

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROJETO MECÂNICO - PMC 581

PROJETO : Caldeira para o reaproveitamento do calor sensível dos gases de escape de um motor diesel marítimo de 5000 CV de potência.

Aluno: Ricardo Aquino Perroni

No USP: 8266281

Prof^o orientador: Hildo Pera
Prof^o coordenador: Jurandir Itizo Yanagihara
Data: 04/12/92

15.2
63

A importância da ciência está no fato de levar
o Homem a conhecer a si próprio.

ÍNDICE

1) Introdução.....	01
1.1) O aproveitamento da energia.....	01
1.2) Os limites de operação.....	04
1.3) Considerações sobre o projeto.....	05
2) Justificação do projeto (verificação da necessidade).....	07
3) Dados do projeto.....	09
3.1) Especificações técnicas do projeto.....	09
3.1.1) Especificações funcionais.....	09
3.1.2) Especificações operacionais.....	09
3.1.3) Especificações construtivas.....	10
3.2) Dados do motor.....	10
3.2.1) Motor.....	10
3.2.2) Composição dos gases de escape.....	11
3.2.3) Características dos gases de escape.....	11
3.3) Escolha do tipo de caldeira.....	12
3.4) Dados complementares.....	13
3.4.1) Combustível.....	13
3.4.2) Outros.....	14
4) Cálculos.....	14
4.1) Observações.....	14
4.2) Excesso de ar.....	15
4.3) Volume dos gases.....	16
4.4) Descarga de Vapor.....	18
4.5) Determinação da área de troca de calor.....	20
4.6) Área de passagem dos gases.....	23
4.7) Metragem dos tubos.....	23
4.8) Determinação do número de seções necessárias.....	23
4.9) Verificação da seção de escoamento dos gases.....	24
4.10) Velocidade no by pass.....	24
5) Conclusão.....	24
6) Ábacos	
7) Bibliografia.....	26

1) INTRODUÇÃO

1.1) O APROVEITAMENTO DA ENERGIA

Na questão de maior eficiência, os projetistas de instalações de maquinário marítimo estão constantemente esforçando-se para extrair a maior quantidade de energia do combustível, dentro de limites ditados por considerações práticas e econômicas. Em todas as formas de propulsão marítima, uma grande quantidade de energia é perdida, principalmente pelo caminho dos gases de exaustão para a atmosfera, mas também através de sistemas de resfriamento de água para o mar. É esta energia de "calor perdido" que é potencialmente recuperável.

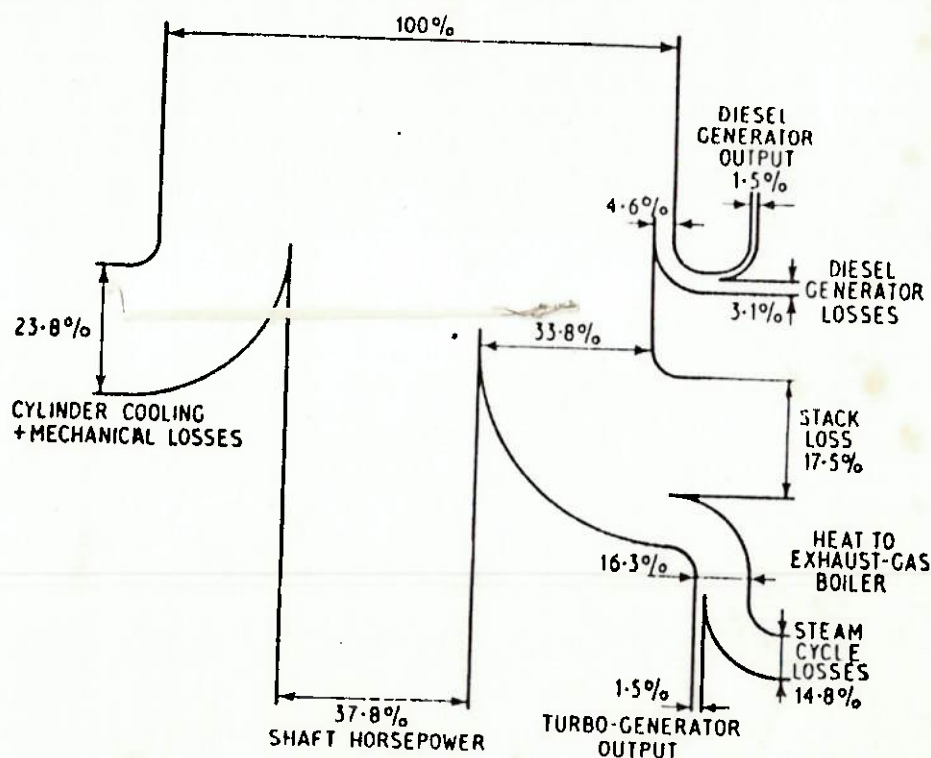


Figura 1 - Balanço de Energia

A figura 1⁽²⁾ é um típico diagrama de balanço de calor de um grande e moderno motor a óleo pesado. Pode ser notado que não mais que 40% de combustível consumido é convertido em trabalho útil através do motor. Do restante da energia liberada do combustível, por volta de 34%, equivalente a aproximadamente 90% da potência mecânica da saída, está contida nos gases de exaustão. A temperatura destes gases de exaustão estão na faixa de 220°C a 340°C no caso de baixa velocidade no motor 2 tempos, e de 370°C a 410°C para médias velocidades em motores 4 tempos, mas deve ser lembrado que o volume dos gases disponíveis de um motor 4 tempos é aproximadamente a metade dos de um motor similar de 2 tempos. Assim, o aparente aumento da quantidade de calor do motor 4 tempos não é tão acentuado quanto aparenta com referência a temperatura dos gases de exaustão.

Quando são considerados os grandes volumes de gases de exaustão disponíveis nestas temperaturas e quando é lembrado que a correspondente temperatura do vapor para a pressão de 7 Bar é 165°C, prontamente vimos reparar que a conversão do calor perdido nos gases de exaustão de um grande motor marítimo a óleo pesado para energia útil em forma de vapor de baixa pressão, é um método muito eficaz de aumentar a eficiência das máquinas.

Existe um número de fatores especiais que devem ser considerados em projetos de sistemas de recuperação de calor perdido. No projeto de uma caldeira, as condições de saída são conhecidas e o projetista tem que determinar o tamanho da caldeira e a correspondente entrada de combustível. No caso de

caldeiras de recuperação de calor, o problema é atacado na direção oposta. Aqui, a entrada do calor dos gases de exaustão é o fator conhecido e a quantidade de energia que pode ser recuperada, de um ponto de vista prático, em forma de vapor é a grandeza a ser determinada. É claro que é necessário decidir qual é o método de recuperação que melhor pode ser usado dentro da instalação tratada.

Ainda que seja teoricamente possível extrair acima de 50% do calor dos gases de exaustão, como a diferença de temperatura entre os gases e a água na caldeira torna-se pequena, a transferência de calor entre os dois torna-se um processo lento que, para ser eficiente, uma unidade recuperadora de grandes proporções seria necessária, o que não seria economicamente viável.

A figura 2(2) mostra que um incremento no calor recuperado de uma dada quantidade de gases de exaustão à temperatura constante, requer um correspondente incremento na superfície de troca de calor, que varia logaritmicamente. Assim um incremento de duas vezes na taxa de evaporação requer um aumento da superfície de troca de tres vezes a original.

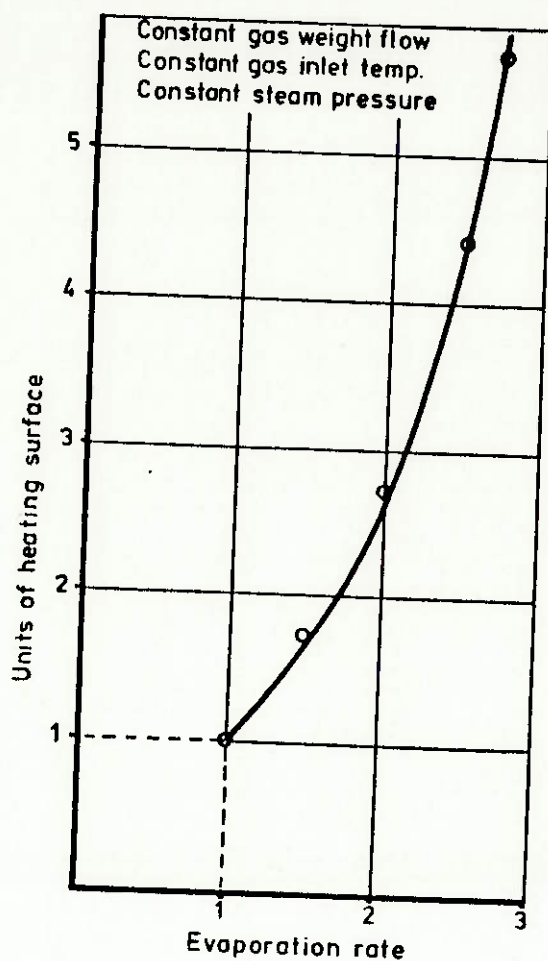


Figura 2 - Variação da superfície de troca de calor com a taxa de evaporação, para uma dada quantidade de calor.

1.2) OS LIMITES DE OPERAÇÃO

Devido ao limite de tamanho de unidades recuperadoras de calor, uma diferença de temperatura por volta de 16°C é considerada mínima.

A máxima utilização da energia dos gases de exaustão é na maioria das vezes restringida pelo perigo da baixa temperatura de corrosão do lado do gás na unidade recuperadora. Os gases

de exaustão do óleo diesel contém por volta de 5% de água, e quando o motor opera com combustível de alto teor de enxofre, produz condições ideais para a formação do ácido sulfúrico do lado do escoamento dos gases se a temperatura da superfície de troca de calor estiver abaixo do ponto de orvalho do ácido que, para aplicações práticas é 140°C . Para evitar este perigo, um projeto de temperatura de saída dos gases de 170°C é normalmente recomendado.

Está claro, portanto, que uma caldeira recuperadora de calor sensível operando a pressões abaixo de 5 bar não estará aproveitando a energia da melhor forma possível. Por outro lado, geralmente vapor acima de 7 bar, com vista a máxima quantidade de energia, pode levar a um alto custo de manutenção devido a rápida corrosão da superfície de troca de calor.

1.3) CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJETO

Este é o projeto de uma caldeira recuperadora do calor sensível de um motor diesel marítimo de 5000 CV

Um desenho esquemático de uma unidade recuperadora de calor pode ser visto na figura 3⁽³⁾. Nela temos: A) motor diesel, B) tubos de exaustão, C) caldeira recuperadora de calor, D) Donkey Boiler, E) bomba para a circulação de água, recirculando a mesma entre C e D.

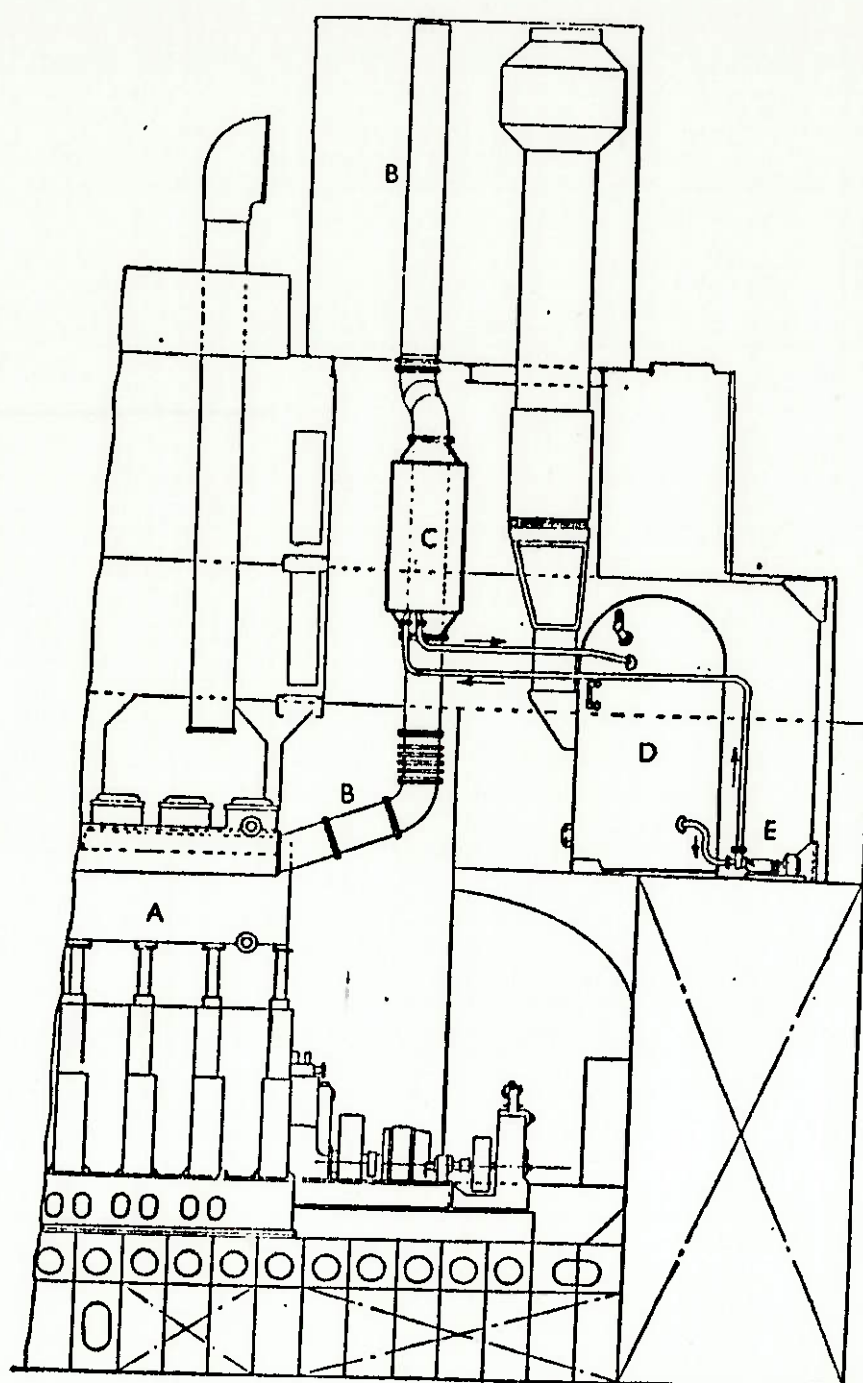


Figura 3 - Unidade marítma recuperadora de calor

Os gases que saem do motor (A), passam pela tubulação (B) e pela caldeira recuperadora (C), que é um trocador de calor que aproveita a energia contida nos gases. A caldeira auxiliar (D) recebe água a 25°C e leva a mesma ao estado de líquido saturado a $164,2^{\circ}\text{C}$. Nestas condições, parte da água já vaporizou, saindo pela parte superior da caldeira. A outra parte, líquido saturado citado acima, vai para a caldeira de recuperação onde a mesma torna-se vapor saturado a mesma temperatura.

Para fazer um uso mais eficiente do calor contido nos gases de exaustão de um motor a óleo diesel, as instalações deveriam ser projetadas para uma suficiente demanda de vapor quando o navio está no mar, tanto utilizando todo o "calor perdido" disponível como quando o motor desenvolve 80% da potência total. Ao mesmo tempo, um sistema de recuperação de calor deveria incorporar meios de aumentar e manter todo o vapor necessário, não apenas quando o navio está no mar um pouco abaixo das condições de carga total no motor, mas também quando opera em velocidades reduzidas e quando está no porto.

Este trabalho visa o dimensionamento da caldeira recuperadora representada pelo componente C.

2) JUSTIFICAÇÃO DO PROJETO (VERIFICAÇÃO DA NECESSIDADE)

Com o custo crescente dos combustíveis e o fato de que as reservas de energia primária mundiais não são inesgotáveis, o

uso de uma maior eficiência, aproveitando-se a energia perdida torna-se cada vez mais atraente.

Hoje em dia, muitos motores de navio operam com combustíveis de alta viscosidade que precisam ser aquecidos todo o tempo. É portanto, essencial que suprimentos adequados de vapor estejam sempre disponíveis. No caso de navios que têm maquinários com menor potência, há apenas calor disponível para o aquecimento do combustível do motor principal e com o propósito de aquecimentos domésticos. Dentre estes aquecimentos domésticos podemos citar: serviços de lavanderia, serviços de cozinha, aquecimento de água encanada, etc. Para navios com maior potência, contudo, torna-se ainda mais atraente, em termos econômicos, a instalação de sistemas de recuperação de calor, que são projetados para um suficiente suprimento de vapor para gerar toda a energia elétrica no mar, bem como vapor com o propósito de aquecimento.

Como vemos, uma unidade recuperadora de calor é de vital importância para a economia de energia e portanto para o aumento da eficiência das instalações motoras.

3) DADOS DO PROJETO

3.1)ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO PROJETO

3.1.1)ESPECIFICAÇÕES FUNCIONAIS

A)DESEMPENHO - A caldeira deve satisfazer as seguintes especificações, quando o motor estiver desenvolvendo a potência máxima:

- Qualidade do vapor: saturado seco
- Pressão Absoluta de vapor : 7 bar (portanto $T = 164,2^{\circ}\text{C}$)

Esta caldeira deve apresentar uma eficiência elevada .

B)SEGURANÇA - A instalação deve possuir segurança absoluta, pois acidentes em embarcações marítimas podem ter consequências desastrosas.

3.1.2)ESPECIFICAÇÕES OPERACIONAIS

A)DURABILIDADE - O equipamento recuperador de calor sensível deve apresentar uma vida útil de 5 anos. Deve portanto ser

evitada a formação de ácido sulfúrico nos gases de exaustão, pois o mesmo é altamente corrosivo.

B)MANUTENÇÃO - A instalação deve apresentar razoável facilidade de manutenção.

3.1.3)ESPECIFICAÇÕES CONSTRUTIVAS

A)DIMENSÕES - Devido a grande importância do espaço em embarcações marítimas, a caldeira deve ocupar o menor espaço possível. A mesma não deve ultrapassar os limites de 4 metros de altura numa área de 2,5 x 5 m².

B)PESO - A caldeira deve apresentar um peso bem menor do que as caldeiras convencionais estacionárias.

3.2)DADOS DO MOTOR

3.2.1)MOTOR (*)

- Motor Díesel Marítimo Ishibras-Sulzer
- 2 tempos
- Potência de 5000CV a 150 rpm

3.2.2) COMPOSIÇÃO DOS GASES DE ESCAPE

PRODUTOS	REGIMES		UNIDADE
	75%	100%	
CO ₂	4,0.....	7.....	% vol
O ₂	14,0.....	10.....	% vol
CO.....	Entre 0.05 e 0.3.....		% vol
NO ₂	800.....	450.....	cm ³ /cm ³
N ₂	77,0.....	77,0.....	% vol
H ₂ O.....	5,0.....	5,0.....	% vol
Hidrocarbonetos.....	0,02.....	0.02.....	% vol
Aldeídos.....	20,0.....	20,0.....	cm ³ /cm ³

3.2.3) CARACTERÍSTICAS DOS GASES DE ESCAPE

CARGA	POTÊNCIA(CV)	VAZÃO DE GÁS(Kg/s)	TEMP.(°C)
50%	2500	7,65	240
75%	3750	8,87	280
100%	5000	10,42	310

(*) Informações retiradas da bibliografia (1)

3.3)ESCOLHA DO TIPO DA CALDEIRA (SÍNTESE DE SOLUÇÕES)

Basicamente, existem 3 tipos de recuperadores marítimos de calor comumente usados:

(A) - tipo tubo de fumaça - Este tipo corresponde aquele no qual os gases de combustão escoam dentro dos tubos.

(B) - tipo tubo de água enrolado - Neste caso é a água que circula dentro de tubos. Estes tubos, porém são enrolados formando sucessivas espirais.

(C) - tipo tubo de água reto aletado - Neste caso os tubos de água são retos, e possuem aletas para melhorar a troca de calor dos gases de combustão com a água.

Abaixo expõe-se tabela comparativa dos tipos possíveis:

FUNÇÕES	ALTERNATIVAS		
	A	B	C
rendimento	baixo	alto	alto
compactação	má	boa	boa
custo inicial	baixo	médio	alto(aletas)
pressão de trabalho	baixa	alta	alta
manutenção	barata	cara	cara
partida	lenta	rápida	rápida
tratamento de água	não	sim	sim

A alternativa escolhida é a B (tipo tubo de água enrolado), pois possui alto rendimento, boa compactação, e um custo inicial menor que a de tubos retos, já que estes possuem tubos aletados.

Uma seção reta desta caldeira, mostrando a sua forma geométrica, pode ser vista na figura 4(2).

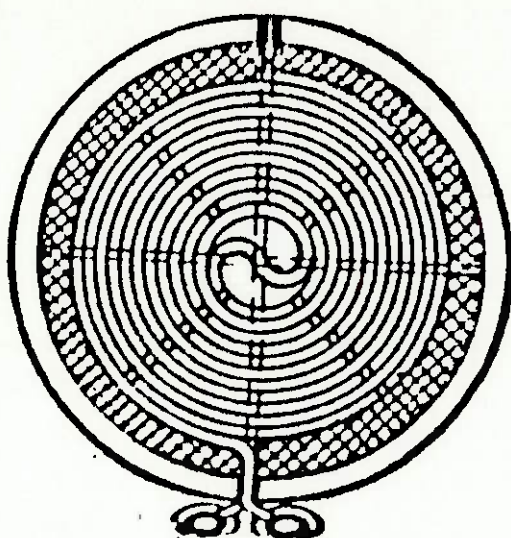


Figura 4 - Forma geométrica dos tubos.

3.4) DADOS COMPLEMENTARES

3.4.1) COMBUSTÍVEL (1)

- ÓLEO DÍESEL

Composição: C.....85,55%
H₂.....12,75%
S.....0,85%

Densidade: 0,858 g/l

Poder Calorífico:

Superior(PCS).....10921 kcal/Kg

Inferior(PCI).....10259 kcal/Kg

3.4.2) OUTROS

Temperatura Ambiente: 20°C

Temp. da água de alimentação: 164,2°C

OBS.: Os demais dados necessários encontram-se nas tabelas e diagramas dos apêndices, que serão mencionados quando algum de seus dados forem utilizados.

4) CÁLCULOS

4.1) OBSERVAÇÕES

Por se tratar de uma caldeira recuperadora de calor, muitos componentes típicos de uma caldeira normal não estão presentes, não serão portanto dimensionados. Dentre estes componentes está a fornalha, que não é necessária para a "geração de calor", visto que o mesmo estará sendo gerado pelo

motor diesel. Portanto, a transferência de calor por radiação não será levada em conta.

Como não há combustão nesta caldeira não existe a necessidade de pré-aquecedor de ar. Além disso, como a disponibilidade de calor é pequena, não haverá superaquecedor, sendo produzido apenas vapor saturado seco.

Por último, expõe-se que não haverá economizador nesta caldeira.

Para efeito de dimensionamento, será considerada a carga máxima de um motor diesel, supondo-se que em cargas menores, o calor faltante será suprido pela caldeira auxiliar conforme explicado na introdução deste trabalho.

4.2) EXCESSO DE AR

Como temos a composição do combustível e a composição dos gases de escape (porcentagem de CO_2 medida), calcularemos o excesso de ar conforme abaixo:

Volume de ar teórico:

$$V_{art} = 8,876c + 26.47(h - o/8) + 3,32s$$

$$V_{art} = 11,25 \text{ Nm}^3/\text{Kg comb}$$

Volume de gases teórico secos:

$$V_g^{ts} = 1.8535c + 0.693s + 0,79V_{art} + 0,8n$$

$$V_g^{ts} = 10,53 \text{ Nm}^3/\text{Kg comb}$$

$$(CO_2)_{\max} = \frac{1,8535c}{V_{gts}} = 0,151$$

$$n = \frac{(CO_2)_{\max}}{(CO_2)_{\text{med}}} = 2,157 \text{ (115,7\% de excesso de ar)}$$

O excesso de ar é alto por estarmos tratando de um motor diesel.

4.3)VOLUME DOS GASES

Como os gases de escape são uma mistura de outros gases, utilizaremos a regra de Kay (vide referência 4) para calcularmos a densidade e verificarmos a sua proximidade do gás perfeito. De ante mão, já podemos esperar que a densidade seja próxima da do ar, pois o excesso do mesmo calculado no item anterior, é alto.

- A - CO_2 - 7%
- B - O_2 - 10%
- C - CO - 0,2%
- D - N_2 - 77%
- E - H_2O - 5%

Do ábaco 3, tiramos as temperaturas e pressões críticas:

$T_{cA} = 304,2 \text{ K}$	$P_{cA} = 72,9 \text{ atm}$
$T_{cB} = 154,8 \text{ K}$	$P_{cB} = 50,1 \text{ atm}$
$T_{cC} = 133,0 \text{ K}$	$P_{cC} = 34,5 \text{ atm}$
$T_{cD} = 126,2 \text{ K}$	$P_{cD} = 33,5 \text{ atm}$
$T_{cE} = 647,4 \text{ K}$	$P_{cE} = 218,3 \text{ atm}$

Pela Regra de Kay:

$$T_{cm} = \sum y_i T_{ci}$$

$$T_{cm} = 166,58 \text{ K}$$

$$P_{cm} = \sum y_i P_{ci}$$

$$P_{cm} = 46,89 \text{ atm}$$

$$T = \frac{240 + 170}{2} = 205^\circ \text{ C} = 478 \text{ K}$$

As pressões e temperaturas médias reduzidas são:

$$T_{rm} = \frac{T}{T_{cm}} = \frac{478}{166,58} = 2,868$$

$$P_{rm} = \frac{P}{P_{cm}} = \frac{1}{46,9} = 0,0213$$

Do diagrama generalizado de compressibilidade, temos:

$$Z = 1 \text{ (gás perfeito)}$$

Calculando a constante dos gases:

$$R = \frac{R}{M} = \frac{8314}{28,8} = 289 \text{ KJ/Kg K}$$

onde a massa molar média:

$$M = 0,07(44) + 0,1(32) + 0,002(28) + 0,05(18) + 0,77(28) = 28,8$$

Densidade:

$$\text{dens} = \frac{P}{RT} = \frac{101000}{289(513)} = 0,681 \text{ Kg/m}^3$$

O volume dos gases será:

$$V_g = \frac{m}{\text{dens}} = \frac{10,42}{0,681} = 15,30 \text{ m}^3/\text{s}$$

ou volume nas condições normais:

$$V_g = 10,09 \text{ Nm}^3/\text{s}$$

$$V_g = 36351 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

4.4) DESCARGA DE VAPOR

Como se trata de uma mistura, temos que calcular o calor específico médio.

Para o CO_2 e o H_2O utilizaremos a fórmula:

$$C_p = (9,15 + 0,055(T))/M$$

Para o O_2 , N_2 e CO utilizaremos:

$$C_p = (6,95 + 0,00106(T))/M$$

$$\text{CO}_2 \dots \dots \dots M = 44$$

$$T = 310^\circ\text{C} \Rightarrow C_p = 0,595$$

$$T = 220^\circ\text{C} \Rightarrow C_p = 0,483$$

$$C_{pm} = \frac{0,595 + 0,483}{2} = 0,539 \text{ Kcal/Nm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{O}_2 \dots \dots \dots M = 32$$

$$T = 310^{\circ}\text{C} \Rightarrow C_p = 0,227$$

$$T = 220^{\circ}\text{C} \Rightarrow C_p = 0,224$$

$$C_{pm} = \frac{0,227 + 0,224}{2} = 0,226 \text{ Kcal/Nm}^3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{N}_2 \dots \dots \dots M = 28$$

$$T = 310^{\circ}\text{C} \Rightarrow C_p = 0,258$$

$$T = 220^{\circ}\text{C} \Rightarrow C_p = 0,256$$

$$C_{pm} = \frac{0,258 + 0,256}{2} = 0,257 \text{ Kcal/Nm}^3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{CO} \dots \dots \dots M = 28$$

$$\text{Como o } \text{N}_2, C_{pm} = 0,257 \text{ Kcal/Nm}^3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\text{H}_2\text{O} \dots \dots \dots M = 18$$

$$T = 310^{\circ}\text{C} \Rightarrow C_p = 1,456$$

$$T = 220^{\circ}\text{C} \Rightarrow C_p = 1,181$$

$$C_{pm} = \frac{1,456 + 1,181}{2} = 1,318 \text{ Kcal/Nm}^3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Calor específico da mistura:

$$\begin{aligned} C_{pm} &= 0,07(0,539) + 0,1(0,226) + 0,002(0,257) + \\ &\quad 0,77(0,257) + 0,05(1,318) = \\ &= 0,325 \text{ Kcal/Nm}^3 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Calor disponível:

$$\begin{aligned} Q &= V_{gru}(C_p)(t_e - t_s) \\ &= 36351(0,325)(310 - 220) = \\ &= 1063260 \text{ Kcal/h} \end{aligned}$$

A entalpia de vapor d'água a 164,2°C e a da água a 25°C, tiramos do ábaco 1:

$$h_v = 659,5 \text{ Kcal/Kg}$$

$$h_{lv} = 493,9 \text{ Kcal/Kg}$$

$$h_a = 25,02 \text{ Kcal/kg (valor aproximado pela entalpia do líquido saturado à mesma temperatura)}$$

Descarga de vapor:

$$D = \frac{Q}{h_{lv}} = \frac{1026260}{(493,9)} = 2152,8 \text{ Kg/h}$$

4.5) DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE TROCA DE CALOR

Primeiramente, vamos calcular o coeficiente de troca de calor por convecção dos gases de escape (hg).

Pré-cálculo do diâmetro da tubulação:

Escoamento da água líquida:

Admitindo a velocidade de 2,5 m/s para a água,

$$A_1 = \frac{D(ft)}{(3600) \text{dens}(2,5)} = \frac{2152,8(6)}{3600(909)2,5} = 0,001578 \text{ m}^2$$

$$d = 0,0255 \text{ m}$$

onde (ft) é o fator de circulação, que foi adotado o valor 6, de acordo com a bibliografia 1.

Adotaremos tubos de 1(1/2)", com diam. interno = 32 mm.

$$A2 = \frac{(0,032)^2 (PI)}{4} = 0,000804 \text{ m}^2$$

Determinação do número de tubos:

$$n = \frac{A1}{A2} = \frac{0,001578}{0,000804} = 1,96 \quad (\text{portanto 2 tubos})$$

Vamos admitir, para os gases de escape do motor:

$$V = 16,5 \text{ m/s}$$

Do ábaco 4, tiramos:

$$\text{visc} = 40 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Número de Reynolds:

$$\text{Re} = \frac{VD}{\text{visc}} = \frac{16,5(0,0381)}{40 \times 10^{-6}} = 15675$$

Adotaremos a fórmula empírica:

$$h = 0,284 \text{ fa fb Re}^{0,61} \text{ K/d}$$

onde:

$$\text{fb} = 1 \text{ (mais de dez tubos)}$$

$$\text{Do ábaco 5: } K = 0,030 \text{ Kcal/m}^{\circ}\text{C}$$

Do ábaco 6:

$$\text{com } \text{ei/d} = 65/38 = 1,71$$

$$\text{et/d} = 75/38 = 1,97$$

$$\text{tiramos } \text{fa} = 1,03$$

Coefficiente de convecção:

$$\text{hg} = 83,7 \text{ Kcal/m}^2\text{C.h}$$

Para o coeficiente de troca de calor por convecção para a água será adotado o valor usual $10000 \text{ Kcal/m}^2\text{C.h}$

Embora seja desprezível a condução de calor pelas paredes do tubo, adotaremos:

$$\text{cond} = 39 \text{ Kcal/m}^{\circ}\text{C.h}$$

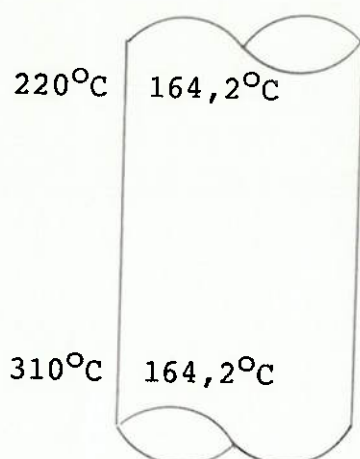
$$\text{esp} = 0,007 \text{ m}$$

Coefficiente global de convecção:

$$U = \frac{1}{1/h_g + 1/h_a + e/\text{cond}} = 82,3 \text{ Kcal/m}^2\text{C.h}$$

Diferença média logaritmica de temperatura:

$$\Delta(T) = \frac{(t_1 - t_1') - (t_2 - t_2')}{\ln \frac{t_1 - t_1'}{t_2 - t_2'}}$$



$$\Delta(T) = \frac{(310 - 164,2) - (220 - 164,2)}{\ln \frac{310 - 164,2}{220 - 164,2}} = 93,9^{\circ}\text{C}$$

Área de troca de calor:

$$S = \frac{Q}{U(\Delta(T))} = \frac{1063260}{(82,3)(93,9)} = 137,6 \text{ m}^2$$

4.6) ÁREA DE PASSAGEM DOS GASES

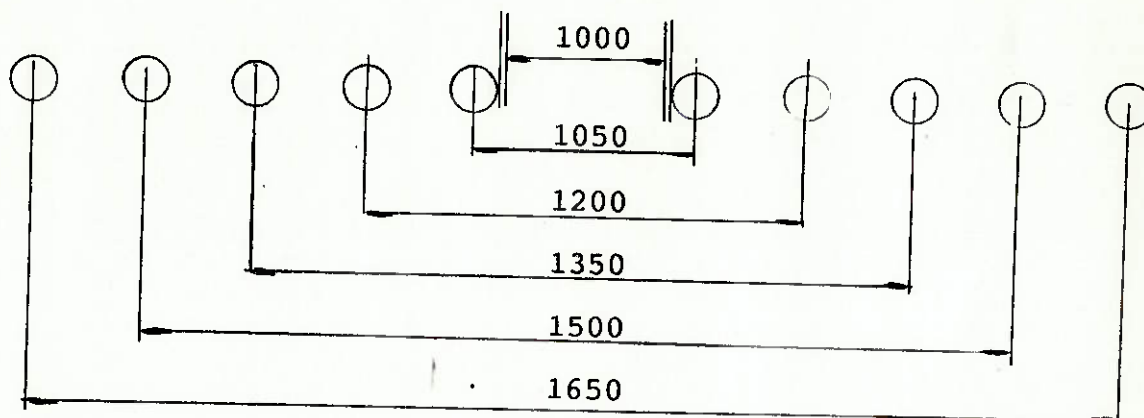
Adotando uma velocidade de 18,0 m/s, temos:

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{15,30}{18,0} = 0,85 \text{ m}^2$$

4.7) METRAGEM DOS TUBOS

Portanto a metragem de tubos necessária para a transferência de calor será:

$$L = \frac{137,6}{0,038(\text{PI})} = 1153 \text{ m}$$



Para a facilidade dos cálculos, vamos aproximar a espiral por circunferências concêntricas, visto que este cálculo leva a pequenos erros.

4.8) DETERMINAÇÃO DO NÚMERO DE SEÇÕES NECESSÁRIAS

O comprimento de cada seção será:

$$L = (D1 + D2 + D3 + D4 + D5) * (\text{PI})$$

$$L = 21,2 \text{ m}$$

Logo o número de seções será:

$$N = \frac{1153}{21,2} = 54 \text{ seções}$$

4.9) VERIFICAÇÃO DA SEÇÃO DE ESCOAMENTO DOS GASES

$A = (\text{área total}) - (\text{área ocupada pelos tubos})$

$$A = (1,736^2 - 1,012^2)(\pi)/4 - 21,2(0,038) = 0,8314 \text{ m}^2$$

Este valor obtido está de acordo com o obtido no item 4.6.

4.10) VELOCIDADE NO BY PASS

Como a passagem possui 1 metro de diâmetro, a área de escoamento terá 0,79 m²

Portanto,

$$V = \frac{15,30}{0,79} = 19,4 \text{ m/s}$$

Este valor é compatível com o sistema.

5) CONCLUSÃO

Devido ao crescente custo da energia, já citado no início deste trabalho, deve-se procurar cada vez mais aumentar a eficiência dos equipamentos. Para isto, deve-se aproveitar ao máximo a energia disponível, não desperdiçando-a para o ambiente.

O equipamento proposto pode representar uma significativa economia de combustível, a um custo razoavelmente baixo. Neste contexto, este trabalho vem

demonstrar sua importância, pois deve-se investir cada vez mais na área de recuperação de calor , a fim de minimizarmos os efeitos da crise energética que nos acompanhará ainda por muito tempo.

Vapor de água saturado

Pressão (absoluta)	Tempe- ratura de va- poriza- ção	Volume específico		Entalpia específica			Entropia específica	
		do líquido saturado	do vapor saturado	do líquido saturado	acrécimo na vapori- zação	do vapor saturado	do líquido saturado	do vapor saturado
P	t _v	v _l	v _v	h _l	h _{l v}	h _v	s _l	s _v
kgf/cm ²	°C	m ³ /kg	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/ kg°K	kcal/ kg°K
0,01	6,7	0,0010	131,6	6,7	593,3	600,2	0,0243	2,1450
0,02	17,2	0,0010	68,27	17,2	587,6	604,8	0,0612	2,0848
0,03	23,8	0,0010	46,53	23,8	583,9	607,7	0,0835	2,0499
0,04	28,6	0,0010	35,46	28,7	581,1	609,8	0,0998	2,0253
0,05	32,8	0,0010	28,73	32,5	579,0	611,5	0,1126	2,0063
0,06	35,8	0,0010	24,19	35,8	577,1	612,9	0,1232	1,9908
0,07	38,7	0,0010	20,92	38,6	575,5	614,1	0,1323	1,9778
0,08	41,2	0,0010	18,45	41,1	574,1	615,2	0,1403	1,9665
0,09	43,4	0,0010	16,51	43,4	572,7	616,1	0,1474	1,9566
0,10	45,5	0,0010	14,95	45,4	571,6	617,0	0,1538	1,9478
0,15	53,6	0,0010	10,21	53,5	566,9	620,4	0,1790	1,9139
0,20	59,7	0,0010	7,794	59,6	563,4	623,0	0,1974	1,8899
0,25	64,6	0,0010	6,321	64,5	560,5	625,0	0,2119	1,8715
0,30	68,7	0,0010	5,328	68,6	558,0	626,6	0,2241	1,8564
0,40	75,4	0,0010	4,068	75,4	553,9	629,3	0,2436	1,8328
0,50	80,9	0,0010	3,301	80,8	550,7	631,5	0,2591	1,8145
0,60	85,5	0,0010	2,782	85,4	547,9	633,3	0,2720	1,7996
0,70	89,5	0,0010	2,408	89,4	545,4	634,8	0,2832	1,7871
0,80	93,0	0,0010	2,125	93,0	543,2	636,2	0,2929	1,7762
0,90	96,2	0,0010	1,904	96,2	541,2	637,4	0,3017	1,7667
0,95	97,7	0,0010	1,810	97,7	540,2	637,9	0,3057	1,7623
1,0	99,1	0,0010	1,725	99,1	539,3	638,4	0,3095	1,7582
1,1	101,8	0,0010	1,578	101,8	537,6	639,4	0,3167	1,7504
1,2	104,3	0,0010	1,454	104,3	530,0	640,3	0,3234	1,7434
1,3	106,6	0,0010	1,349	106,7	534,5	641,2	0,3296	1,7370
1,4	108,7	0,0011	1,259	108,9	533,0	641,9	0,3353	1,7310
1,5	110,8	0,0011	1,180	110,9	531,8	642,7	0,3407	1,7255
1,6	112,7	0,0011	1,111	112,9	530,5	643,4	0,3458	1,7203
1,7	114,6	0,0011	1,050	114,8	529,2	644,0	0,3506	1,7154
1,8	116,3	0,0011	0,9950	116,6	528,0	644,6	0,3552	1,7109
1,9	118,0	0,0011	0,9459	118,3	526,9	645,2	0,3596	1,7065
2,0	119,6	0,0011	0,9015	119,9	525,9	645,8	0,3637	1,7024
2,1	121,2	0,0011	0,8612	121,4	524,9	646,3	0,3677	1,6985
2,2	122,6	0,0011	0,8245	122,9	523,9	646,8	0,3715	1,6948
2,3	124,1	0,0011	0,7909	124,4	522,9	647,3	0,3752	1,6913
2,4	125,5	0,0011	0,7600	125,8	522,0	647,8	0,3787	1,6879
2,5	126,8	0,0011	0,7315	127,2	521,0	648,2	0,3821	1,6846
2,6	128,1	0,0011	0,7051	128,5	520,1	648,6	0,3854	1,6815
2,7	129,3	0,0011	0,6805	129,8	519,2	649,0	0,3885	1,6785
2,8	130,6	0,0011	0,6577	131,0	518,4	649,4	0,3916	1,6756
2,9	131,7	0,0011	0,6365	132,2	517,6	649,8	0,3946	1,6728
3,0	132,9	0,0011	0,6165	133,4	516,8	650,2	0,3975	1,6701
3,1	134,0	0,0011	0,5979	134,5	516,1	650,6	0,4002	1,6675
3,2	135,1	0,0011	0,5803	135,6	515,3	650,9	0,4030	1,6650
3,3	136,1	0,0011	0,5638	136,7	514,6	651,3	0,4056	1,6625
3,4	137,2	0,0011	0,5482	137,8	513,8	651,6	0,4082	1,6601

Abaco 1.0

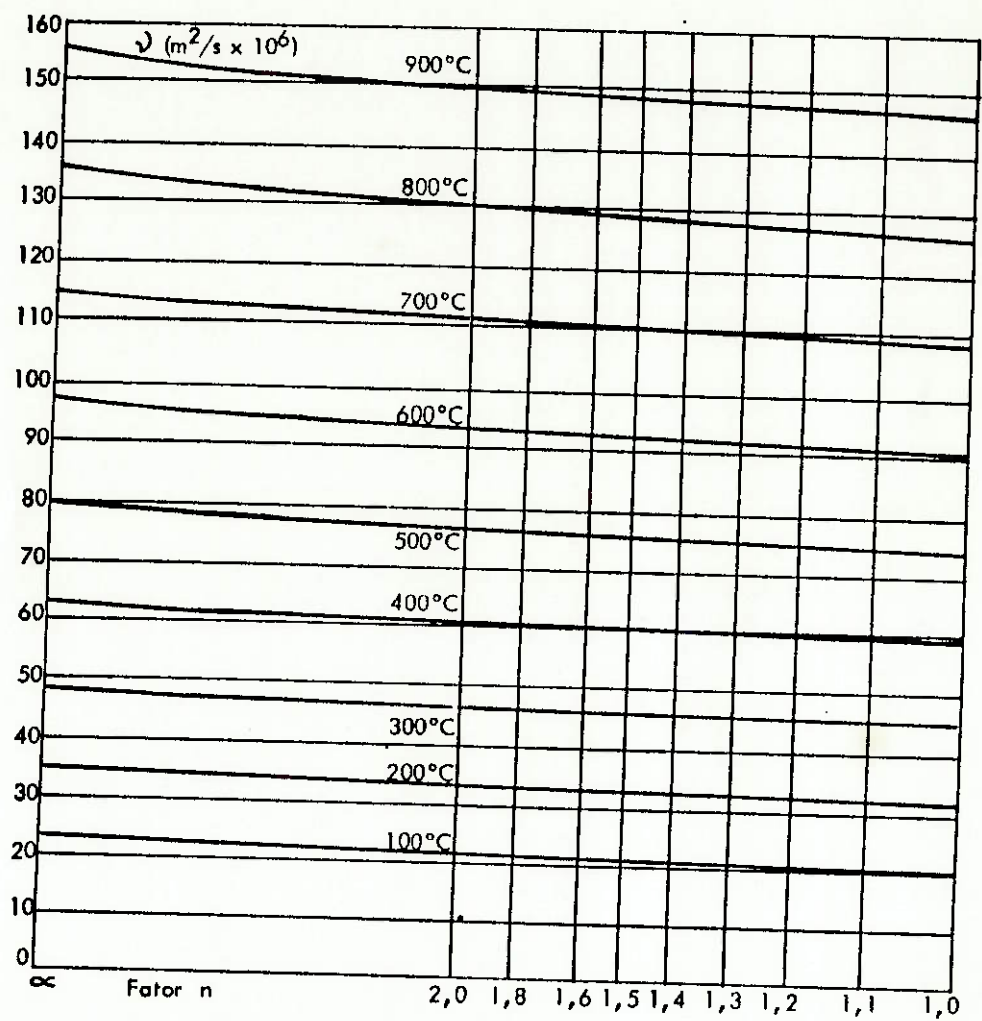
Pressão (absoluta)	Tempe- ratura de va- poriza- ção	Volume específico		Entalpia específica			Entropia específica	
		do líquido saturado	do vapor saturado	do líquido saturado	acréscimo na vapori- zação	do vapor saturado	do líquido saturado	do vapor saturado
P	t _v	v _l	v _v	h _l	h _{l v}	h _v	s _l	s _v
kgf/cm ²	°C	m ³ /kg	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/ kg°K	kcal/ kg°K
3,5	138,2	0,0011	0,5335	138,8	513,1	651,9	0,4107	1,8376
3,6	139,2	0,0011	0,5196	139,8	512,4	652,2	0,4132	1,8334
3,7	140,2	0,0011	0,5064	140,8	511,7	652,5	0,4156	1,8334
3,8	141,1	0,0011	0,4939	141,8	511,0	652,8	0,4179	1,8313
3,9	142,0	0,0011	0,4820	142,7	510,4	653,1	0,4202	1,8493
4,0	142,9	0,0011	0,4706	143,6	509,8	653,4	0,4224	1,8473
4,1	143,8	0,0011	0,4599	144,6	509,1	653,7	0,4246	1,8453
4,2	144,7	0,0011	0,4496	145,5	508,4	653,9	0,4267	1,8434
4,3	145,5	0,0011	0,4397	146,3	507,9	654,2	0,4288	1,8419
4,4	146,4	0,0011	0,4303	147,2	507,2	654,4	0,4309	1,8397
4,5	147,2	0,0011	0,4213	148,0	506,7	654,7	0,4329	1,8379
4,6	148,0	0,0011	0,4127	148,9	506,0	654,9	0,4349	1,8362
4,7	148,8	0,0011	0,4044	149,7	505,5	655,2	0,4368	1,8345
4,8	149,6	0,0011	0,3965	150,5	504,9	655,4	0,4387	1,8328
4,9	150,4	0,0011	0,3889	151,3	504,3	655,6	0,4406	1,8312
5,0	151,1	0,0011	0,3816	152,1	503,8	655,9	0,4424	1,8293
6,0	158,1	0,0011	0,3213	159,3	498,6	657,9	0,4592	1,8131
7,0	164,2	0,0011	0,2778	165,6	493,9	659,5	0,4737	1,8028
8,0	169,6	0,0011	0,2448	171,3	489,6	660,9	0,4865	1,7921
9,0	174,5	0,0011	0,2189	176,4	485,7	662,1	0,4980	1,7827
10,0	179,0	0,0011	0,1980	181,2	482,0	663,2	0,5085	1,7742
11,0	183,2	0,0011	0,1808	185,5	478,6	664,1	0,5181	1,7665
12,0	187,1	0,0011	0,1664	189,7	475,2	664,9	0,5270	1,7594
13,0	190,7	0,0011	0,1541	193,5	472,1	665,6	0,5353	1,7528
14,0	194,1	0,0011	0,1435	197,2	469,1	666,3	0,5431	1,7467
15,0	197,4	0,0012	0,1343	200,6	466,2	666,8	0,5504	1,7409
16,0	200,4	0,0012	0,1262	203,9	463,4	667,3	0,5573	1,7355
17,0	203,4	0,0012	0,1190	207,1	460,7	667,8	0,5639	1,7304
18,0	206,1	0,0012	0,1125	210,1	458,1	668,2	0,5701	1,7256
19,0	208,8	0,0012	0,1068	213,0	455,5	668,5	0,5761	1,7209
20,0	211,4	0,0012	0,1016	215,8	453,0	668,8	0,5818	1,7163
21,0	213,9	0,0012	0,0968	218,5	450,6	669,1	0,5873	1,7122
22,0	216,2	0,0012	0,0925	221,1	448,2	669,3	0,5926	1,7082
23,0	218,5	0,0012	0,0885	223,6	445,9	669,5	0,5977	1,7042
24,0	220,8	0,0012	0,0849	226,1	443,5	669,6	0,6027	1,7003
25,0	222,9	0,0012	0,0815	228,4	441,4	669,8	0,6074	1,6968
26,0	225,0	0,0012	0,0784	230,8	439,1	669,9	0,6120	1,6932
27,0	227,0	0,0012	0,0755	233,0	437,0	670,0	0,6165	1,6898
28,0	229,0	0,0012	0,0729	235,2	434,8	670,0	0,6208	1,6863
29,0	230,9	0,0012	0,0703	237,4	432,7	670,1	0,6250	1,6832
30,0	232,8	0,0012	0,0680	239,5	430,6	670,1	0,6291	1,6801
31,0	234,6	0,0012	0,0658	241,5	428,6	670,1	0,6331	1,6770
32,0	236,4	0,0012	0,0637	243,5	426,6	670,1	0,6370	1,6740
33,0	238,1	0,0012	0,0618	245,5	424,6	670,1	0,6408	1,6710
34,0	239,8	0,0012	0,0609	247,4	422,6	670,0	0,6445	1,6682
35,0	241,4	0,0012	0,0582	249,3	420,6	669,9	0,6481	1,6653
36,0	243,0	0,0012	0,0565	251,1	418,8	669,9	0,6516	1,6626
37,0	244,0	0,0012	0,0550	253,0	416,8	669,8	0,6551	1,6599
38,0	246,2	0,0012	0,0535	254,7	415,0	669,7	0,6585	1,6573
39,0	247,7	0,0012	0,0521	256,5	413,1	669,6	0,6619	1,6547

Abaco 1.b

Constantes críticas*

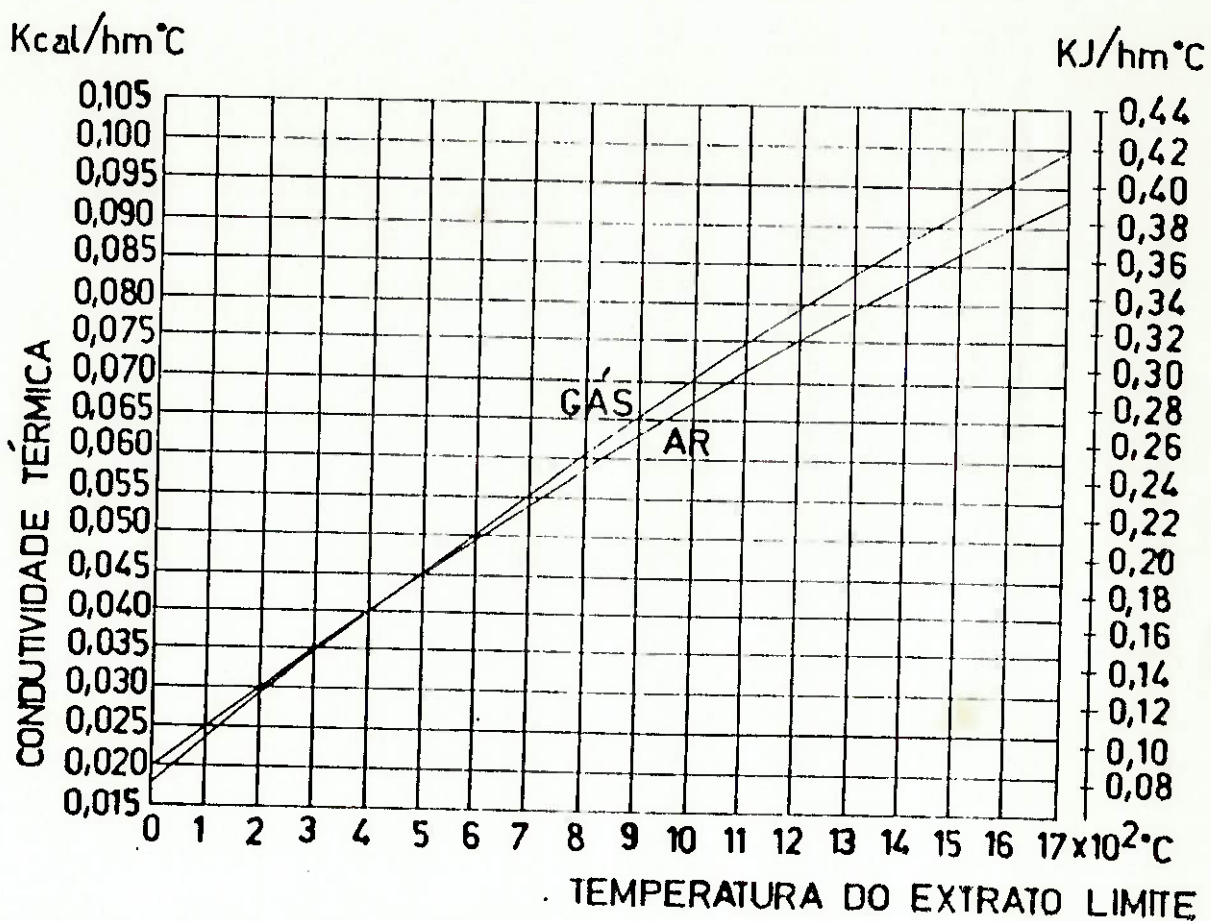
Substância	Fórmula	Peso Molecular	Temperatura		Pressão		Volume, pés ³ /lbf mol
			°K	°R	atm	lbf/pol ²	
Amônia	NH ₃	17,03	405,5	729,8	111,3	1036	1,10
Argônio	A	39,944	151	272	48,0	705	1,20
Bromo	Br ₂	159,832	584	1052	102	1500	2,17
Dióxido de Carbono	CO ₂	44,01	304,2	547,5	72,9	1071	1,51
Monóxido de Carbono	CO	28,01	133	240	34,5	507	1,49
Cloro	Cl ₂	70,914	417	751	76,1	1120	1,99
Deutério (Normal)	D ₂	4,00	38,4	69,1	16,4	241	...
Hélio	He	4,003	5,3	9,5	2,26	33,2	0,926
Hélio ³	He	3,00	3,34	6,01	1,15	16,9	...
Hidrogênio (Normal)	H ₂	2,016	33,3	59,9	12,8	188,1	1,04
Criptônio	Kr	83,7	209,4	376,9	54,3	798	1,48
Nêônio	Ne	20,183	44,5	80,1	26,9	395	0,668
Nitrogênio	N ₂	28,016	126,2	227,1	33,5	492	1,44
Óxido Nitroso	N ₂ O	44,02	309,7	557,4	71,7	1054	1,54
Oxigênio	O ₂	32,00	154,8	278,6	50,1	736	1,25
Dióxido de enxofre	SO ₂	64,06	430,7	775,2	77,8	1143	1,95
Água	H ₂ O	18,016	647,4	1165,3	218,3	3208	0,90
Xenônio	Xe	131,3	289,75	521,55	58,0	852	1,90
Benzeno	C ₆ H ₆	78,11	562	1012	48,6	714	4,17
Butano-n	C ₄ H ₁₀	58,120	425,2	765,2	37,5	551	4,08
Tetracloro de carbono	CCl ₄	153,84	556,4	1001,5	45,0	661	4,42
Clorofórmio	CHCl ₃	119,39	536,6	965,8	54,0	794	3,85
Diclorodifluorometano	CCl ₂ F ₂	120,92	384,7	692,4	39,6	582	3,49
Diclorofluorometano	CHCl ₂ F	102,03	451,7	813,0	51,0	749	3,16
Etano	C ₂ H ₆	30,068	305,5	549,8	48,2	708	2,37
Alcool etílico	C ₂ H ₅ OH	46,07	516,0	929,0	63,0	926	2,68
Etileno	C ₂ H ₄	28,052	282,4	508,3	50,5	742	1,99
Hexano-n	C ₆ H ₁₄	86,172	507,0	914,2	29,9	439	5,89
Metano	CH ₄	16,042	191,1	343,9	45,8	673	1,59
Alcool metílico	CH ₃ OH	32,04	513,2	923,7	78,5	1154	1,89
Cloreto metílico	CH ₃ Cl	50,49	416,3	749,3	65,9	968	2,29
Propano	C ₃ H ₈	44,094	370,0	665,9	42,0	617	3,20
Propeno	C ₃ H ₆	42,078	365,0	656,9	45,6	670	2,90
Propino	C ₃ H ₄	40,062	401	722	52,8	770	...
Triclorofluorometano	CCl ₃ F	137,38	471,2	848,1	43,2	635	3,97

* K. A. Kobe e R. E. Lynn, Jr., *Chem. Rev.* 52, 117-236 (1953).



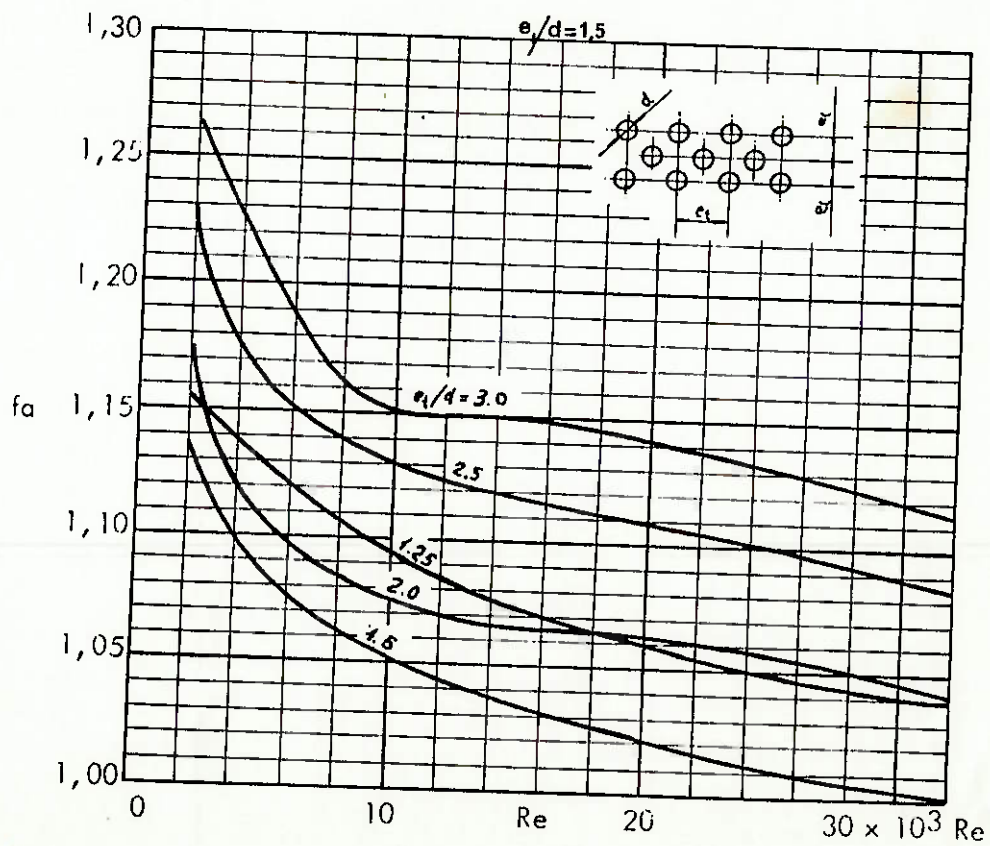
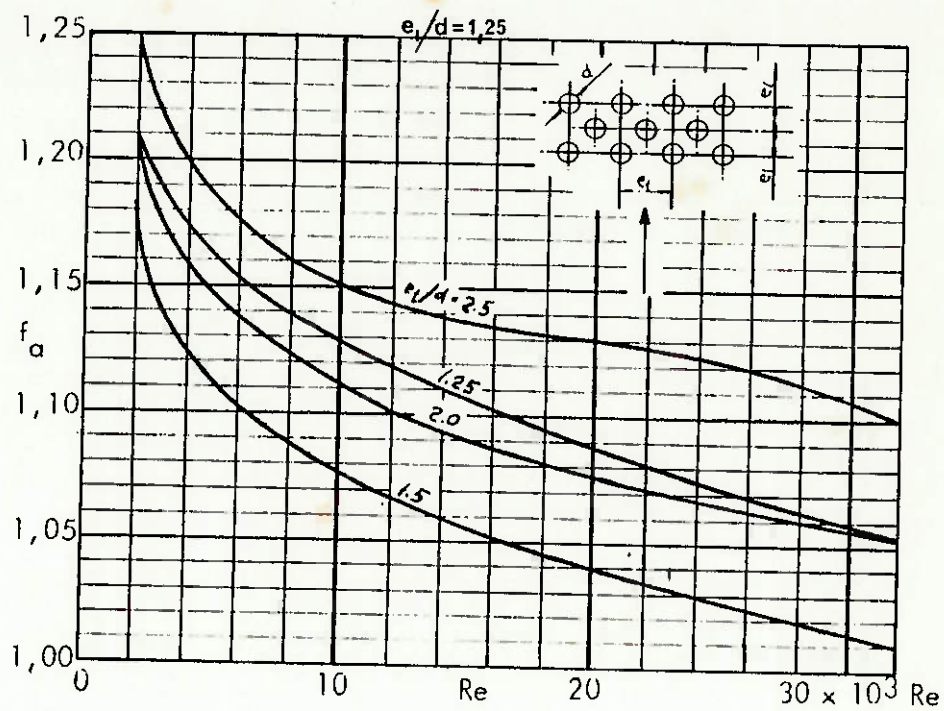
- Viscosidade Cinemática de Gases de Combustão de Óleo BPF (Shell)

Ábaco 4

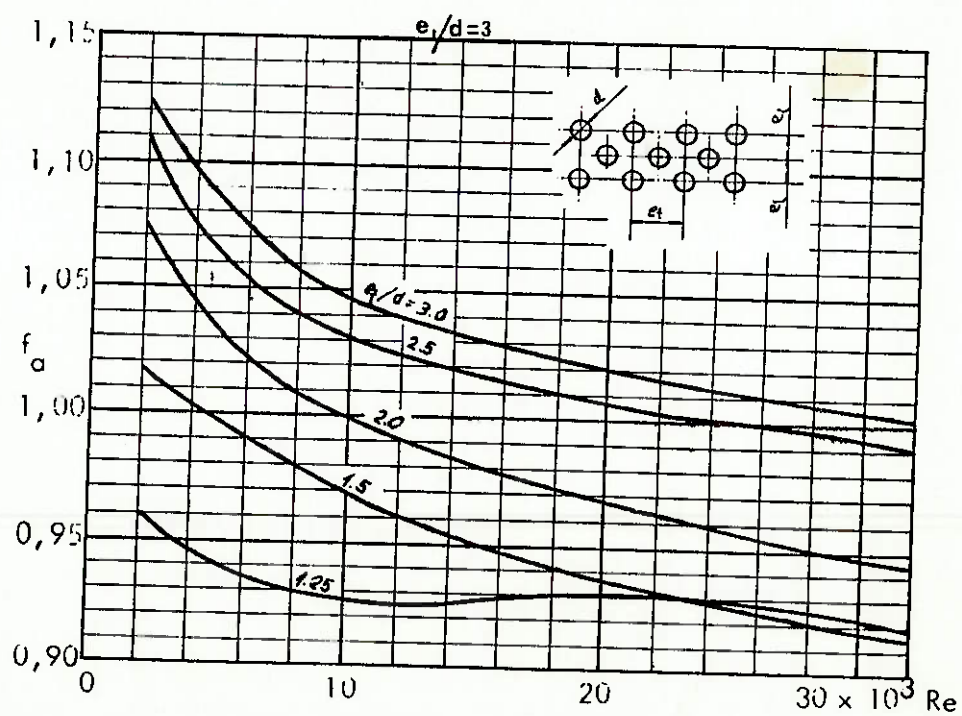
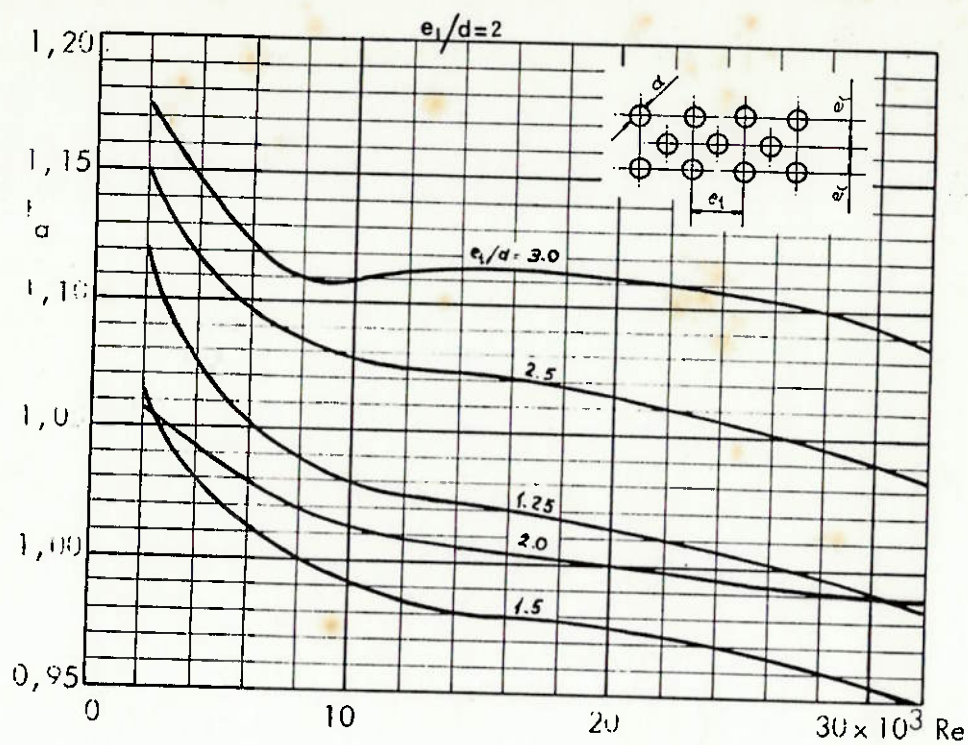


Coefficiente de Condutividade Térmica do Ar a Gás

Abaco 5



Abaco G-A



Ábaco 6.B

7) BIBLIOGRAFIA

- 1) Pera, Hildo
Geradores de Vapor
Editora Fama
- 2) Milton, J.H.
Leach, R.M.
Marine Steam Boilers
British Library
- 3) Osbourne, A.
Modern Marine Engineer's Manual
Volume I
Ed. Cornell Maritime Press
- 4) Van Wylen, G.I.
Sontag, R.E.
Fundamentos da Termodinâmica Clássica
Ed. Edgard Blucher Ltda
- 5) Holman, J.T
Transferência de Calor
Ed. McGraw-Hill