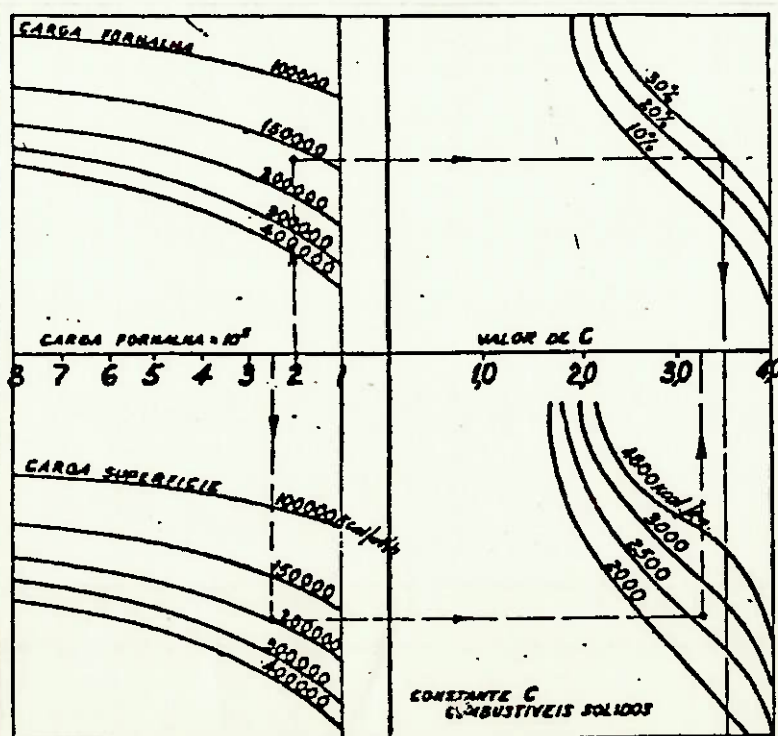
$$\text{PCI} = 4300 \text{ Kcal/Kg}$$

$$S_{\text{red}} = 2,22$$

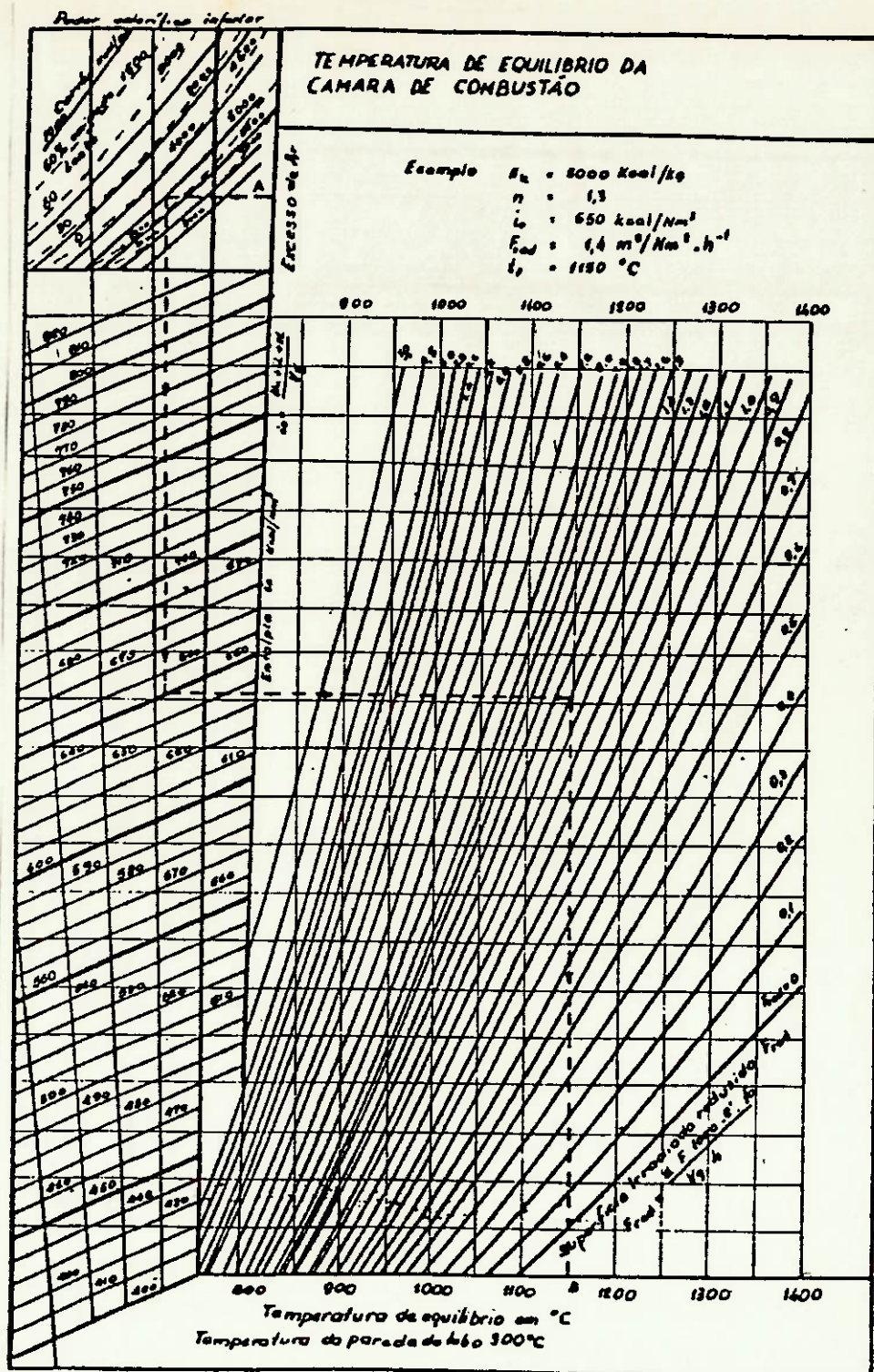
aplicamos o ábaco 2 e encontramos o valor de T_e , temperatura dos gases após a câmara de combustão: $T_e = 950^\circ\text{C}$.

O ábaco 3 dá o valor de h_r , neste ponto denominado de conteúdo térmico específico residual: $h_r = 350 \text{ Kcal/Nm}^3$

Ábaco 1.



Ábaco 2.



CALOR RESIDUAL:

$$Q_r = V_g^r \cdot h_r = 76490.350$$

$$Q_r = 26771500 \text{ Kcal/h}$$

ABSORVIDO PELA CÂMARA:

$$Q_{ac} = Q_T - Q_r = 15506783 \text{ Kcal/h}$$

PELO SUPERAQUECEDOR:

$$Q_{super} = D(h_{super} - h_{vsat}) = 60000 \cdot (744,7 - 670,1)$$

$$Q_{\text{super}} = 4476000 \text{ Kcal/h}$$

PARA VAPORIZAÇÃO:

$$Q_v = D \cdot (h_v - h_l) = 60000 \cdot (670,1 - 237,4)$$

$$Q_v = 25962000 \text{ kcal/h}$$

ABSORVIDO PELO FEIXE:

$$Q_f = Q_v - Q_{ac} = 10455217 \text{ Kcal/h}$$

PELO ECONOMIZADOR:

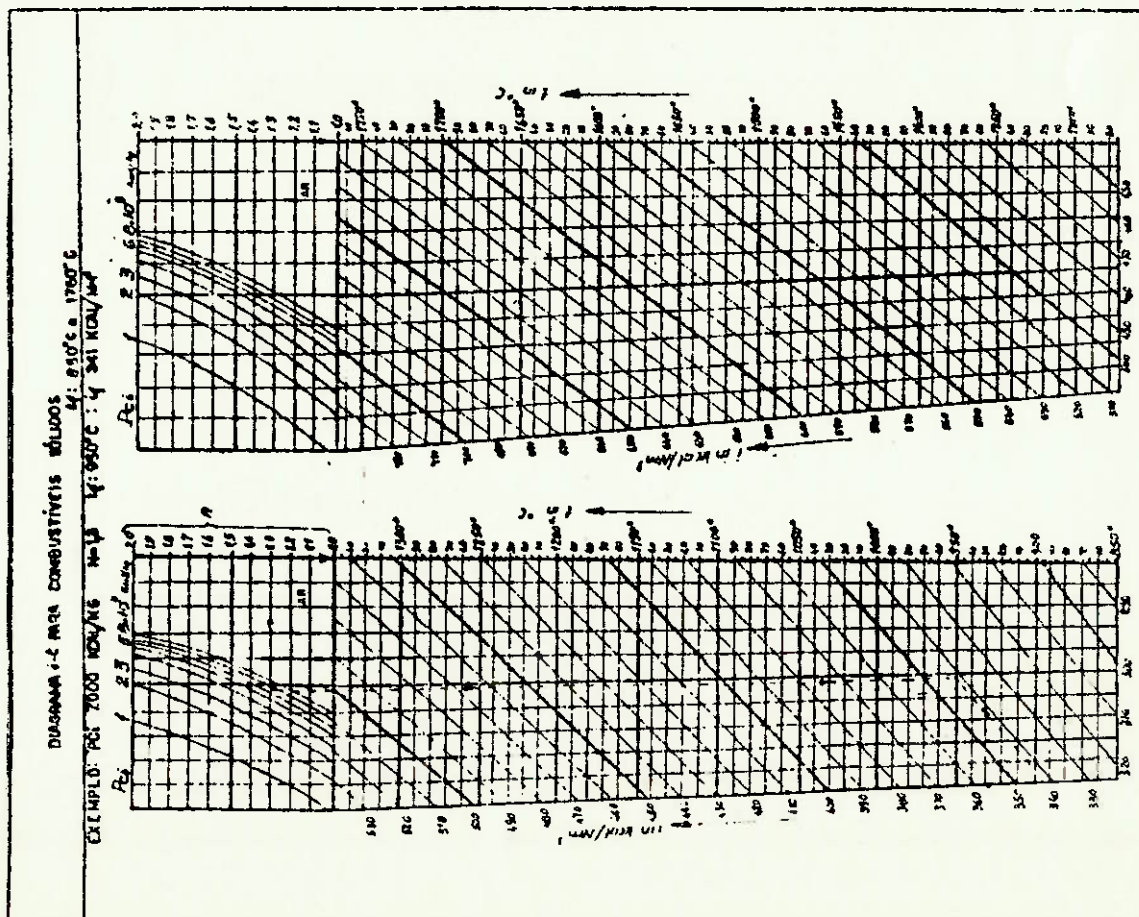
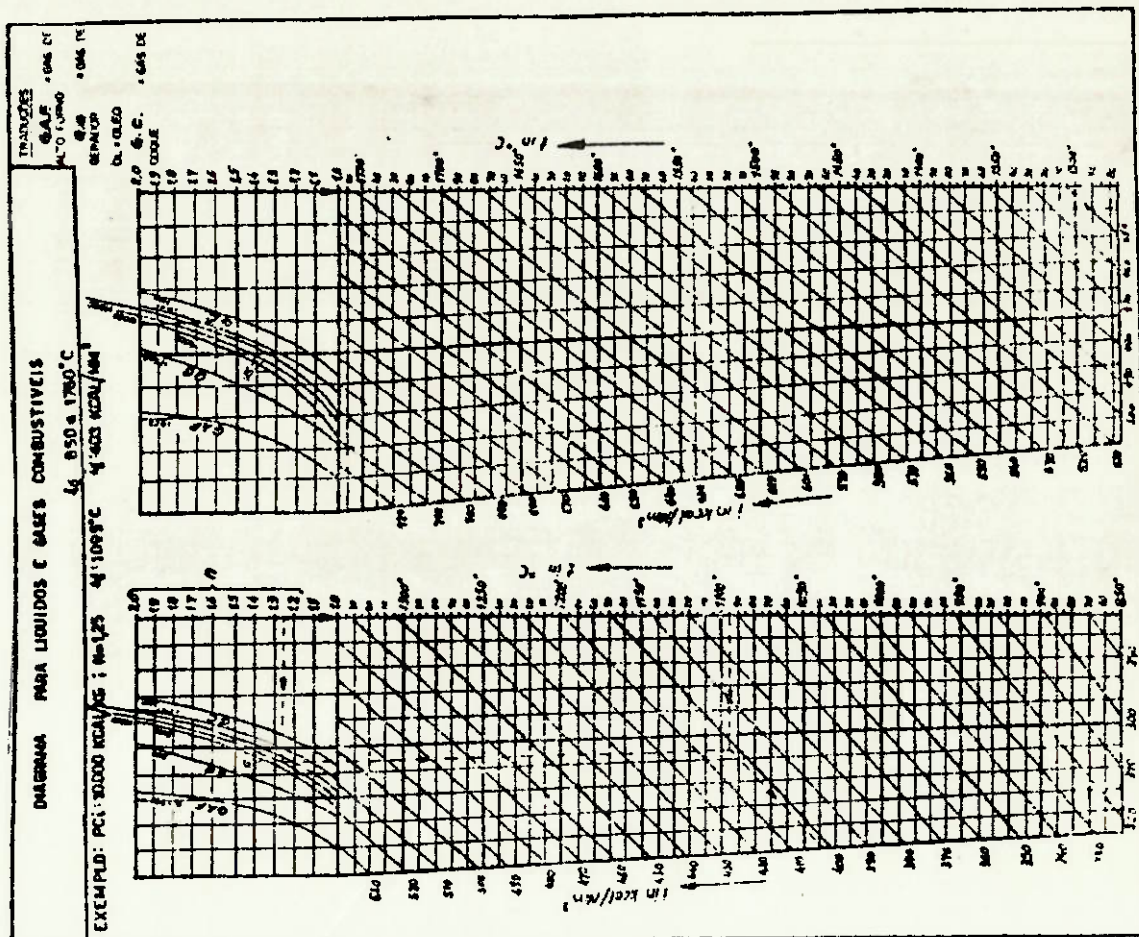
$$Q_{eco} = D(h_{l\text{sat}} - h_{l\text{110}}) = 60000 \cdot (237,4 - 110,6)$$

$$Q_{eco} = 7608000 \text{ Kcal/h}$$

calor fornecido Kcal/h	t_g, h_g °C, Kcal/Nm ³	calor absorvido Kcal/h	t_g, h_g após	saldo
42278283		câmara 15506783	960°, 350	26771500
26771500	960°, 350	superaq. 4476000	810°, 291	22295500
22295500	810°, 291	feixe conv. 10455217	450°, 155	11840283
11840283	450°, 155	economizador 7608000	165°, 55	4232283

$$h_g \text{ após} = Q_{\text{saldo}} / V_g^r$$

As temperaturas são extraídas do ábaco 3.



SUPERFÍCIES DE AQUECIMENTO

$$S = Q/K.\Delta T$$

Q = calor trocado no elemento

K = coeficiente de troca de calor; vale aproximadamente

 α_{cg} , coeficiente de troca de calor por convecção.

ΔT = diferença média de temperaturas; pode ser dada pelo
ábaco 4 ou pela equação

$$\Delta T = \frac{t_2 - t_1}{\ln t_2/t_1}$$

t_2 = diferença entre as temperaturas do gás na entrada do elemento e do fluido vaporizante neste ponto

t_1 = idem para a saída do elemento

Superaquecedor	--	<u>960</u>	-	<u>810</u>	gases
		350	-	232	fluido
		entrada		saída	

$$\begin{aligned} t_2 &= 960 - 350 = 610 \\ t_1 &= 810 - 232 = 578 \quad \Delta T = 594^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Feixe

$$\frac{.810 - 450.}{232 - 232}$$
$$t_2 = 810 - 232 = 578$$
$$t_1 = 450 - 232 = 218 \quad \Delta T = 369^\circ C$$

Economizadores

$$\frac{450 - 165}{232 - 110}$$
$$t_2 = 450 - 232 = 218$$
$$t_1 = 165 - 110 = 55 \quad \Delta T = 118^\circ C$$

Shack estabeleceu a seguinte expressão para determinação do coeficiente de transmissão para fluxo gasoso normal e externo aos tubos (válida para 5 ou mais fileiras de tubos):

$$cg = \frac{v_o^{0,654}}{d^{0,346}} \cdot (4,3 - 2,51 \cdot \frac{t}{1000}) \cdot \underbrace{1,4}_{\substack{\text{somente para distri-} \\ \text{buição quicôncia}}}$$

No feixe e no superaquecedor recomenda-se

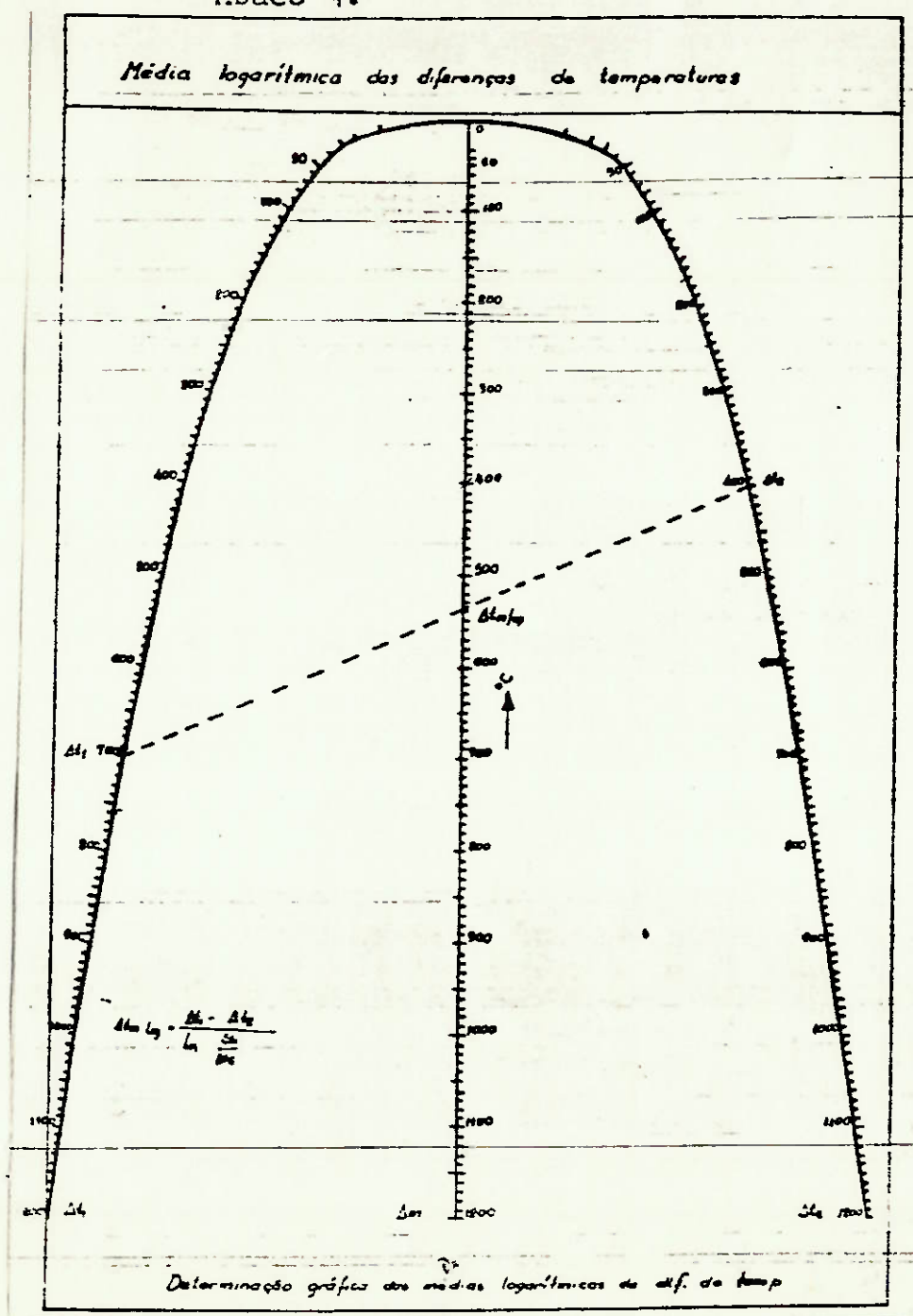
$3,0 < v_o < 3,5$: será usado $v_o = 3,25$ m/s.

Para o economizador, um valor usual é $v_o = 6$ m/s.

Além disso: $t = \frac{t_e + t_s}{2}$ (relativa ao gás).

elemento	disposição	$t_e (^{\circ}\text{C})$	$t_s (^{\circ}\text{C})$	$d(\text{m})$	$\alpha_{cg} (\text{Kcal}/\text{m}^2 \text{h}^{\circ}\text{C})$	$s(\text{m}^2)$
superaq.	paralela	960	810	0,0381	43,660	172,6
feixe	quicôncia	810	450	0,0762	43,376	653,2
econom.	quicôncia	450	165	0,0381	70,991	908,2

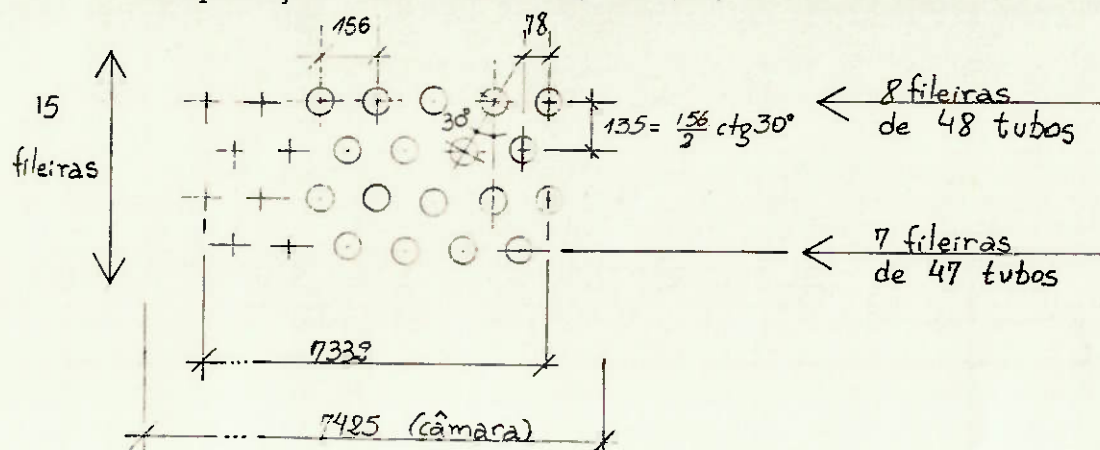
Ábaco 4.



Raios de curvatura para os tubos:

$\phi(\text{in})$	R(mm)
$1\frac{1}{2}$	75
2	100
$2\frac{1}{2}$	125
3	150

Disposição dos tubos do feixe:



$$\frac{7425}{156} = 47,6 \Rightarrow 47 \times 156 = 7332$$

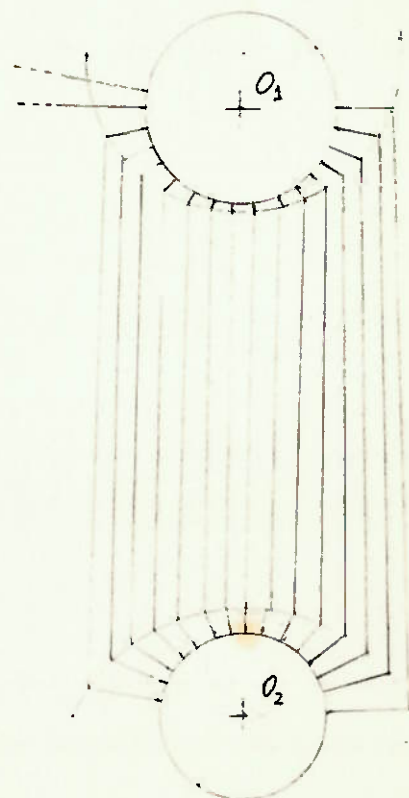
$$47.7 + 48.8 = 713 \text{ tubos}$$

Baseado no desenho em escala do feixe de convecção ($O_1 O_2 = 4000$) fez-se o cálculo da distância ideal entre os tambores:

Comprimento necessário de tubos:

$$L = A / D = 653,2 / \pi \cdot 0,076$$

$$L = 2735,783 \text{ m}$$



$$47.2900 + 2.48.2900 + 2.47.3000 + 2.48.3100 + 2.47.3250 + \\ + 2.48.3500 + 2.47.3750 + 2.48.4250 + 713x = 2735783$$

Donde $x = 476 \text{ mm}$

E a distância ideal será

$$O_1O_2 = 4000 + 476 = 4476 \text{ ou } \underline{4500 \text{ mm}}$$

SEÇÃO DE ENTRADA NO FEIXE:

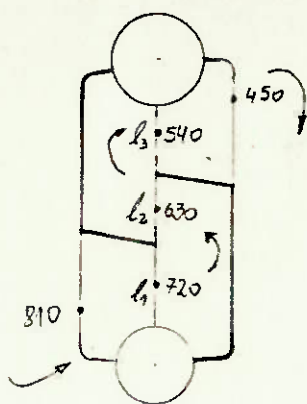
$$\text{Seção de escoamento} = h.1 = h.(7.452 - 48.0,076) = h.3,804$$

$$\text{Impondo } v_o = 3,25 \text{ m/s} = v_g^r / s_{\text{esc}} :$$

$$v_o = \frac{76490 \text{ m}^3/\text{h}}{60^2 \cdot h \cdot 3,804} = 3,25 \Rightarrow \underline{h = 1,719 \text{ m}}$$

$\frac{\text{s/h}}{\text{m}^2}$

FATORES DE PROPORÇÃO PARA AS CHICANAS:



$$f_1 = 1 + 720/273 = 3,64$$

$$f_2 = 1 + 630/273 = 3,31$$

$$f_3 = 1 + 450/273 = 2,98$$

$$\Sigma f = 9,93$$

$$f_1/f = 36,7\% \quad 1 = 1248$$

$$f_2/f = 33,3\% \quad 1 = 1132$$

$$f_3/f = 30,0\% \quad 1 = 1020$$

$$(810-450)+2=630$$

$$(810-630)+2=720$$

$$(630-450)+2=540$$

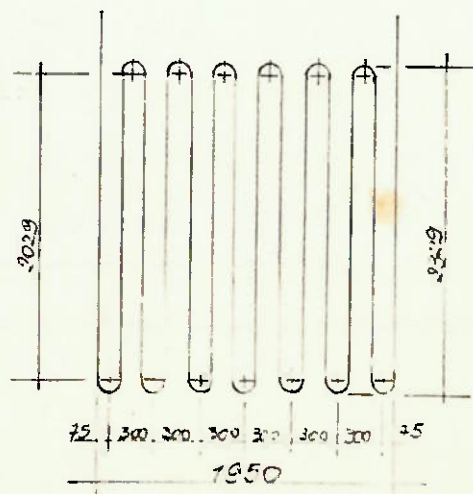
SUPERAQUECEDOR:

$$S_{\text{sup}} = 179,5 \text{ m}^2 \approx 180$$

$$S = \pi DL \Rightarrow L = 180/\pi \cdot 0,0381 = 1508,82 \text{ m} \div 47 \text{ tubos} =$$

$$= 32,0 \text{ m/tubo}; + 2,5 \text{ m/volta} = 12,8 \text{ ou } 14 \text{ voltas/tubo}$$

$$= 7 \text{ pares}$$

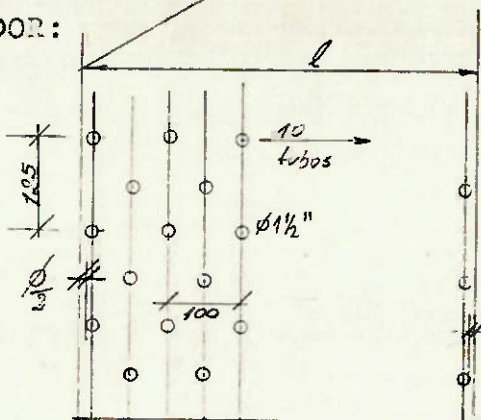




$$\frac{2 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 0,15}{4} - 1 = 2,5$$

$$l = 2,029 \text{ m}$$

ECONOMIZADOR:



Com 10 tubos:

$$l = 9 \cdot 100 + 50 + \phi$$

$$l \approx 988 \text{ mm}$$

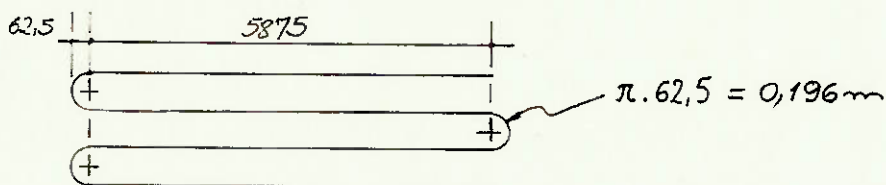
Impondo 6 m/s ($\alpha_{cg} = 70,991 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ \text{C}$):

Seção de escoamento = S_{esc}

$$S_{esc} = \frac{V^r}{3600 \cdot v_o} = \frac{76490}{3600 \cdot 6} = 3,54 \text{ m}^2$$

$$3,54 = x \cdot (0,988 - 10 \cdot 0,0381)$$

$$x = 3,54 / 0,607 = 5,83 \approx 6 \text{ m}$$



Superfície por plano de tubos = $10 \cdot (5,875 - 0,196) \cdot 0,0381$
nº de voltas

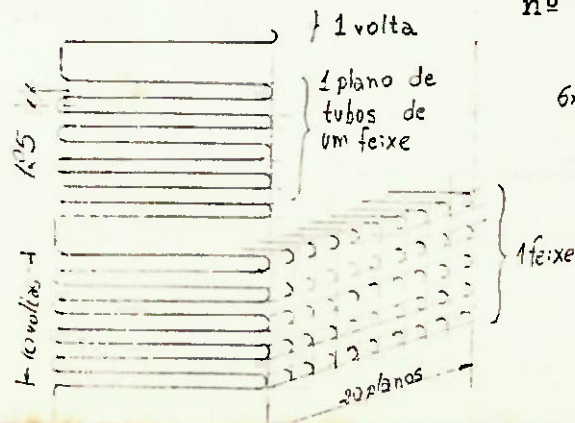
$$S_{pl} = 7,267 \text{ m}^2 \quad (\text{num feixe})$$

Número de planos de tubos necessários:

$$n_{pl_{tu}} = \frac{A_{total}}{S_{pl}} = \frac{908,2}{7,267} = 125$$

$$\text{Número de planos por feixe} = n_{pl} / fx = 20$$

$$\text{Número de feixes} = \frac{n_{\text{de planos}}}{n_{\text{de pls/feixe}}} = \frac{125}{20} = 6,25 \text{ ou } \underline{6 \text{ feixes}}$$



$$6 \times (9 \times 0,125 + 0,0625 + 0,5) = 10,125$$

altura de centro a centro:

$$125 \text{ mm}$$

espaço para limpeza:

$$500 \text{ mm}$$

$$\text{altura total} = H_{eco} = 10,125$$

ESPESSURA DOS TAMBORES:

$$e = \frac{4 \cdot \phi \cdot p}{200 \cdot f_{ef} \cdot \sigma_{rup} \cdot f_s}$$

ϕ (mm) diâmetro primitivo do tambor

p (Kgf/cm²) pressão de trabalho

f_{ef} fator de eficiência

σ_{rup} (Kgf/mm²) tensão de ruptura do material

f_s fator de solda

$$\phi_1 = 1200 \text{ mm} \quad \phi_2 = 1000 \text{ mm}$$

$$p_1 = p_2 = 29 \text{ Kgf/cm}^2$$

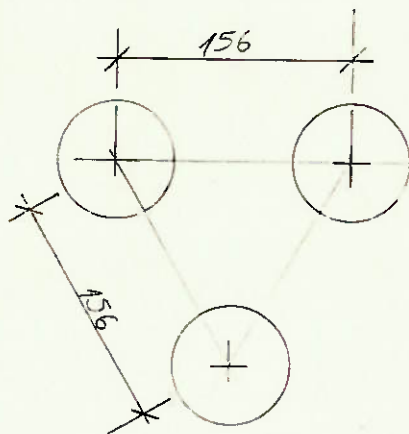
$$f_{ef} = \frac{156 - 77}{156} = 0,5$$

$$\sigma_{rup} = 38 \text{ Kgf/mm}^2 \quad (\text{astm A} - 285 \text{ gc})$$

$$f_s = 0,9$$

$$e_1 = \frac{4 \cdot 1200 \cdot 29}{200 \cdot 0,5 \cdot 38 \cdot 0,9} = 39,66 \text{ mm} = 1 \frac{1}{2}''$$

$$e_2 = \frac{4 \cdot 1000 \cdot 29}{200 \cdot 0,5 \cdot 38 \cdot 0,9} = 33,05 \text{ mm} = 1 \frac{1}{4}''$$



$$\phi_{tubo} = 76,2$$

$$\phi_{tambor} = 76,7^{+0,5}_{-0,0} \approx 77$$

4. LITERATURA CONSULTADA

- Manual da Construção de Máquinas
Dubbel, Ed. Hemus, vol. II, Instalações para a produção de vapor.
- Geradores de vapor de água (caldeiras)
Pera, Hildo, Deptº de Engª Mecânica da EPUSP, 1966
- Transterência de calor
Holman, J. P., Ed. McGraw Hill, 1983
- Fundamentos da termodinâmica clássica
Van Wilen, Gordon J. & Sonntag, Richard E.,
Ed. Edgard & Blücher, 1976