

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

PROJETO DE UMA CALDEIRA A GÁS NATURAL

Autor: David Bretones
Orientador: Eng^o Hildo Pera

FICHA CATALOGRÁFICA

Bretones, David

Projeto de uma caldeira.

A Gás Natural; orientador: Hildo Pera
São Paulo, EPUSP, 1986.

25 p. Ilustr. des. 31,5 cm

Bibliografia: pg. 23

Caldeiras

Introdução

Caldeira é um nome comumente dado a um caso particular de gerador de vapor d'água. No seu sentido mais amplo, um gerador de vapor refere-se ao equipamento que, pela troca de energia (solar, térmica ou nuclear), conduz um líquido qualquer até a mudança de fase obtendo-se vapor.

Este equipamento é um trocador de calor constituído de vários componentes de tal forma a fornecer a máxima eficiência na troca de calor entre a fonte quente e o líquido a ser vaporizado.

Sendo assim, uma caldeira nada mais é senão um trocador de calor, que produz vapor a partir da água líquida, através da queima de um combustível com ar atmosférico. Entretanto, não devemos nos deixar levar pela aparente simplicidade ou até robustez deste tipo de equipamento pois, por causa da sua vasta aplicação e requisição no mercado, alcançou altos níveis tecnológicos na busca de rendimentos cada vez maiores. Por outro lado, a necessidade de segurança também resultou em complicações adicionais ao projeto de uma caldeira.

Desta forma, as caldeiras são equipamentos bem conhecidos e de fácil estudo, mas que carecem de detalhes tecnológicos dominados por apenas alguns poucos fabricantes.

O escopo deste trabalho será a análise dos processos, cálculos térmicos e dimensionamento de uma caldeira de combustão de gás natural.

Escolha

Existem diversas razões pelas quais poderíamos justificar a escolha pelo projeto de uma caldeira e em particular uma caldeira a gás. Citaremos algumas que consideramos essenciais:

a) o ponto inicial para qualquer projeto é o esta-

belecimento da necessidade à qual o projeto atenderá. Constatamos então a grande necessidade do mercado na obtenção de vapor d'água. Sendo assim, a caldeira aplica-se às indústrias têxtil, química, farmacêutica, metalúrgica, alimentícia, de celulose, etc, nas quais é fundamental e em algumas essencial, para o seu funcionamento e viabilidade econômica. Apenas a título de exemplo citaremos o caso da Copebrás, indústria produtora de ácido sulfúrico, localizada em Cubatão, S.P. Nesta os processos liberam grande quantidade de energia térmica (na combustão de enxofre) que, se não fosse reaproveitada na produção de vapor, inviabilizaria o seu funcionamento.

b) Até poucos anos atrás o gás natural restringia-se apenas ao uso em caldeiras de refinarias de petróleo. Entretanto, com os recentes achados de reservas petrolíferas, o C.N.P. (Conselho Nacional de Petróleo) tem aconselhado à uma diversificação no sentido de maior uso do gás natural, emanado pelos poços petrolíferos.

c) As caldeiras a gás natural apresentaram vantagens muito boas como a não emissão de fuligem pela queima completa do gás, já que é muito eficiente a mistura e combustão que os queimadores atuais produzem.

Dados do Projeto

tem-se: Como especificações técnicas para o projeto desta caldeira

combustível gás natural

qualidade do vapor saturado

pressão de trabalho 12 Kgf/cm

produção de vapor 8 tv /h .

temperatura da água de alimentação 105°C

temperatura do ar para combustão 25°C

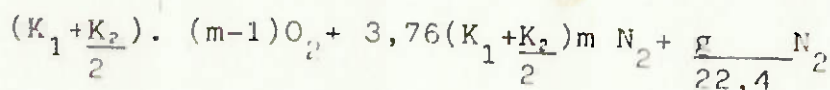
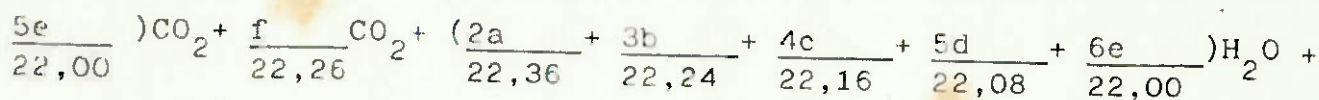
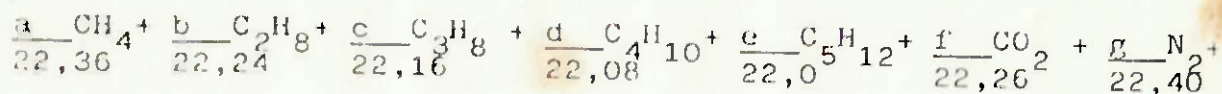
eficiência térmica 90 %

Cálculos Térmicos

Composição do gás natural de petróleo:
(em volume)

CH ₄	93,14 %
C ₂ H ₆	2,50 %
C ₃ H ₈	0,67 %
C ₄ H ₁₀	0,32 %
C ₅ H ₁₂	0,12 %
CO ₂	1,06 %
N ₂	2,14 %

Equação da queima do gás natural com um excesso "m" de ar atmosférico:



para a composição dada, tomando 100 m³ de gás natural e m = 1,08, temos:

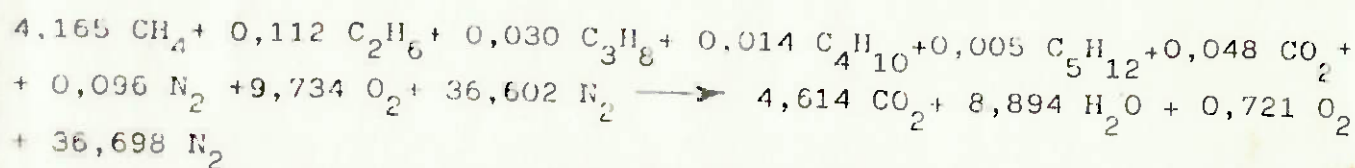


TABELA DA COMPOSIÇÃO MÉDIA DO GÁS NATURAL

gás	fórmula	%	V_1	$n_i = \% / V_1$	M_i	$m_i = n_i M_i$
metano	CH_4	93,14	22,36	4,1655	16,042	66,8255
etano	C_2H_6	2,50	22,24	0,1124	30,068	3,3799
propano	C_3H_8	0,67	22,16	0,0302	44,094	1,3332
butano	C_4H_{10}	0,32	22,08	0,0145	58,120	0,8423
pentano	C_5H_{12}	0,12	22,00	0,0055	72,146	0,3935
diox.carb	CO_2	1,06	22,26	0,0476	44,010	2,0957
nitrog.	N_2	2,14	22,40	0,0955	28,016	2,6765
				$\Sigma n_i =$ = 4,4712 kmol	$\Sigma m_i =$ = 77,5437 kg	

$$\bar{M} = \frac{\Sigma m_i}{\Sigma n_i} = 17,343 \text{ Kg/Kmol} ; \quad \bar{V} = \%V_i = 22,34 \text{ Nm}^3/\text{Kmol}$$

$$\rho_o = \frac{\bar{M}}{\bar{V}} = 3,471 \text{ Kg/Nm}^3$$

$$\begin{aligned} \bar{PCI} = \Sigma y_i PCI_i &= 0,9314 \cdot 913 + 0,0250 \cdot 1641 + 0,0067 \cdot 2385 + 0,0032 \cdot \\ &3113 + 0,0012 \cdot 3849 = 922 \text{ Btu/ft}^3 = 8200 \text{ Kcal/m}^3 \\ &(\text{ a } 1 \text{ atm., } 15^\circ \text{ C }) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= 0,9314 \cdot 21520 + 0,0250 \cdot 20432 + 0,0067 \cdot 19944 + \\ &+ 0,0032 \cdot 19630 + 0,0012 \cdot 18842 = \\ &= 20774 \text{ Btu/Lb} = 11533 \text{ Kcal/Kg} \end{aligned}$$

Análise dos Produtos da Combustão

a seco , na base molar:

CO_2 : 10,98 %

a úmido , na base molar:

	%	M_i	V_i
CO_2 :	9,06	44,010	22,26
O_2 :	1,42	32,000	22,39
N_2 :	72,06	28,016	22,40
H_2O :	17,46	18,016	22,40

$$\bar{M} = \sum y_i M_i = 27,776 \text{ Kg/Kmol}$$

$$\bar{V} = \sum y_i V_i = 22,39 \text{ Nm}^3$$

$$\rho = 1,241 \text{ Kg/Nm}^3 ; \quad T_o = 273\text{K} ; \quad p_o = 1 \text{ atm}$$

Usando equações * que fornecem os valores $\bar{c}_p$ de cada gás dos produtos de combustão, temos:

para CO_2 a 240°C

$$\bar{c}_p = 10,7548 \frac{\text{Kcal}}{\text{KmolK}} \quad \Rightarrow \quad c_p = \frac{\bar{c}_p}{M} = 0,244 \frac{\text{Kcal}}{\text{KgK}}$$

para o O_2 :

$$\bar{c}_p = 7,4805 \text{ Kcal/ KmolK} ; \quad c_p = 0,234 \text{ Kcal/ KgK}$$

para o N_2 :

$$\bar{c}_p = 7,0771 \text{ Kcal/ KmolK} ; \quad c_p = 0,253 \text{ Kcal/ KgK}$$

para o H_2O :

$$\bar{c}_p = 8,4307 \text{ Kcal/ KmolK} ; \quad c_p = 0,468 \text{ Kcal/ KgK}$$

$$\therefore \quad \bar{c}_{pm} = y_i \bar{c}_{pi} = 7,6524 \text{ Kcal/ KmolK}$$

$$c_{pm} = \frac{\bar{c}_{pm}}{M} = 0,2755 \text{ Kcal/ KgK}$$

Para a mistura dos gases de combustão a 27°C , temos :

$$c_{pm} = 0,2680 \text{ Kcal/ KgK}$$

Eficiência

Com os cálculos da eficiência poderemos determinar a vazão de gás necessária para produzir a quantidade de vapor de projeto nas suas dadas condições de entrada e saída, levando em consideração o rendimento que fixa o calor realmente transferido, já que existem perdas.

$$\dot{V}_{\text{gás}} = \frac{m_{\text{vapor}} (h_s - h_e)}{\text{PCI}_{\text{gás}} \eta}$$

$$m_{\text{vapor}} = 8.000 \text{ Kg/h}$$

$$h_s = 664,9 \text{ Kcal/Kg}$$

$$h_e = 105,1 \text{ Kcal/Kg}$$

$$\text{PCI}_{\text{gás}} = 8.200 \text{ Kcal/Nm}^3$$

$$\eta = 90 \%$$

$$\therefore \dot{V}_{\text{gás}} = \frac{8.000 \cdot (664,9 - 105,1)}{8.200 \cdot 0,9}$$

$$\dot{V}_{\text{gás}} = 607 \text{ Nm}^3 / \text{h}$$

$$\dot{V}_{ar} = \frac{\dot{V}_{gás.}}{100} (\dot{n}_{O_2} \bar{V}_{O_2} + \dot{n}_{N_2} \bar{V}_{N_2})$$

$$\dot{V}_{ar} = 6,07 (9,734.22,39 + 36,602.22,40)$$

$$\dot{V}_{ar} = 6.300 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\dot{V}_{gases} = \dot{V}_{gás} (\dot{n}_{CO_2} \bar{V}_{CO_2} + \dot{n}_{H_2O} \bar{V}_{H_2O} + \dot{n}_{O_2} \bar{V}_{O_2} + \dot{n}_{N_2} \bar{V}_{N_2})$$

$$\dot{V}_{gases} = 6,07 (4,614.22,26 + 8,894.22,40 + 0,721.22,39 + 36,698.22,40)$$

$$\dot{V}_{gases} = 6.920 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\dot{V}_{\text{CO}_2} = \frac{\dot{V}_{\text{gas}}}{100} \cdot n_{\text{CO}_2} \cdot \bar{V}_{\text{CO}_2}$$

$$= 6,07 \cdot 4,614 \cdot 22,26$$

$$= 623,4 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\dot{V}_{\text{O}_2} = \frac{\dot{V}_{\text{gas}}}{100} \cdot n_{\text{O}_2} \cdot \bar{V}_{\text{O}_2}$$

$$= 6,07 \cdot 0,721 \cdot 22,39$$

$$= 98,0 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Perdas

a) por escape:

- As perdas por escape levam em consideração a entalpia dos produtos da combustão incluindo o ar já usado na queima. Estimando em 9% de perdas no escape, temos:

$$0,09 \cdot \dot{m}_{\text{gás}} \cdot \text{PCI} = \dot{m}_{\text{gases}} c_{\text{pm}} (T_e - T_{\text{ar}})$$

$$0,09 \cdot 607 \cdot 8.200 = 6.920 \cdot 1,241 \cdot 0,275 \cdot (T_e - 25)$$

$$T_e = 215^{\circ}\text{C}$$

b) por irradiação:

- Estimando em 1% as perdas por irradiação e residuais, temos:

$$\dot{Q}_{\text{irr}} = \dot{V}_{\text{gás}} \text{PCI} \cdot 0,01$$

$$= 49774 \text{ Kcal/h}$$

Perda Total: 497740 Kcal/h

Instalação Mecânica

A instalação mecânica é composta dos diversos elementos que constituem cada uma das linhas para produção de calor e da linha de vapor, incluindo obviamente a caldeira e dispositivos .

O fluxograma representativo da instalação mecânica está em anexo.

A linha de gás requer cuidados especiais com relação à resistência mecânica, controle e instalação de sujeira. Constam desta linha muitos dispositivos como filtros, válvulas reguladoras, válvulas solenóides; válvula de retenção, medidores de pressão etc... os quais estão dispostos de forma a conferir à linha segurança e eficiência. Esta distribuição pode ser vista no fluxograma de controle da caldeira.

Como o gás natural exige um excesso de ar baixo (aproximadamente 10%), este pode ser alcançado apenas com o uso de um pequeno ventilador, forçando o ar juntamente com o gás no interior do injetor.

A linha de água possui como dispositivos apenas a bomba e o economizador. A bomba é comandada pela válvula de controle de nível e o economizador é uma derivação dos gases quentes de combustão após a saída da caldeira.

Por fim na linha de vapor usa-se geralmente uma válvula de segurança calibrada abaixo da resistência dos tubos da linha para eventual curva de vapor, caso a pressão suba e exageradamente.

Controle

A base do controle da caldeira reside no fato de a demanda requerida de vapor varia continuamente ao longo do tempo.

Sendo assim, faz-se necessária uma montagem como a mostrada na figura nº5.

O controle é feito através da intensidade de chama, pressão máxima na caldeira e nível d'água.

O controle da chama se faz através de um transmutador chama alta/chama baixa atuando na linha de gás comandado por servo-motor. O servo-motor recebe sinais de um pressostato tipo PID (proporcional, integral, derivativo) ligado a caldeira. Quando a pressão sobe o pressostato capta este acréscimo, envia um sinal a um servo-motor que comuta o transmutador para a chama baixa.

Caso ocorra alguma falha e a pressão não caia, entra em ação o pressostato de máxima que atua sobre uma válvula solenóide tipo ON-OFF , bloqueando a passagem de gás e apagando o queimador.

Se mesmo assim a pressão continuar subindo , entram em ação as válvulas de segurança (mecânicas) que não permitem que a pressão passe de 25 % da de trabalho, quando devidamente calibradas, e independem de qualquer outro controle, pois estão ligadas diretamente à caldeira.

Estas válvulas devem permitir a fuga do vapor para a atmosfera na ordem de 1,5 à 2,5 vezes a vazão de vapor projetada.

O nível d'água deve ser mantido entre as marcas inferior e superior, caso contrário pode acontecer de toda água no interior da caldeira vaporizar causando um aumento de pressão muito rápido. Outro motivo é a produção contínua de vapor: se é retirado o vapor continuamente é necessária a reposição de água. Sendo assim, a válvula de nível aciona a bomba d'água quando o nível da caldeira alcança a marca inferior e desliga quando alcança a superior. A vazão da bomba deve ser tal que o tempo de enchimento seja 80 % do ciclo total de enchimento somado ao esvaziamento até a marca inferior.

- Gás natural

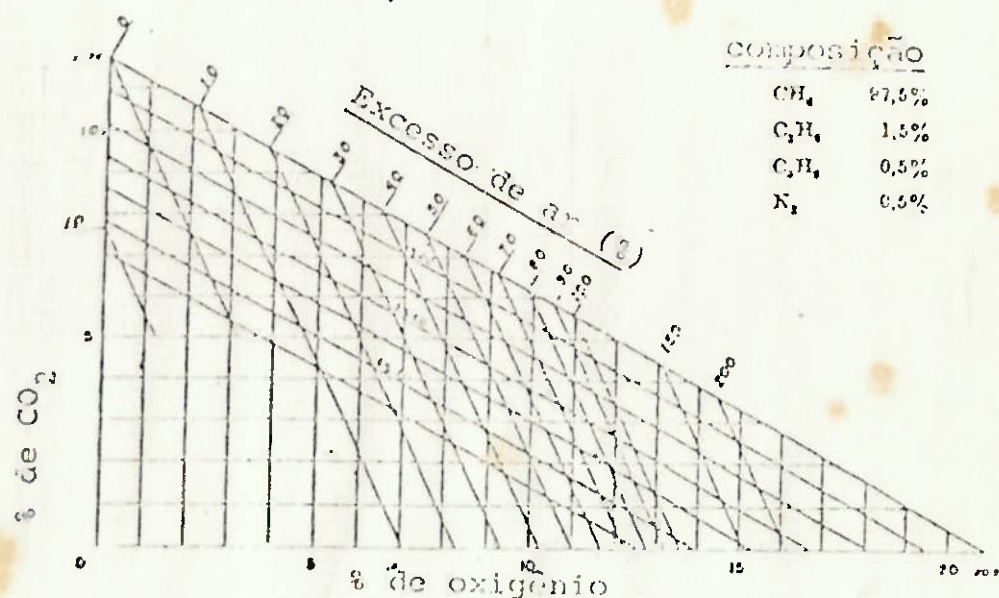


Gráfico 1: excesso de ar para o gás natural; teores de CO₂ e O₂ nos produtos da combustão.

TABLE 6.3 Heats of Combustion

Substance	Btu per cu ft at 60° F and 1 atm		Btu per lb	
	Gross (high)	Net (low)	Gross (high)	Net (low)
Hydrogen	325	275	61,100	51,623
Carbon monoxide	321	322	4,347	4,347
Methane	1013	913	23,879	21,520
Ethane	1786	1641	22,304	20,432
Propane	2592	2385	21,661	19,914
Butane	3370	3113	21,308	19,630
Carbon			14,093	14,093

Note: The net, or low, heating value designates the heat of combustion with the water vapor uncondensed. If the products are cooled to the initial temperature and the water is condensed, its latent heat of condensation is liberated and the larger, or gross, heating value is obtained. Cf. Perry, tables 3-142, 9-12, and 9-16. All tables not in full agreement.

Tabela 1: Poder calorífico de vários hidrocarbonetos componentes do gás natural.

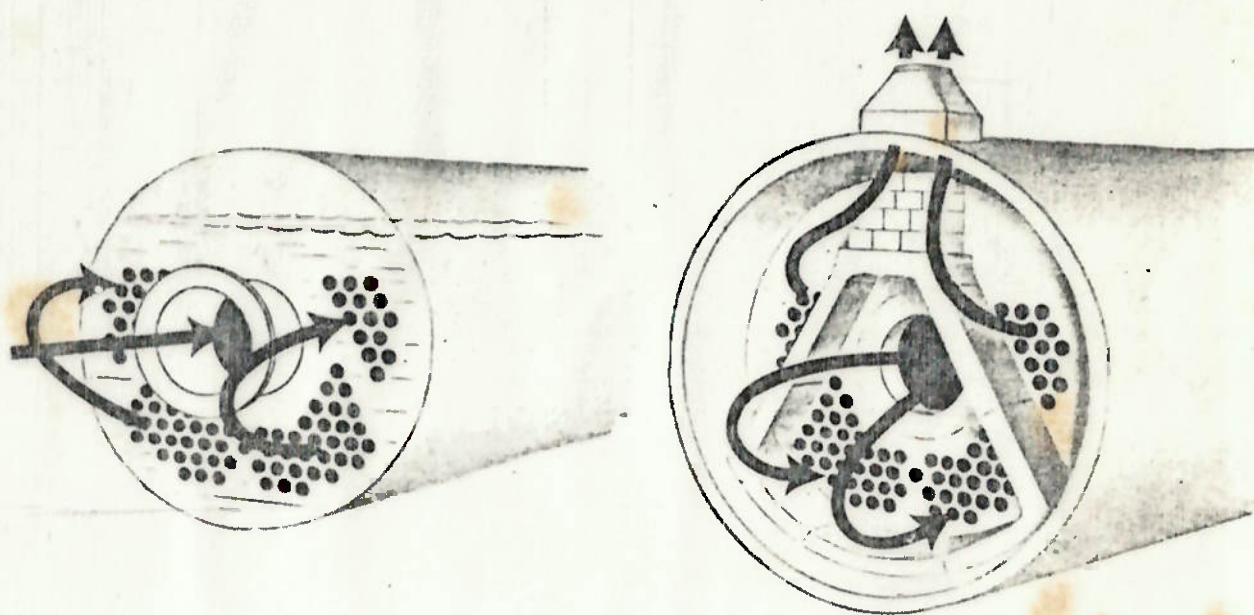
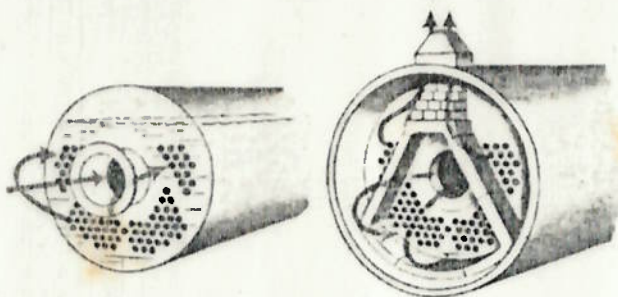


Figura 1: fluxo dos gases no interior da caldeira (modelo adotado)

DESIGNED FOR LONG LIFE AND OUTSTANDING SERVICE

3-PASS TRAVEL

The O&S POWERMASTER is a 3-pass boiler with a single flue gas flow reversal at either end. Both the number and diameter of tubes in the successive passes are selected so as to maintain the most efficient flue gas velocity. Three-pass design provides maximum convenience to the user for inspection and cleaning thus encouraging "brand new" performance for the entire boiler life. Flue gases pass through the cylindrical combus-



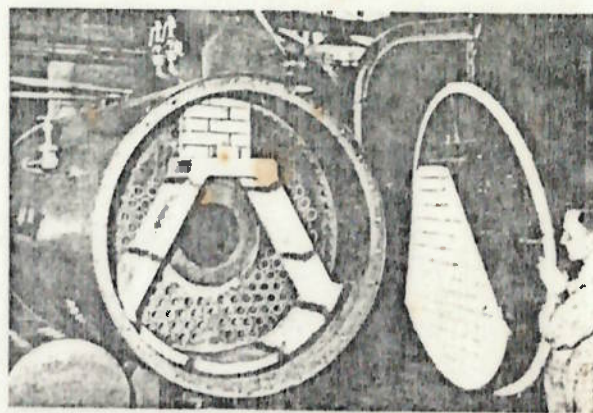
tion tube toward the rear of the boiler, then reverse downward and toward the front through the lower bank of tubes. At this point the gases reverse again toward the rear through two parallel paths on either side of the combustion tube to the gas outlet. Complex baffling at the front end is not required in a 3-pass boiler.

REAR REFRACTORY

Complete, efficient combustion is assured by the use of an air-directing refractory throat in the burner end of the combustion chamber. High temperature refractory on the rear cover and a refractory arch thoroughly insulate the rear baffle chamber. All refractory is installed by craftsmen at the O&S plant.

COMPLETE ACCESSIBILITY

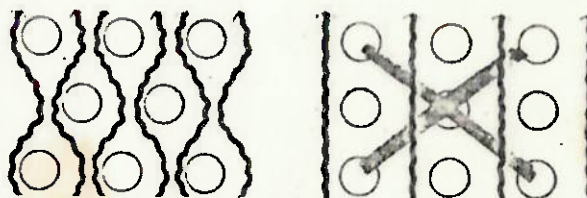
The simple swinging rear cover containing the rear refractory can be removed easily for inspection and cleaning. The insulated front cover is removable in sections without disturbing the burner



and accessory equipment and piping. Handholes are provided on all boilers for inspection of the water side. POWERMASTER boilers of 80 HP and larger also have a manhole. Cleanliness of operation and the resulting high efficiency are easy to maintain over the entire life of the unit because of the simplicity of regular inspection and cleaning.

STAGGERED TUBES

As the predetermined boiler water volume circulates by rising toward the surface while it is heated, it encounters a multitude of heated tube surfaces in travelling to the steam-release area. There are no dead spaces for ineffectual boiler water eddys as between tubes in the same vertical plane. The advantageous result of controlled uniform circulation is quicker heating, faster steaming, and high quality dry steam. In addition, the scrubbing action of the rising water flow around the staggered tubes prevents the accumulation of corrosive oxy-



gen and CO_2 bubbles on the tube surfaces. All boiler connections are baffled, preventing direct impingement of feed water on heating surfaces. A "dry pan" beneath the steam outlet on all POWERMASTER steam generators assures dry saturated steam with a moisture content no greater than half of one percent on high pressure boilers.

Figura 3: queimador de gás (adotado)

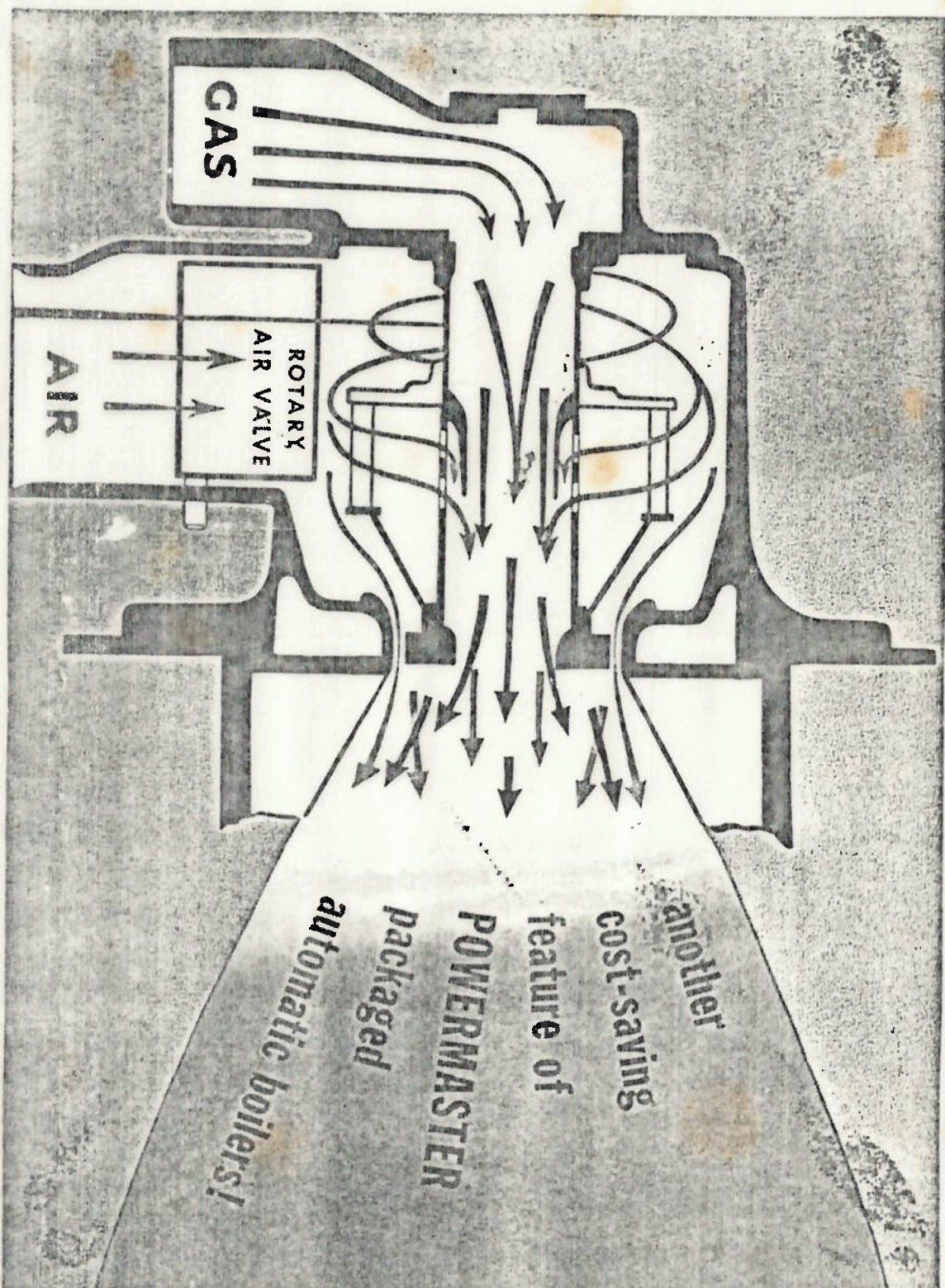
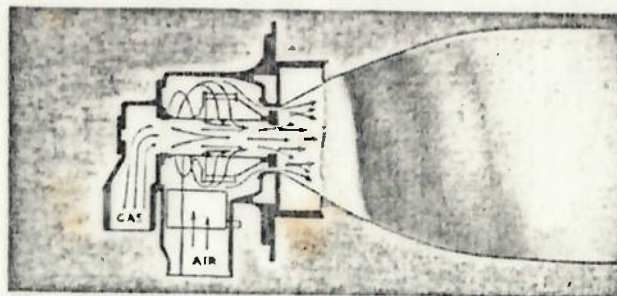


Figura 4 : funcionamento do queimador

GAS BURNER

The VORIFLOW gas burner is of the pre-mix design. Gas flows through the central gas nozzle from the gas plenum. Simultaneously combustion air from the blower enters the air plenum automatically controlled by the motor operated damper. Primary pre-mixing air is captured by a



stationary air wheel register. This assembly directs the pre-mixing air through holes into the gas nozzle against venturi-shaped air baffles. The air and gas are thoroughly mixed enroute through the gas nozzle. The outer secondary air ring controls the amount of secondary combustion air admitted to the combustion chamber. Ignition takes place at this point.

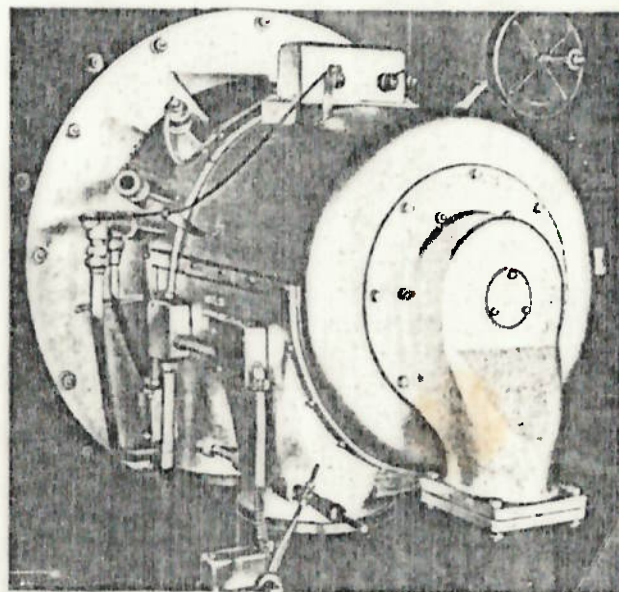
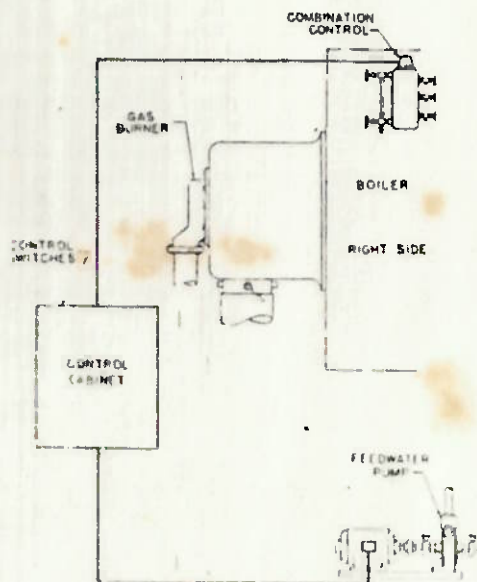
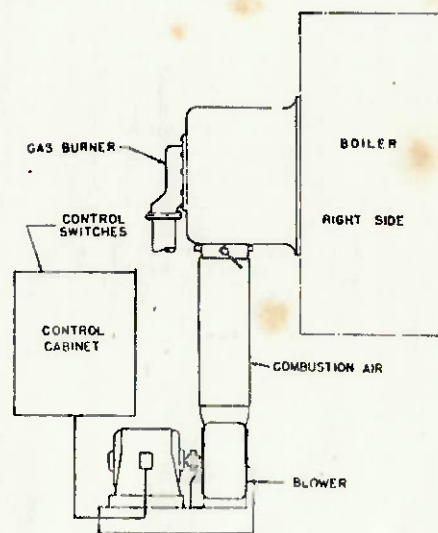


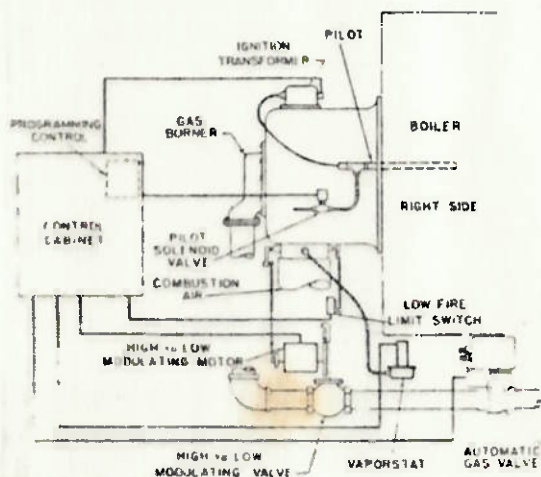
Figura 5 : estalação e controle das linhas de gás, ar e água



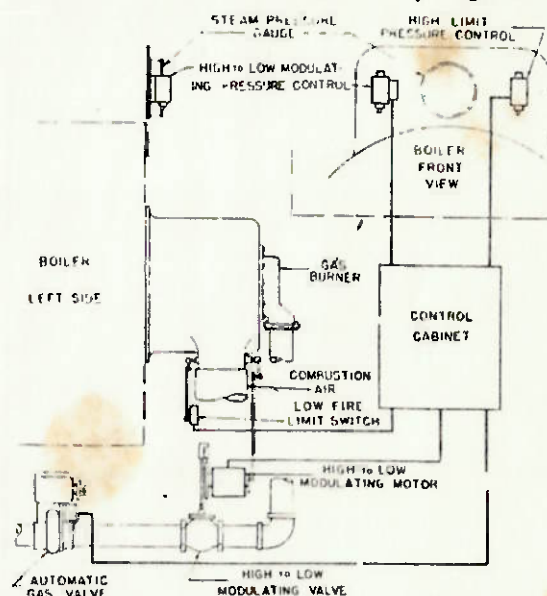
- Feed pump automatic
- Level control energized
- Low water protection



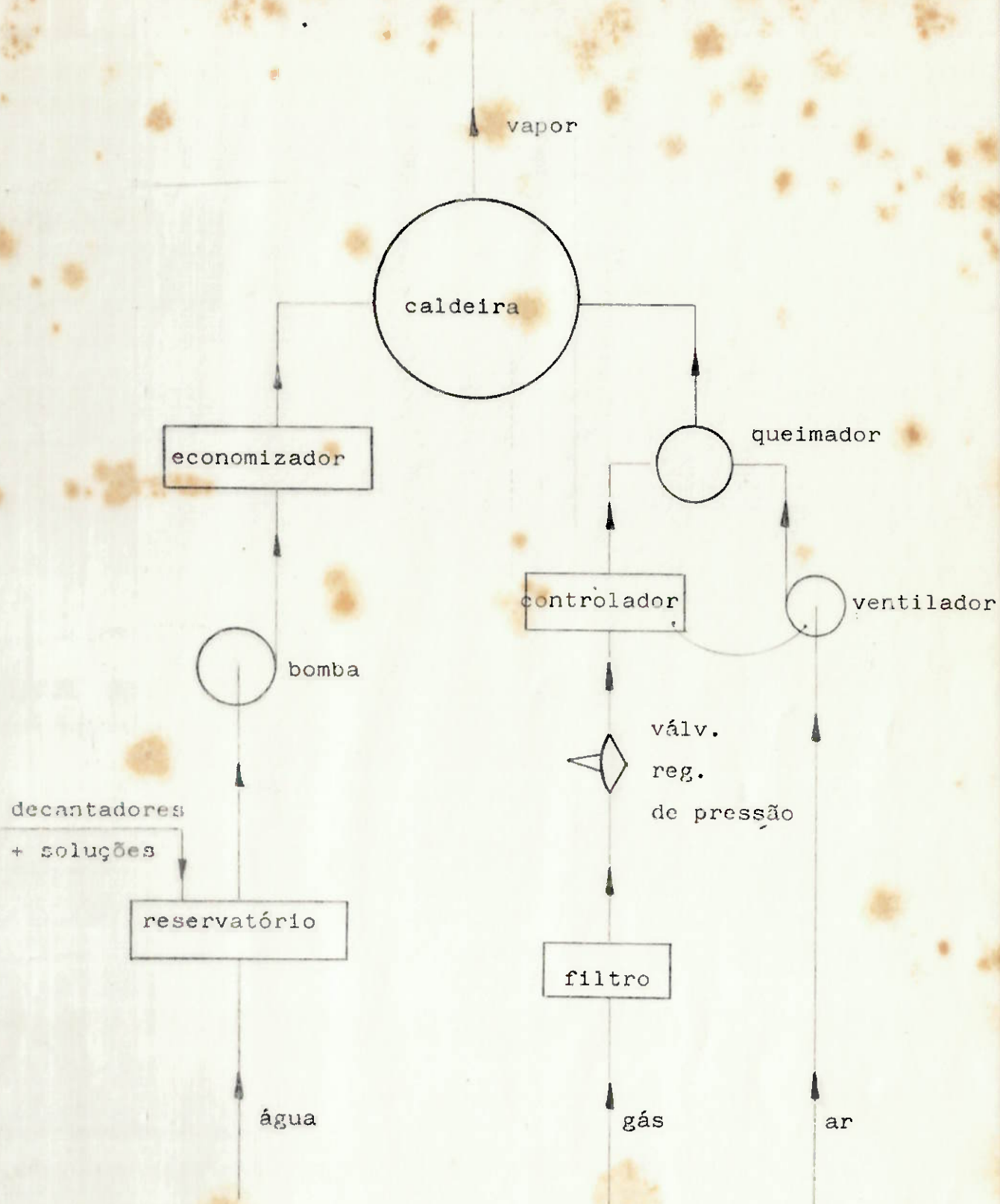
- Burner switch on
- Blower purges combustion space
- Blower interlock starts program



- Ignition established and proved
- Main flame established and proved at low fire



- Modulation control travels to high fire
- Modulating pressure control adjusts firing rate
- High-limit pressure control prevents excess steam pressure



Esquema da Instalação