

EQUIPAMENTOS DE ALTO VÁCUO
E PRINCIPIO DE CALCULO

AUTOR:
FULVIO STELLI

1981

Sumário

A finalidade deste trabalho é familiarizar o engenheiro com os sistemas de alto vácuo, dada a sua importância crescente na indústria.

Tem por objetivo fornecer um método de cálculo simples e seguro de sistemas de vácuo, sem ao mesmo tempo perder o rigor científico.

Evitando tornar este trabalho apenas uma apresentação teórica do assunto, este conta com uma relação, em forma de tabelas, razoavelmente completa dos equipamentos de vácuo encontrados no Brasil. Conta também, em um anexo, com catálogos detalhados de vários equipamentos, de maneira a orientar o projetista no dimensionamento preliminar do sistema.

O trabalho é finalizado com uma apresentação em fotografias de alguns sistemas de vácuo e dos equipamentos em que são usados, e para concluir foi feito um exemplo de cálculo para um caso real de sistema de vácuo.

Fulvio Stelli

ÍNDICE

1. Introdução.....	1
2. Princípio de Cálculo.....	3
2.1. A Equação de Estado.....	3
2.2. Percurso Médio Livre.....	5
2.3. Características do Sistema de Vácuo.....	7
2.4. Escoamento Através de dutos.....	11
2.5. Escoamento Viscoso Através de dutos	14
2.6. Escoamento Molecular em dutos.....	15
2.7. Escoamento em passagens estreitas	18
2.8. Velocidade de Bombeamento	18
2.9. Taxa de Evacuação.....	19
2.10. Velocidade de Bombeamento das 'Cold-Traps'.....	21
3. O Sistema de Vácuo.....	22
3.1. Elementos do Sistema de Alto Vácuo.....	22
3.2. A bomba de Alto Vácuo.....	26
3.2.1. Bomba de difusão.....	26
3.2.2. Bomba Turbomolecular.....	31
3.2.3. Bomba de Adsorção.....	33
3.3. Bomba de Pré-Vácuo.....	34
3.3.1. Bomba Rotativa de Palhetas.....	34
3.3.2. Bomba Roots.....	38
3.4. Instrumentos de Medição.....	40
3.4.1. Manômetros de Mercúrio e Óleo.....	41
3.4.2. Manômetros Mecânicos.....	41
3.4.3. Manômetros de Termo-condutividade.....	42
3.4.4. Manômetros de Ionização.....	43
3.4.5. Manômetros de Descarga (Penning).....	44

4. Equipamentos de Vácuo Disponíveis no Brasil.....	45
4.1. Edwards do Brasil.....	47
4.1.1. Bombas de Pré-Vácuo.....	47
4.1.2. Bomba de Alto Vácuo	48
4.1.3. Fluidos de Trabalho.....	49
4.1.4. Instrumentos de Medida de Vácuo.....	50
4.1.5. Instrumentos de Medida de Vácuo	50
4.1.6. Sistema Diffstak.....	51
4.2. Leybold-Heraeus.....	53
4.2.1. Bombas de Pré-Vácuo.....	53
4.2.2. Bomba de Alto Vácuo.....	54
4.2.3. Instrumentos de medida de vácuo.....	55
5. Exemplo de Cálculo para um sistema real.....	56
5.1. Detetor de defeitos cristalinos.....	56
5.2. Metalizador a vácuo.....	59
5.3. Exemplo de Cálculo.....	64
Apendice 1: Unidades.....	68
Apendice 2: Pressões Usadas em Várias aplicações de vácuo	69
Bibliografia.....	70
Anexos : Catálogos de Equipamentos.....	71

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O problema das pressões ocupou muitos pesquisadores como Otto Von Guericke, Robert Boyle, Sprengel, Cavendish, Röntgen, Fleming e muitos outros cientistas que desenvolveram já no nosso tempo o ciclotron, o microscópio eletrônico, a deposição sob alto vácuo e muitas outras aplicações científicas e industriais.

Na indústria química, especificamente em produtos farmacêuticos, são muito utilizados equipamentos que promovem a desidratação de alimentos e medicamentos. Tais equipamentos são ditos de liofilização, nos quais um sistema de vácuo é associado a um sistema de criogenia.

Outro equipamento muito difundido é o de metalização sob alto vácuo. Estas metalizações tem diversas finalidades tais como : execução de circuitos eletrônicos destinados a equipamentos de microondas, construção de camadas condutoras sobre pastilhas de material semicondutor (para componentes de eletrônica digital), deposição de camada metálica refletora sobre superfícies não metálicas, etc.

No campo da metalurgia podemos citar a fundição de metais sob alto vácuo.

Por fim temos o uso dos equipamentos de vácuo para pesquisas científicas sempre que se necessita de um ambiente que evite a contaminação de algum processo físico-químico. Temos como exemplo o péletron, o gerador de plasma, os equi-

namentos destinados a inserir átomos estranhos em estruturas cristalinas para estudar defeitos nas mesmas, etc.

Em determinadas aplicações não é necessário que o processo ocorra à baixa pressão, mas sim, que seja isento de substâncias que possam interferir de maneira nociva no processo. Desta maneira, às vezes é mais importante a limpeza do vácuo produzido do que o abaixamento de pressão obtido com um certo equipamento.

Capítulo 2

PRINCÍPIO DE CÁLCULO

2.1. A Equação de Estado

Na teoria cinética um gás deve ser considerado como uma coleção de partículas movendo-se em uma região que é totalmente vazia.

A pressão de um gás em um dado ponto em uma dada direção é definida como sendo a razão de transferência de quantidade de movimento por unidade de tempo em uma área unitária normal à direção assumida. Para um gás homogêneo e em equilíbrio a pressão então é dada por :

$$P = \frac{1}{3} \cdot v_s^2 \cdot \rho \quad (1)$$

onde : $v_s = \sqrt{\bar{v}}$ raiz quadrada da velocidade média das partículas

ρ = densidade

Como ρ é a densidade, temos:

$$\rho = \frac{\gamma}{V}$$

onde : V = volume do recipiente

γ = massa do gás no recipiente

Então,

$$PV = \frac{1}{3} \cdot \gamma \cdot v_s^2 \quad (2)$$

Esta é a lei de Boyle, já que em um sistema em equilíbrio os dois termos da direita são constantes.

Pelo princípio da equipartição da energia, temos:

$$\boxed{v_s^2 = \frac{3 \cdot k \cdot T}{m}} \quad (3)$$

onde : T= temperatura absoluta

m= massa molecular

k= $1,38 \cdot 10^{-16}$ dina cm/°K, constante de Boltzmann

De (2) e (3), temos :

$$\boxed{PV = \frac{k \cdot T \cdot \gamma}{m}} \quad (4)$$

Mas se N for o número total de moléculas no recipiente:

$$N = \frac{\gamma}{m},$$

então :

$$\boxed{PV = NkT} \quad (\text{unid. no sist. CGS}) \quad (5)$$

Usualmente temos $R = k/m$ e vem :

$$\boxed{PV = R \cdot m \cdot N \cdot T} \quad (5')$$

Duas hipóteses foram utilizadas implicitamente acima:

1. As moléculas tem dimensões desprezíveis.
2. Não existem forças entre as moléculas exceto no instante da colisão.

Ambas hipóteses para obtermos a lei dos gases perfeitos são de fato falsas para um gás real. Mas felizmente para nossos propósitos, ela é mais precisa a medida que a pressão diminui, tanto que para gases em vácuo moderado o uso da lei dos gases perfeitos é consideravelmente precisa.

2.2 Percurso Médio Livre (PML)

É a distância percorrida por uma molécula de gás entre colisões sucessivas com outras moléculas do gás.

O valor do percurso médio livre depende não só da pressão, mas também do diâmetro molecular, da viscosidade e velocidade. Este valor pode ser obtido por uma das três equações:

$$L = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \eta \cdot n \cdot \sigma^2} = \frac{1}{0,31 \cdot \rho \cdot v} = \frac{2,02 \cdot \eta}{\sqrt{p \cdot \rho}} \quad (6)$$

onde: L = PML

n = número de moléculas por cm^3

σ = diâmetro molecular médio (cm)

ρ = densidade

η = viscosidade

v = velocidade média em cm/s.

p = pressão (dinas/cm^2).

E v é dado por:

$$v = \sqrt{\frac{2,1 \cdot T \cdot 10^8}{M}} \quad (\text{cm/s}) \quad (7)$$

Sendo o diâmetro molecular σ , a área em que pode ocorrer o choque é um círculo de diâmetro 2σ centrado em uma das moléculas e considerando a outra apenas um ponto. Se existem n moléculas por unidade de volume, a área total em que podem ocorrer choques é $4\sigma^2 \cdot n$. Se considerarmos todas as moléculas paradas dentro de um volume e uma outra molécula entrar nesse volume, o percurso que ela percorrerá até que ocorra um choque é $(1/4\sigma^2 \cdot n)$. Maxwell descobriu que as chances de um impacto crescem de $\sqrt{2}$, quando todas as partículas estão em movimento, logo $L = (1/\sqrt{2} \cdot \eta \cdot \sigma^2 \cdot n)$.

PML e número de moléculas por cm^3 à várias pressões.

Pressão (mmHg)	PML (cm) para o N_2	Número de moléculas por cm^3 .
760	$9,44 \cdot 10^{-6}$	$2,7 \cdot 10^{19}$
1	$5,50 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{16}$
$1 \cdot 10^{-2}$	$5,50 \cdot 10^{-1}$	$3,4 \cdot 10^{14}$
$1 \cdot 10^{-6}$	5500	$3,4 \cdot 10^{10}$
$1 \cdot 10^{-9}$	5500000	$3,4 \cdot 10^7$

TAB 2.1

Diamêtros moleculares e PML

	Diametro (10^{-8} cm)	PML ($\text{cm} \cdot 10^{-6}$) à CNTP.
Hélio	2,18	28,4
Hidrogenio	2,47	18,4
Argônio	3,36	10,1
Oxigenio	3,39	10,0
Nitrogenio	3,50	9,44
Dióxido de Carbono	4,20	6,3

TAB 2.2.

Densidade e viscosidade dos gases

Gás	Densidade à CNTP (g/litro)	Viscosidade à 15°C ($\times 10^{-6}$)
H_2	0,089882	89
He	0,17848	197
Ne	0,8999	312
N_2	1,2505	174
O_2	1,42895	198
Ar à CNTP	1,2928	180
CO_2	1,97694	144

TAB 2.3.

* Variação da viscosidade com a temperatura: Aproximadamente $n = n_0 (1 + \alpha t)$ onde α é uma constante cujo valor médio para os gases da tabela é 0,003 .

2.3. Características de Sistemas de Vácuo.

O circuito de vácuo, definição de impedância, condutância e velocidade.

É muito usada uma analogia entre um circuito de corrente contínua e os sistemas de vácuo, e que é de grande ajuda na compreensão destes sistemas.

Primeiro estabeleçamos a validade da analogia . Consideremos um circuito elétrico constituído somente por fontes e resistores. Em regime permanente o circuito é caracterizado por duas condições : 1. corrente (a qual é constituída por elétrons em movimento) não é criada nem destruída, e, 2. o potencial muda ao redor do circuito, mas em cada ponto ele é constante no tempo.

Consideremos agora um sistema de vácuo constituído por uma bomba e uma linha conectando esta bomba ao recipiente de alto-vácuo. Suponha que haja uma pequena ligação da atmosfera para o recipiente. O ar fluirá então através da passagem para o recipiente e através das linhas será ejeta-do pela bomba de volta para a atmosfera. Para este circuito fechado pode ser feita então a analogia com o circuito elétrico. A pressão muda ao longo do circuito mas em um dado ponto ela é constante com o tempo.

Suponhamos que um sistema de vácuo esteja em equilíbrio e com temperatura uniforme. A quantidade $Q = P.V'$ pode então ser definida. Aqui V' é o volume de gás fluindo através de um plano transversal do sistema por unidade de tempo e P é a pressão neste plano. Então pela lei dos gases perfeitos $P.V = k.N.T$ e

$$Q = P.V' = k.N'.T \quad (8)$$

Aqui k é a constante de Boltzmann, N' é o número de moléculas cruzando o plano por segundo e T é a temperatura absoluta. A corrente de gás Q , representa as moléculas em movimento, e estas não são criadas nem destruídas no circuito. Consequentemente ela é análoga a corrente no caso elétrico.

A analogia pode ser completada pela definição de impedância (ou resistência) de um segmento do sistema como a queda de pressão por unidade de corrente (análoga à lei de Ohm),

$$Z = \frac{P_1 - P_2}{Q} \quad (9)$$

onde P_1 é a pressão a montante e P_2 é a pressão a jusante. Nos parágrafos seguintes veremos que a impedância é às vezes função de Q e P e às vezes não. Pode-se usar também a notação de condutância,

$$C = \frac{1}{Z} = \frac{Q}{P_1 - P_2} \quad (10)$$

A analogia elétrica também se aplica à combinação de impedâncias em série e em paralelo.

$$Z_{\text{série}} = \sum Z_i, \quad \frac{1}{Z_{\text{paralelo}}} = \sum \frac{1}{Z_i} \quad (11)$$

ou

$$\frac{1}{C_{\text{série}}} = \sum \frac{1}{C_i}, \quad C_{\text{paralelo}} = \sum C_i \quad (12)$$

Aqui $Z_{\text{série}}$ significa a impedância equivalente para um sistema constituído de várias linhas em série de impedância individual $Z_1, Z_2, Z_3 \dots Z_n$. Para Z_{paralelo} , ídem, mas constituído por várias linhas em paralelo.

Uma bomba de vácuo é um dispositivo que usa de potência externa para promover o escoamento de gás do sistema a ser evacuado. A velocidade de bombeamento pode ser definida de várias maneiras diferentes, mas a definição mais simples é: a velocidade \underline{S} da bomba à pressão \underline{P} é o volume de gás removido por unidade de tempo, medido à pressão \underline{P} . Claramente $S = V'$ que é o volume escoando pela garganta da bomba. Já que $Q = P.V'$

$$S = \frac{Q}{P} \quad (13)$$

Esta é a equação que define a velocidade de bombeamento \underline{S} . O fluxo \underline{Q} pode ser medido em qualquer ponto do sistema, mas a pressão \underline{P} deve ser medida no interior da bomba. Assim não há distinção real entre \underline{S} e \underline{V}' tal como é usado aqui; o símbolo \underline{V}' será usado quando nos referirmos à vazão em volume no sistema, e \underline{S} quando nos referirmos à ação de bombeamento.

A equação (13) pode ser aplicada à uma bomba mecânica à uma bomba de difusão, à uma trava fria (cold trap) ou à uma pequena abertura ligando um sistema de pressão \underline{P} à um sistema de pressão mais baixa:

A vazão V é usualmente dada em Litros/seg. e a pressão em microns de Hg. Então a impedância tem como unidades seg/litro e a condutância e a velocidade de bombeamento são dadas em litros/seg. .Devido ao fato de terem as mesmas unidades elas são usadas erradamente como termos sinônimos. Mais adiante veremos que elas podem ter o mesmo valor numérico mas nunca são iguais no significado. A velocidade de bombeamento é uma capacidade do sistema de remover gás e sempre implica em uma fonte externa de força.

Consideremos agora uma impedância Z conectada a um recipiente à pressão P com uma velocidade de bombeamento S_p à pressão P_p . Sendo S a velocidade de bombeamento dos sistema na entrada da impedância. Então,

$$\frac{1}{S} = \frac{P}{Q} \tag{14}$$

e de (9) e (13) vem: $Z \cdot Q = P - P_p$ (15)

então : $\frac{1}{S} = Z + \frac{P_p}{Q}$ (16)

e $\frac{1}{S} = Z + \frac{1}{S_p} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S_p}$ (17)

onde C é a condutancia $1/Z$. No caso de um sistema complexo com linhas em série e em paralelo, Z e C são os valores equivalentes obtidos das equações (11) e (12).

A equação (17) é a equação fundamental para o projeto de dispositivos de vácuo. Ela fornece a velocidade de bombeamento S de uma bomba de velocidade S_p trabalhando em uma impedância Z . Claramente, se $1/Z = C \ll S_p$, então $S=C$ e a velocidade é limitada pela impedância da linha. Se $1/Z = C \gg S_p$, então $S= S_p$ e a velocidade é limitada pela pró-

pria bomba. Na prática C é tomado em algum ponto entre esses dois limites. Não há nenhum conceito elétrico análogo à velocidade de bombeamento.

2.4. Escoamento Através de Dutos. Discussão Geral.

Considerar um duto através do qual um gás escoar devido à aplicação de um gradiente de pressão. Se a pressão e velocidade do gás forem altas o suficiente, o movimento será turbulento. As linhas de fluxo não serão contínuas nem regulares, mas com turbilhões surgindo e desaparecendo. A velocidade e pressão variam em qualquer ponto com o tempo, flutuando bastante em torno de um ponto médio. O fluxo $Q = P.V'$ do gás através do duto foi encontrado experimentalmente como aproximadamente proporcional à raiz quadrada do gradiente de pressão. Esta é, de maneira geral, a natureza do escoamento turbulento.

Se agora, a pressão e a velocidade forem diminuídas, em um certo instante a natureza do escoamento mudará. As linhas de corrente tornar-se-ão contínuas e suavemente curvadas nas vizinhanças das irregularidades do conduto. As linhas de corrente, a velocidade e a pressão serão constantes com o tempo. A quantidade $Q = P.V'$ do gás será agora proporcional ao gradiente de pressão. Próximo das paredes o gás está quase em repouso e no centro do conduto com sua velocidade máxima. O escoamento nestas condições é dito laminar, ou escoamento viscoso.

O escoamento viscoso só pode ocorrer quando o PML das moléculas for muito menor do que o diâmetro do duto.

Se agora, mantendo o gradiente de pressão ao longo do duto e a pressão for abaixada até que o PML aproxime-se do diâmetro do duto, a natureza do escoamento deve mudar. O fenômeno da viscosidade começa a desaparecer porque as moléculas colidem menos umas com as outras do que com a parede do duto. À pressões suficientemente baixas as moléculas movem-se no duto independentemente das outras, e este escoamento é dito molecular.

O fenômeno pode ser ilustrado pela figura abaixo,

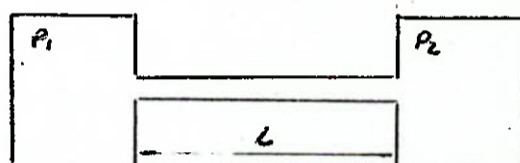


Fig. 2.1.

a qual mostra um grande recipiente à pressão P_1 conectado a outro grande recipiente à pressão P_2 , por um duto de comprimento L . Suponha que P_1 e P_2 são tão baixas que o PML é grande comparado ao diâmetro do duto. Então o número de moléculas indo da região à P_1 para a região à P_2 é proporcional à P_1 e depende somente de L e D , mas é independente de P_2 , porque ocorrem poucas colisões intermoleculares. Da mesma forma o fluxo da região à P_2 para a região à P_1 depende só de P_2 e não de P_1 . Assim o fluxo líquido da região à P_1 é proporcional à $(P_1 - P_2)$, mas mesmo que $P_1 = P_2$ as moléculas ainda estarão movendo-se violentamente da região à P_1 para a região à P_2 e vice-versa.

Como critério para determinar a passagem do escoamento turbulento para o viscoso usamos normalmente o número de Reynolds igual a 2200.

Como
$$\text{Re} = \frac{D \cdot V \cdot \rho}{\mu} \quad , \quad e$$

$$\rho = \frac{m \cdot P}{k \cdot T}$$

$$v = \frac{V'}{A} = \frac{Q/P}{\pi D^2/4} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D^2 \cdot P}$$

temos :

$$\text{Re} = \left(\frac{D}{\eta} \right) \cdot \left(\frac{4Q}{\pi \cdot D^2 \cdot P} \right) \cdot \left(\frac{mP}{k \cdot T} \right) \quad (18)$$

Substituído os valores acima para ar a 20°C, vem:

$$\text{Re} = \frac{Q}{89 \cdot D} \quad (19)$$

onde Q está em microlitros por segundo e D em centímetros

Então,

$$Q > 2 \cdot 10^5 \cdot D \quad \text{escoamento turbulento} \quad (20a)$$

$$Q < 2 \cdot 10^5 \cdot D \quad \text{escoamento viscoso} \quad (20b)$$

A transição de escoamento turbulento para viscoso ocorre de uma maneira relativamente súbita. Esta transição depende do produto $P \cdot V'$ e não da pressão ou da vazão em volume isoladamente.

No entanto a transição de escoamento viscoso para escoamento molecular depende somente da pressão. Como será visto na próxima seção, para um duto circular cuja pressão média é \bar{P} , temos o seguinte critério que estabelece

$$\bar{P} \cdot D > 500 \text{ u cm} \quad , \quad \text{escoam. viscoso} \quad (21a)$$

$$\bar{P} \cdot D < 15 \text{ u cm} \quad , \quad \text{escoam. molecular} \quad (21b)$$

onde D está em cm e \bar{P} em microns de Hg.

Para valores intermediários de $\bar{P} \cdot D$ o fluxo é viscoso e molecular. A transição ocorre de uma maneira gradual.

Aplicando-se ao ar à 20°C, em duto circular de diâmetro D, e já que para o ar o PML = $L = 5/p$ cm, o critério torna-se então :

$$L < \frac{D}{100}, \text{ escoam. viscoso} \quad (22a)$$

$$L > \frac{D}{3}, \text{ escoam. molecular} \quad (22b)$$

Para dutos circulares esta regra tem uma precisão de 10%. Se o duto não for circular usamos a menor dimensão linear da secção transversal como sendo o valor D.

2.5. Escoamento Viscoso Através de Condutos.

A condutância em um duto circular longo para escoamento viscoso é dado por:

$$C = \frac{\eta}{128 \cdot \eta} \cdot \frac{D^4}{L} \cdot \bar{P} \quad (\text{unidades cgs}) \quad (23)$$

onde D é o diâmetro do duto, L é o comprimento \bar{P} é a pressão média e η é a viscosidade do gás

Para o ar à 20°C vem:

$$C = 0,182 \cdot \frac{D^4}{L} \cdot \bar{P} \quad \text{litros/seg.} \quad (24)$$

onde D e L estão em dm e \bar{P} em microns de Hg.

Dos valores de viscosidade de vários gases, obtemos relações simples entre a condutância do ar e de cada gás :

$$\begin{array}{l}
 C_{H_2} = 2,1 C_{ar} \\
 C_{He} = 0,93 C_{ar} \\
 C_{Ne} = 0,58 C_{ar} \\
 C_{N_2} = 1,04 C_{ar} \\
 C_{H_2O \text{ vapor}} = 1,9 C_{ar}
 \end{array}
 \quad (25)$$

Já que $Q = P \cdot V' = (P_1 - P_2) \cdot C$, de (24) vem:

$$\frac{P_1 - P_2}{L} = 5,5 \frac{V'}{D^4} \quad (\text{u/cm})$$

ou

$$V' = 0,182 \frac{P_1 - P_2}{L} \cdot D^4 \quad (\text{litros/seg}) \quad (26)$$

onde P_1 e P_2 são, respectivamente, a pressão a montante e a jusante em micrões de Hg, L é o comprimento do duto em cm e D é o diâmetro do mesmo em cm e V' é a vazão volumétrica em litros por segundo no meio do duto, onde a pressão é \bar{P} .

2.6 Escoamento Molecular em Dutos

Fórmula de Knudsen

Prova-se pela teoria cinética dos gases que a quantidade de gás escoando para fora de um recipiente à pressão P_1 através de uma abertura de área A é:

$$Q_1 = \sqrt{\frac{k \cdot T}{2 \cdot \zeta \cdot m}} P_1 \cdot A \quad (\text{unidades cgs}) \quad (27)$$

válida para uma abertura pequena comparada com as dimensões do recipiente e um gás com PML grande em relação a este recipiente.

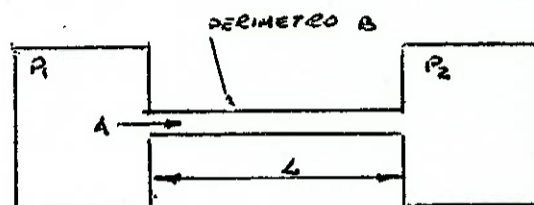


FIG. 2.2.

Consideremos dois grandes recipientes à pressões P_1 e P_2 e conectados por um duto de comprimento L , área transversal A e perímetro B . As pressões são tomadas como tão baixas que as colisões intermoleculares são raras. Então o fluxo líquido de P_1 para P_2 é:

$$Q = (\text{cte}) \cdot \sqrt{\frac{k \cdot T}{2 \cdot m}} (P_1 - P_2) \frac{A^2}{B \cdot L} \quad (28)$$

Esta foi a primeira formulação quantitativa feita por Knudsen, que achou uma constante de proporcionalidade igual a $16/3K$. Assim a condutância em um duto circular é:

$$C = \frac{Q}{P_1 - P_2} = \frac{16 \cdot K}{3} \sqrt{\frac{k \cdot T}{2 \cdot m}} \cdot \frac{A^2}{B \cdot L} \quad (\text{cgs}) \quad (29)$$

onde K é uma constante adimensional e k é a constante de Boltzmann e B é o perímetro do duto.

Para ar a 20°C temos que K (constante adimensional) = 1, e para um PML da ordem de grandeza das dimen -

sões lineares da secção transversal do duto, vem :

$$C = 61,8 \cdot \frac{A^2}{B \cdot L} \quad (\text{litros/seg}) \quad (30)$$

Para um conduto circular longo :

$$C = 12,1 \cdot \frac{D^3}{L} \quad (\text{litros/seg.}) \quad (31)$$

Para um conduto circular curto a condutância de entrada deve ser incluída à do duto :

$$\frac{1}{C_{\text{total}}} = \frac{1}{C_{\text{duto}}} + \frac{1}{C_{\text{entrada}}}$$

$$C_{\text{ent}} = 11,6 \cdot \frac{A \cdot A_0}{A - A_0} = \frac{9,11 \cdot D^2}{1 - (D/D_0)} \quad (32)$$

onde D é o diâmetro do duto e da abertura e D_0 é o diâmetro da região de onde o gás flui para o duto.

Substituindo e resolvendo , vem :

$$C_{\text{total}} = 12,1 \cdot \frac{D^3}{L} \cdot \alpha \quad (\text{litros/seg}) \quad (33)$$

onde α é tabelado abaixo

L/D	α	L/D	α
0,05	0,036	1,0	0,38
0,08	0,055	2,0	0,54
0,10	0,068	4,0	0,70
0,20	0,130	8,0	0,81
0,40	0,210	20,0	0,91
0,60	0,280	40,0	0,95
0,80	0,300	60,0	0,97
		100,0	1,00

2.7. Escoamento Através de Passagens Estreitas

Sabemos pela teoria cinética dos gases que a quantidade de gás escoando por uma passagem estreita quando comparada ao recipiente e ao PML do gás é :

$$Q_1 = \sqrt{\frac{k.T}{2 \cdot m}} (P_1 - P_2) A \quad (\text{cgs}) \quad (34)$$

o que resulta para o ar a 20°C :

$$Q_1 = 11,6 \cdot (P_1 - P_2) \cdot A \quad (\text{ulitros/seg}) \quad (35)$$

Como $C = Q/\Delta P$, vem :

$$C = 11,6 \cdot A \quad (\text{litros/seg}) \quad (36)$$

2.8. Velocidade de Bombeamento.

A velocidade de bombeamento foi definida como $S = Q/P$ onde $Q = P \cdot V'$ é a quantidade de gás escoando através de qualquer plano do sistema.

As bombas mecânicas e de difusão em uso atualmente são caracterizadas por uma velocidade de bombeamento relativamente constante em uma larga faixa de pressão.

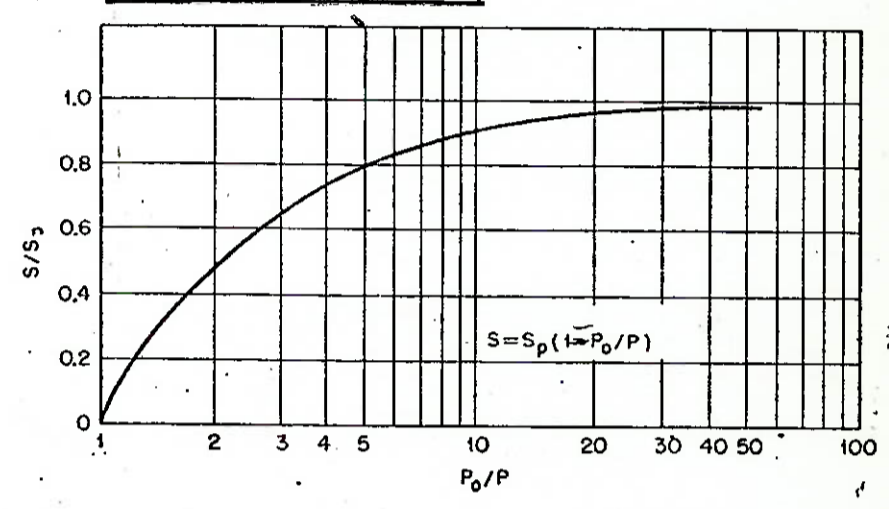
Existem certos processos que fazem com que o sistema não possa ser evacuado acima de um certo valor. Em uma bomba mecânica, em cada ciclo, sempre uma certa quantidade de gás retorna ao sistema. Para os dois tipos de bombas podemos assumir que a taxa de retorno é constante e igual a Q_0 .

Se o retorno é igual a Q_0 , então a taxa de remoção líquida é :

$$Q = S_p \cdot P - Q_0 = S_p \cdot P - \left(1 - \frac{Q_0}{S_p \cdot P} \right) \quad (37)$$

A pressão limite P_0 é alcançada quando $Q=0$, e já que $Q_0 = S_p \cdot P_0$ e $S = Q/P$, vem :

$$S = S_p \left(1 - \frac{P_0}{P} \right) \quad (38)$$



VELOCIDADE DE BOMBAMENTO

FIG. 2.3.

As equações desenvolvidas nesta seção são válidas tanto para escoamento molecular como para escoamento viscoso.

2.9. Taxa de Evacuação

Consideremos um volume V sendo evacuado por uma bomba de velocidade S_p , a qual, é tomada como sendo a velocidade da bomba em qualquer ponto da linha e não na entrada da bomba. Então o escoamento para fora do recipiente é : $Q = P \cdot S_p$. E a pressão cai a uma taxa dP/dt ,

dada por :

$$Q = \frac{d(P.V)}{dt} = -V \cdot \frac{dP}{dt} \quad (39)$$

E temos então :

$$\frac{dP}{P} = \frac{-S_p}{V} \cdot dt \quad (40)$$

Que integrando resulta :

$$P = P_1 \cdot e^{-S_p \cdot t / V} \quad (41)$$

onde : P_1 = pressão para o instante $t = 0$

P = pressão, para o instante t

V = volume que está sendo evacuado pela bomba

A equação (41) é equivalente a :

$$t = \frac{V}{S_p} \cdot \ln \frac{P_1}{P} = 2,3 \cdot \frac{V}{S_p} \cdot \log \frac{P_1}{P} \quad (42)$$

O tempo para que a pressão caia à metade de seu valor é :

$$t_{1/2} = 0,69 \cdot \frac{V}{S_p} = \frac{2}{3} \cdot \frac{V}{S_p} \quad (43)$$

Assim a pressão alcança $1/4 P_1$ no instante $2 \cdot t_{1/2}$ e $1/8 \cdot P_1$ em $t = 3 \cdot t_{1/2}$; genericamente vem:

$$\text{Pressão} = \frac{1}{2^n} \cdot P_1, \text{ no instante } t = n \cdot t_{1/2} \quad (44)$$

2.10. Velocidade de Bombeamento das 'Cold-Traps'.

Se houver uma 'cold-trap' no sistema, as moléculas de vapor condensáveis ficarão presas a ela, e ao mesmo tempo algumas moléculas serão evaporadas, devido ao fato de elas terem um valor finito de pressão de vapor à temperatura da cold-trap. Assim a cold-trap agirá como um estreitamento de área efetiva A , com vapor condensável a pressão P_1 de um lado e P_2 do outro lado, onde P_1 é a pressão parcial do vapor no sistema vácuo na cold-trap e P_2 é a pressão de vapor do material na temperatura da cold-trap. Assim a velocidade de bombeamento é :

$$S = 11,6 \cdot \sqrt{\frac{29}{M}} \left(1 - \frac{P_2}{P_1} \right) \cdot A \quad (\text{litros/seg}) \quad (45)$$

válida para o escoamento molecular, onde A é a área efetiva e M é a massa molecular do vapor condensável.

A equação (45) nos dá a velocidade de bombeamento da cold-trap em função da área efetiva A que só pode ser determinada experimentalmente.

Capítulo 3

O SISTEMA DE VÁCUO

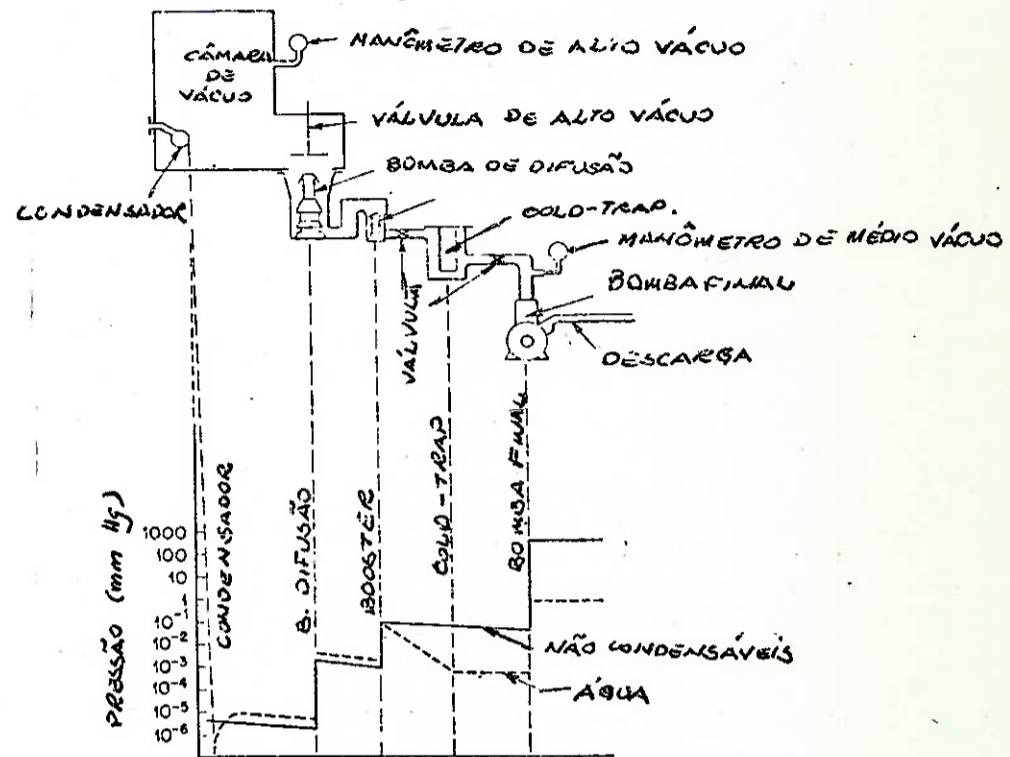
3.1. Elementos do Sistema de Alto Vácuo

O sistema convencional capaz de produzir pressões da ordem de $1 \mu\text{Hg}$ são classificados geralmente como 'sistema de alto vácuo'. Estes sistemas são constituídos por:

1. Uma bomba de alta velocidade e alto vácuo, capaz de manter uma pressão de descarga de 20 ou 30 μHg .
2. Uma bomba de velocidade um pouco menor que a anterior e capaz de manter uma pressão de descarga de 100 μHg .
3. Uma bomba final capaz de manter a descarga à pressão atmosférica.
4. Um condensador funcionando como uma bomba suplementar de vácuo e destinado a remover água e outros materiais condensáveis do sistema. Usa-se normalmente nitrogênio líquido como refrigerante nestes condensadores.
5. Em alguns processos o vapor de água está presente em grandes quantidades e é necessário ter um trava ou armadilha fria (cold-trap) para conter o vapor restante.

Normalmente usa-se como refrigerante gelo seco.

6. Válvulas, ligações e medidores para correta operação do sistema.

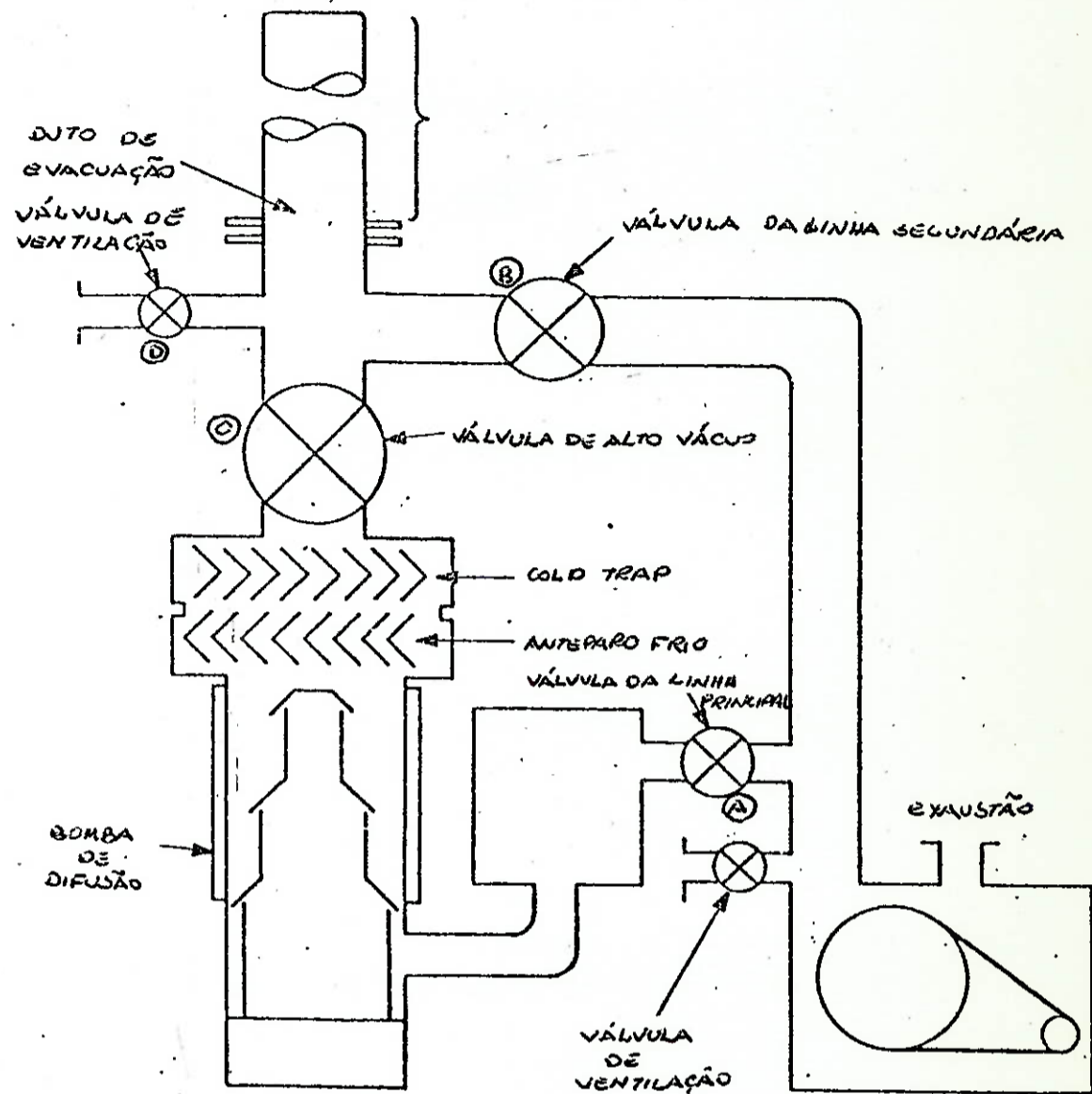


ELEMENTOS DO SISTEMA DE ALTO VÁCUO

FIG. 3.1.

Os sistemas mais modernos dispensam em geral a bomba de médio vácuo (tipo booster, citado no item 2 acima), devido ao alcance da bomba de difusão (alto vácuo) ser compatível com o da bomba final.

Assim o sistema atual é representado na figura abaixo.



ESQUEMA DE UM SISTEMA DE VÁCUO.

FIG 3.2.

A operação deste sistema é feita da seguinte maneira :

1. Fecha-se todas as válvulas.
2. Liga-se a bomba final . Inicia-se o processo de evacuação abrindo a válvula da linha principal (valv. A).
3. Espera-se atingir 10^{-2} torr e fecha-se a válvula da linha principal (valv. A).

4. Abre-se a válvula da linha secundária (valv. B) e espera-se atingir 10^{-1} torr.
5. Fecha-se a válvula da linha secundária (valv.B) , abre-se a válvula da linha principal (valv. A) e liga-se a bomba de difusão (aquecer o óleo até o mesmo entrar em ebulição)
6. Introduzir N_2 líquido na trava fria (cold trap).
7. Fecha-se a válvula da linha principal (valv. A) e abre-se a da linha secundária (valv. B) e verificar se $P \neq 10^{-1}$ torr, caso contrário esperar atingir).
8. Fecha-se a válvula da linha secundária (valv. B) e abre-se a válvula de alto vácuo (valv. C) lentamente e a seguir a válvula da linha principal (valv.A).

Todo o procedimento acima descrito é necessário para evitar que as moléculas de óleo migrem para a câmara de trabalho.

Para se abrir o sistema costuma-se introduzir N_2 lentamente pela válvula de aeração (valv. D). Pode-se introduzir ar, mas existirá a possibilidade de que as moléculas de água da umidade do ar adsorvam-se nas paredes da câmara de trabalho e interfiram no processo na evacuação seguinte.

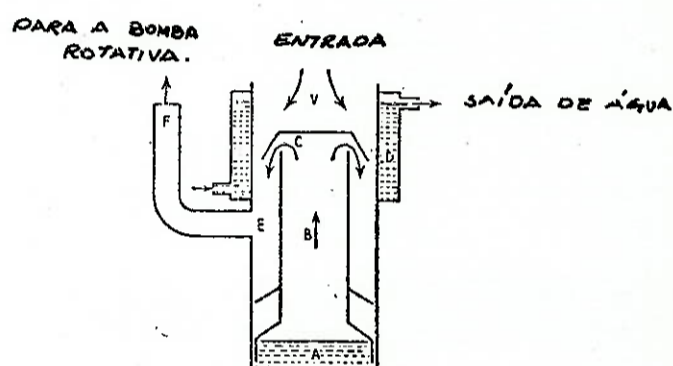
Nos sistemas mais comuns , se não houver grandes vazamentos e o sistema estiver perfeitamente limpo, em aproximadamente 1 hora o sistema estará evacuado (10^{-6} torr).

3.2. A bomba de Alto Vácuo

3.2.1. Bomba de Difusão

Para compreender o princípio de funcionamento é melhor esquecer a palavra 'bomba' e olhar o sistema como uma válvula que possibilita a vazão em um único sentido.

Na base da bomba existe um fluido que normalmente é mercúrio ou um óleo sintético com pressão de vapor da ordem de 10^6 mm Hg à pressão e temperatura ambiente. Nesta parte da bomba existe um sistema de aquecimento de maneira a ferver e produzir vapor do respectivo fluido. (vide figura abaixo).



BOMBA DE DIFUSÃO DE JATO DESCENDENTE.

FIG. 3.3.

O vapor sobe por B e passa através da fresta C de maneira a produzir um jato direcionado às paredes refrigeradas do recipiente da bomba. As moléculas do gás movendo-se pela garganta ficam 'presas' no jato de vapor e soltam-se no espaço E onde elas são removidas por uma bomba ligada a F. Há então uma difusão contínua de gás para a repartição de vapor.

Há uma tendência do vapor retornar de E para V, mas em uma bomba bem projetada isto só é verdade quando a

pressão em \underline{E} excede a pressão em \underline{V} em aproximadamente 100 vezes.

Para pequenas bombas de difusão, por exemplo com condensador de 4 centímetros de diâmetro, a pressão em \underline{F} deve ser da ordem de 0,5 mm Hg. Se a bomba tiver ao redor de 10 centímetros de diâmetro, já é necessária uma pressão em \underline{F} da ordem de 0,01 mm Hg, e se o diâmetro for de 20 a 30 centímetros a pressão em \underline{F} deve ser menor que 0,0001 mm Hg. Com pressões acima destes valores a bomba não poderá operar.

Em geral as bombas mais utilizadas atualmente são as de vapor de óleo. É instalado entre a bomba e o recipiente a ser evacuado um coletor refrigerado (cold trap), com acetona e gelo seco, ou com nitrogênio líquido, de maneira a evitar a contaminação do recipiente sob vácuo.

Para uma bomba de 80 centímetros de diâmetro o diagrama de isotérmicas é mostrado na figura a seguir.

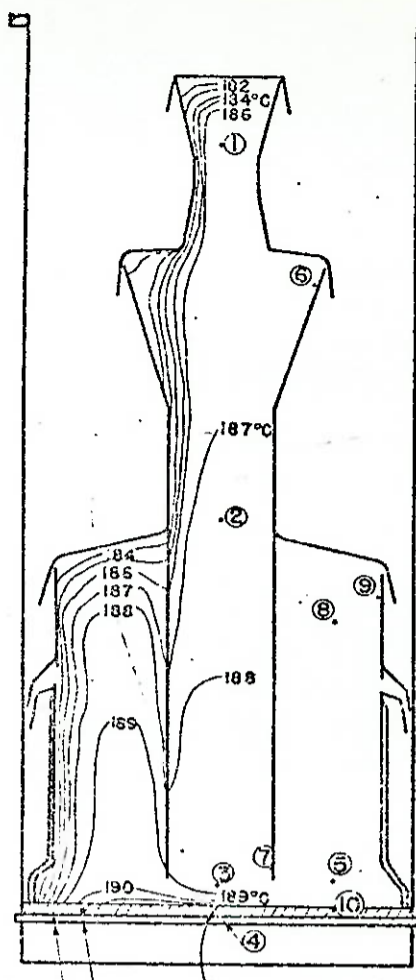
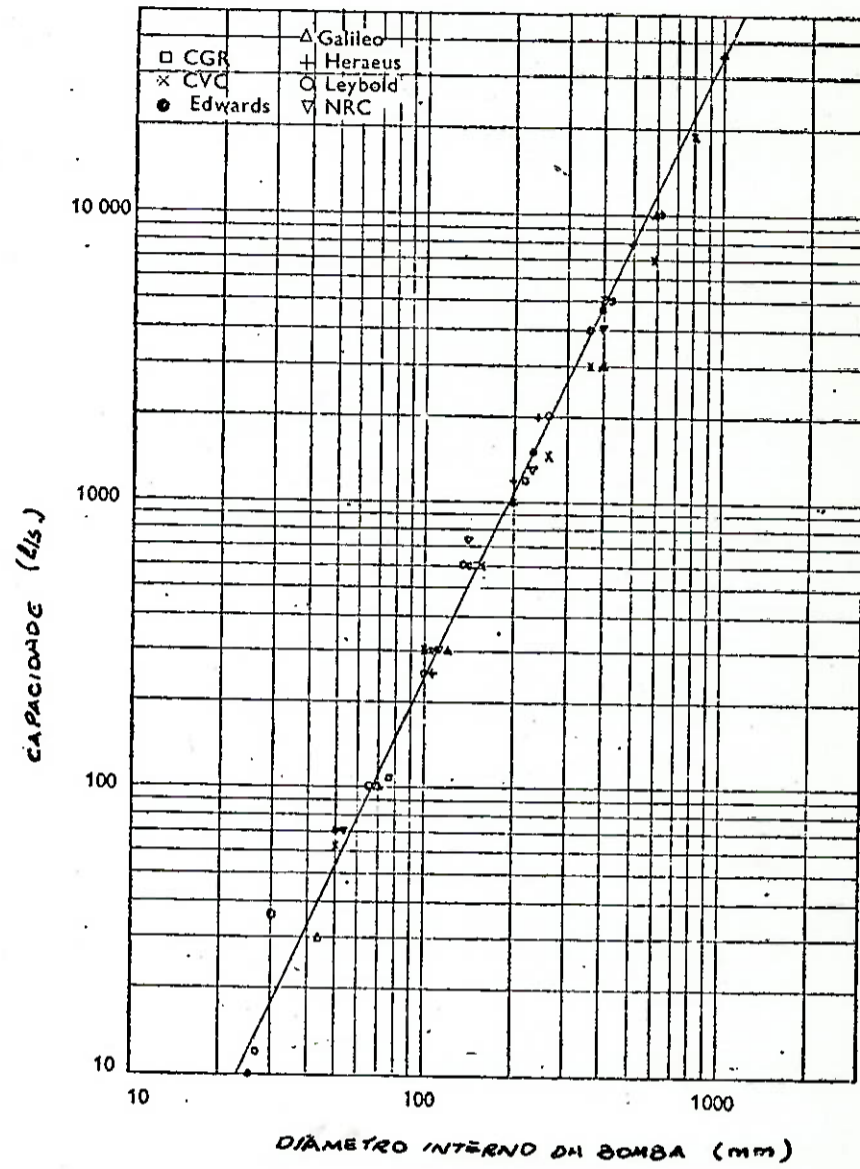


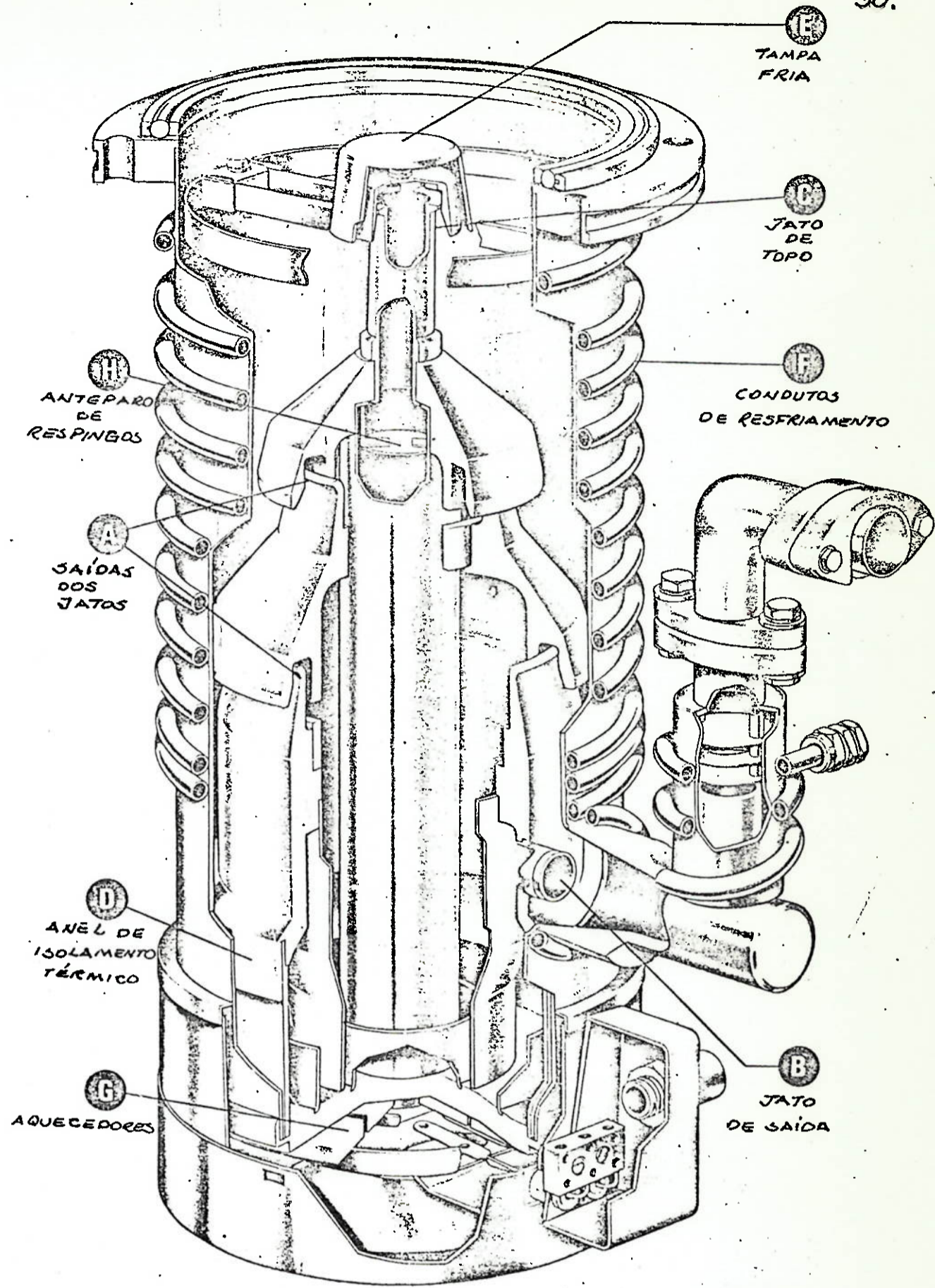
FIG. 3.4.

DIAGRAMA DE ISOTÉRMICAS PARA UMA BOMBA DE 80 CM DE DIÂMETRO

As bombas de difusão de óleo já alcançaram um grau de desenvolvimento que apesar das características construtivas variarem de fabricante para fabricante, as características funcionais permanecem bem próximas. A figura abaixo mostra, por exemplo, a curva de capacidade em função do diâmetro para vários fabricantes.

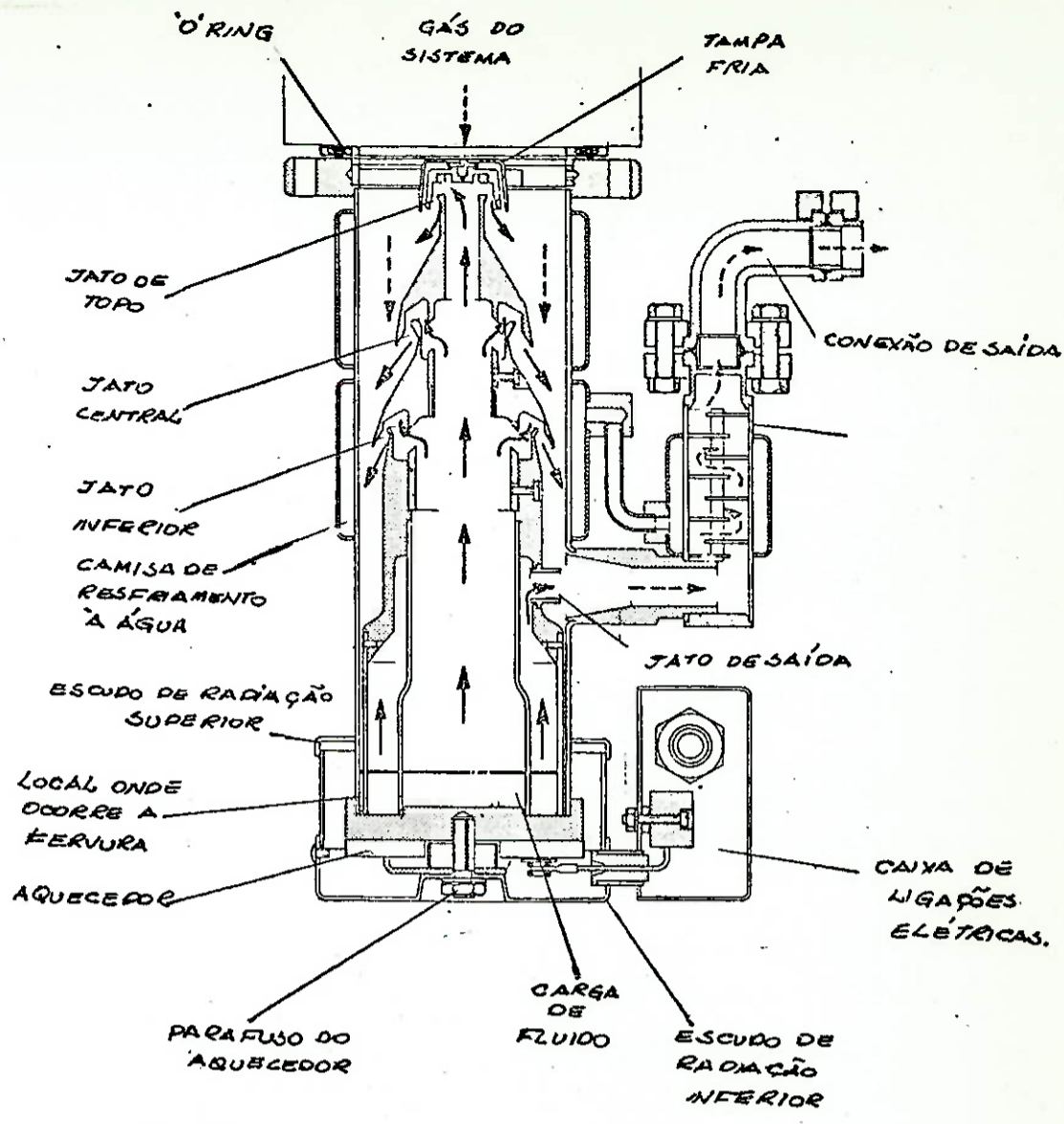


CURVA DE CAPACIDADE DAS BOMBAS COMERCIAIS DE DIFUSÃO DE ÓLEO EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO. FIG. 3.5.



CORTE DE UMA BOMBA DE DIFUSÃO EDWARDS.

FIG. 3.6.



ESQUEMA DE UMA BOMBA DE DIFUSÃO EDWARDS FIG. 3.7.

3.2.2. Bomba Turbomolecular.

O projeto original de uma bomba turbomolecular é devido a Gaede , que se baseou na idéia de Knudsen con- tida em um trabalho sobre a teoria da reflexão de moléculas de gases sobre uma superfície.

O projeto de Gaede consistia em um tambor rota- tivo com uma série de ranhuras conectadas em série. O esta- tor era feito com lâminas projetadas nas ranhuras de ma- neira que as folgas fossem bem pequenas. Começando por uma entrada ao centro haviam duas espirais, uma à esquerda e outra à direita, e a secção transversal da ranhura dimi- nuia em direção ao fim do percurso:

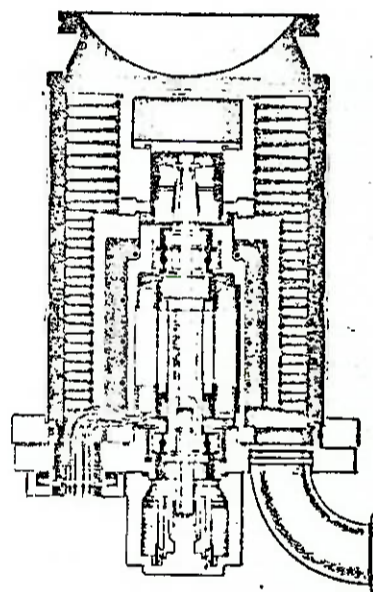
As duas saídas das espirais eram ligadas a uma bomba que fornecia um pré-vácuo de 15 mm Hg. Com um tambor de 18 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de comprimento girando a 4500 rpm, obtinha-se uma pressão de 10^{-3} mm Hg.

Bombas feitas posteriormente atingiam 8000 rpm e pressões da ordem de 10^{-6} mm Hg.

Atualmente existem bombas que giram 36000 rpm e podem atingir pressões da ordem de 10^{-10} mm Hg.

As desvantagens deste tipo de bomba são : a possibilidade de falha devido à dilatação e vibração ocasionadas respectivamente pelo aumento de temperatura e interferência com as partes estáticas.

As vantagens, quando comparadas à bomba de difusão, são o menor tempo de partida e um limite mais alto em vácuo devido à ausência de fluido de trabalho.

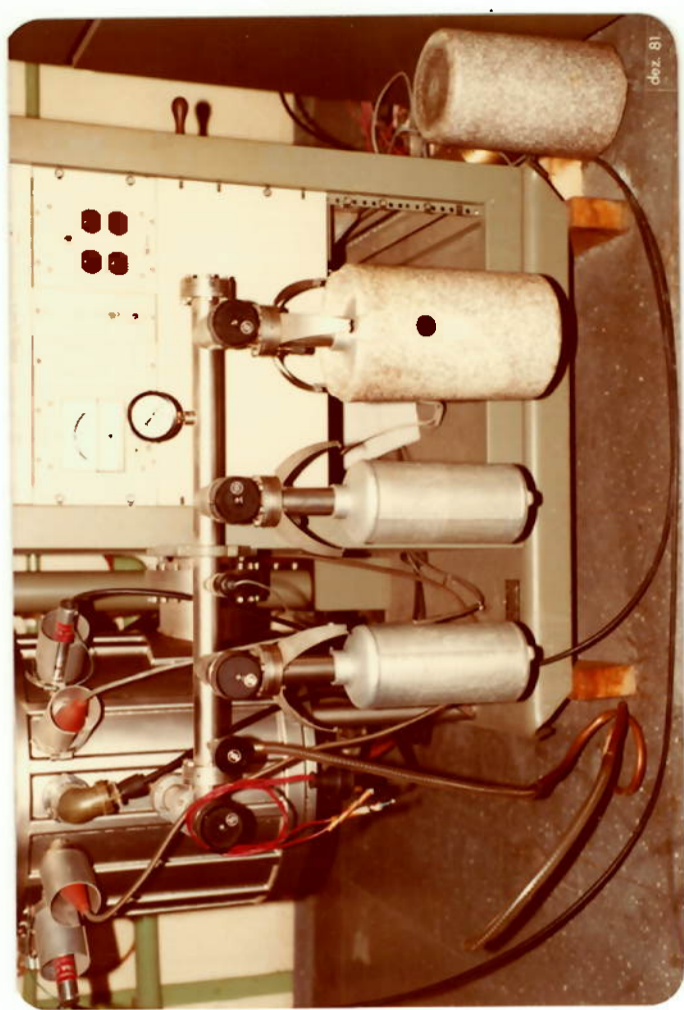


CORTE DE UMA BOMBA TURBOMOLECULAR.

FIG. 3.8.

3.2.3. Bomba de Adsorção.

O fenómeno da adsorção é correntemente empregado na fabricação de válvulas eletrônicas. O material adsorvente mais empregado é o titânio. Infelizmente para pressões muito baixas a eficácia da adsorção é muito débil.



BOMBA DE ADSORÇÃO

FIG. 39.

Existem também bombas de adsorção combinadas com bombas iônicas. As bombas iônicas funcionam da seguinte maneira; por meio de uma fonte de elétrons procura-se ionizar as moléculas restantes em um volume no qual já foi feito um pré-vácuo e através de um campo elétrico fazer com que elas se dirijam ao orifício de descarga. O inconveniente desta bomba é a quantidade de energia gasta para evacuar um dado volume.

No caso das bombas combinadas, utiliza-se a ca -

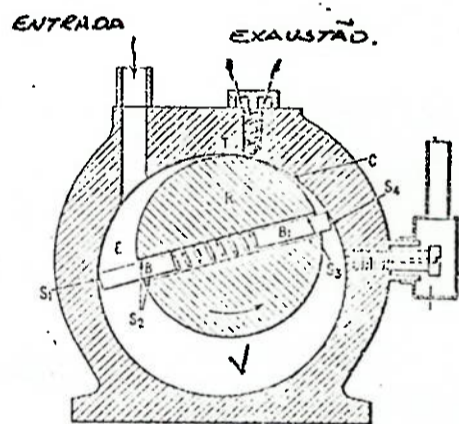
e com uma notável eficiência utiliza-se a bomba iônica para chegar-se até a 10^{-8} mm Hg .

3.3 Bomba de Pré-Vácuo

3.3.1. Bomba Rotativa de Palhetas

A função deste tipo de bomba é prover a baixa pressão necessária para a operação da bomba de alto vácuo, a qual geralmente é do tipo de difusão.

A bomba consiste em um rotor cilíndrico que move-se excentricamente dentro do corpo da mesma, tocando-a em um ponto. Ela tem um eixo central de rotação e duas ou três lâminas pressionadas contra as paredes da bomba. ver figura abaixo.



COORTE DE UMA BOMBA ROTATIVA DE PALHETAS. FIG. 3.10.

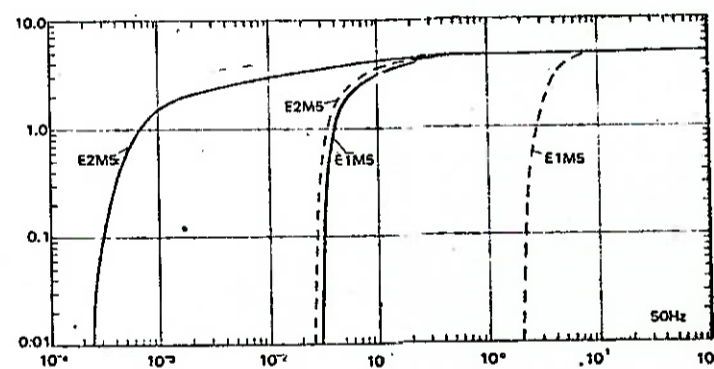
Com a rotação do eixo a lâmina B_1 consegue redu-

zir o volume livre do espaço C à virtualmente zero, e o gás é forçado a sair a uma pressão acima da atmosférica. Tais bombas podem ter um ou dois estágios. Para as bombas de um estágio o pré-vácuo obtido é da ordem de 10^{-1} mm Hg e para as bombas de dois estágios, 10^{-3} mm Hg.

A capacidade destas bombas é dada a pressão atmosférica. A relação entre a capacidade a baixa pressão e a capacidade nominal é chamada 'fator de mérito'. Para as bombas comerciais de um estágio este fator está entre 50 e 65% à 10^{-1} mm Hg. Para uma bomba de dois estágios este fator pode chegar a 70% à 10^{-3} mm Hg.

A rotação de trabalho fica entre 400 e 600 rpm para máquinas pequenas, e 200 a 350 rpm para máquinas de grande porte.

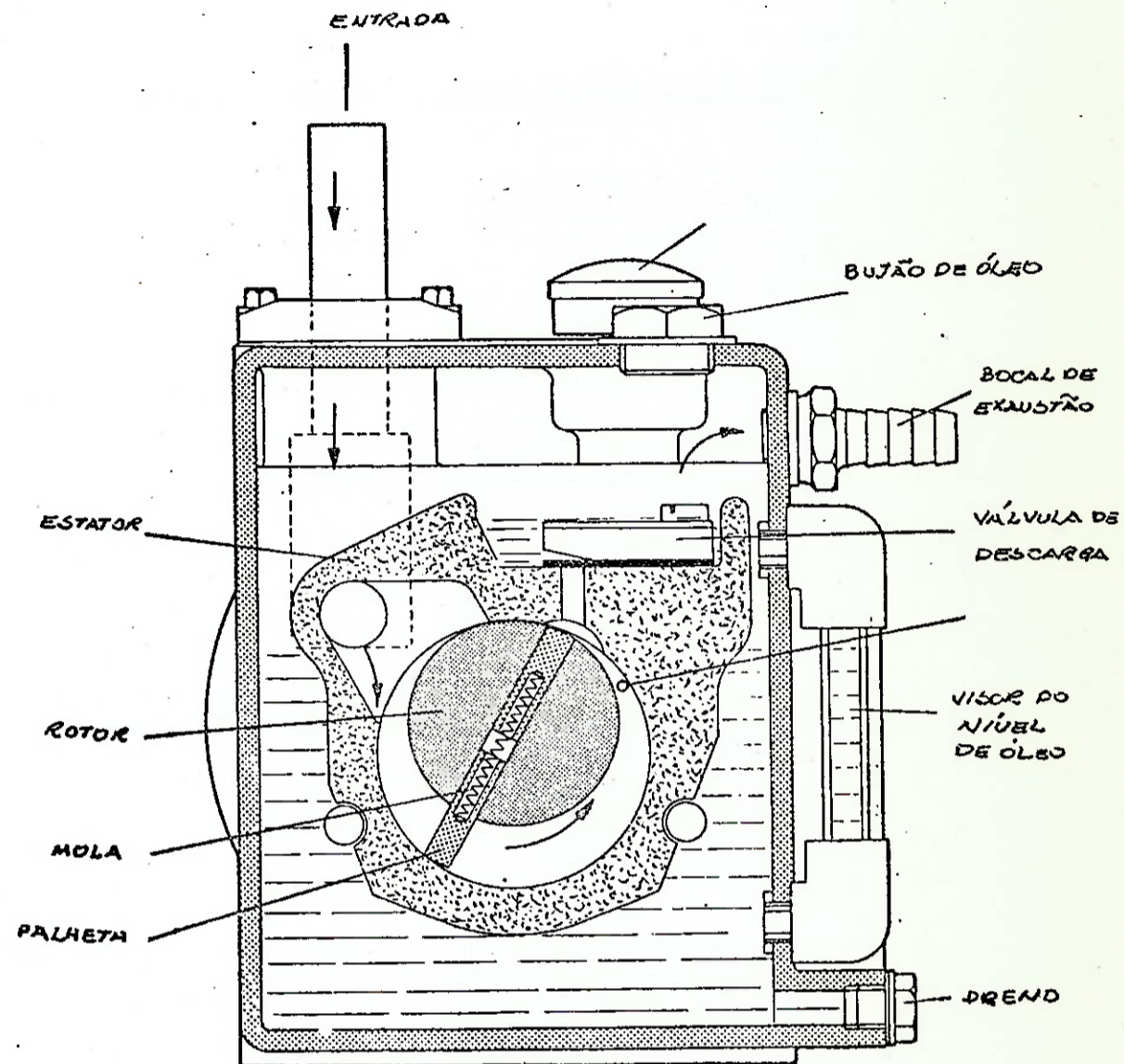
A figura abaixo mostra as curvas de capacidade das bombas E1M5 e E2M5, de um e dois estágios, fabricadas pela Edwards.



CURVA DE CAPACIDADE DAS BOMBAS E1M5 E E2M5 DA EDWARDS.

FIG.3.11

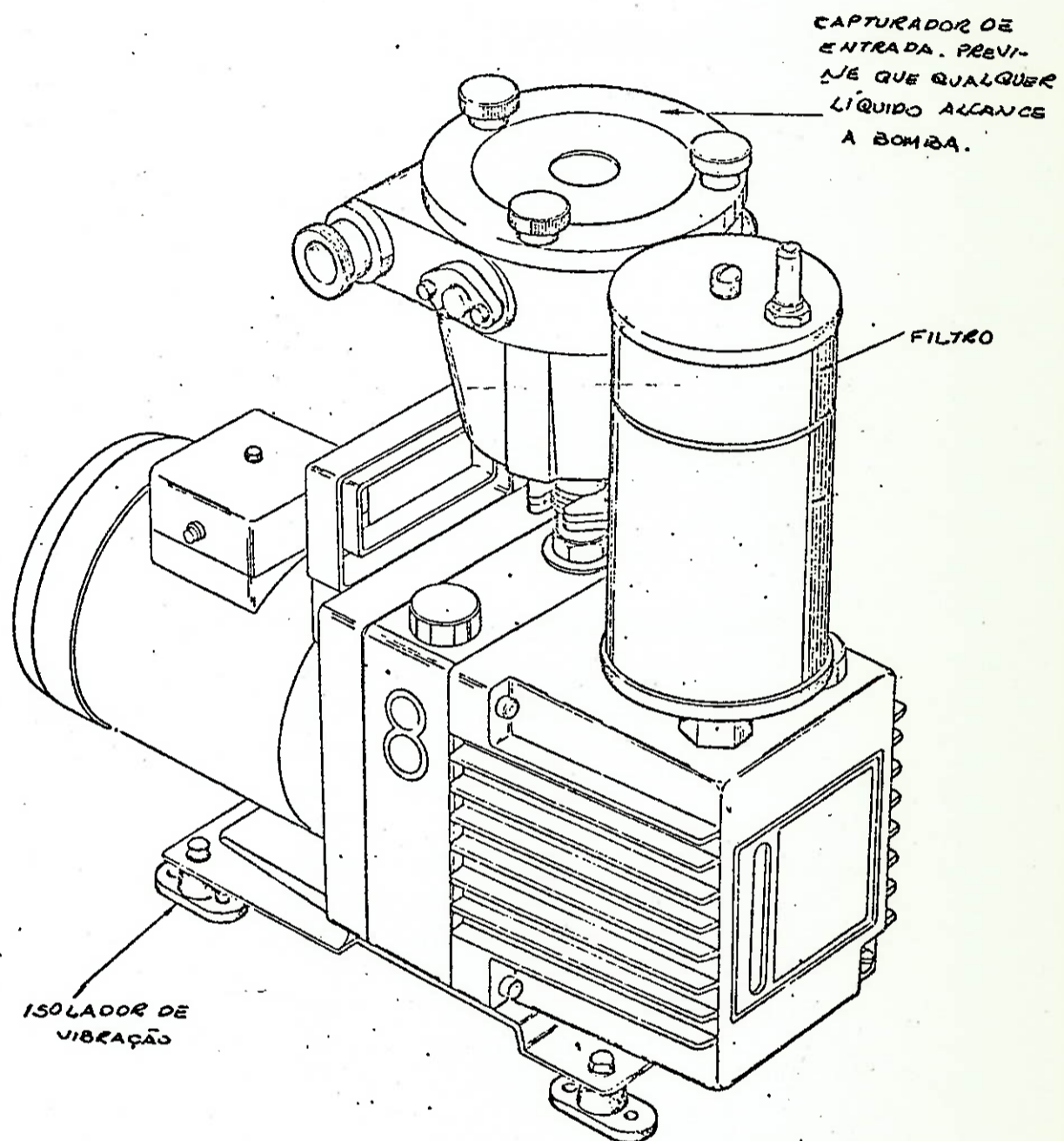
Na figura abaixo podemos ver a disposição genérica dos elementos de uma bomba de palhetas fabricada pela Edwards.



ESQUEMA DE UMA BOMBA ROTATIVA EDWARDS.

FIG.3.12.

Na perspectiva abaixo, está representado o aspecto externo das bombas E1M8/E2M8 também fabricadas pela Edwards.

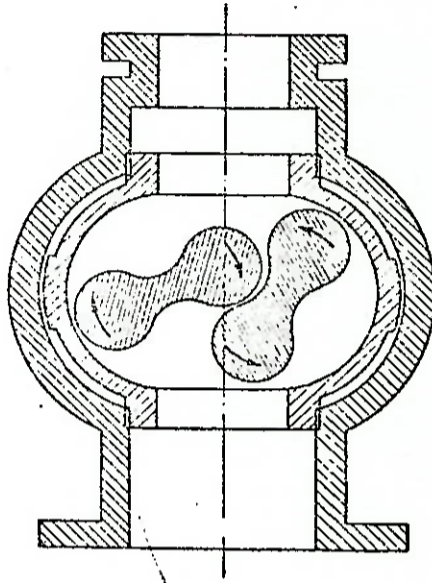


ASPECTO DAS BOMBAS E1M8/E2M8, ROTATIVAS DE PALHETAS, DA EDWARDS.

FIG. 3.13.

3.3.2. Bomba Roots.

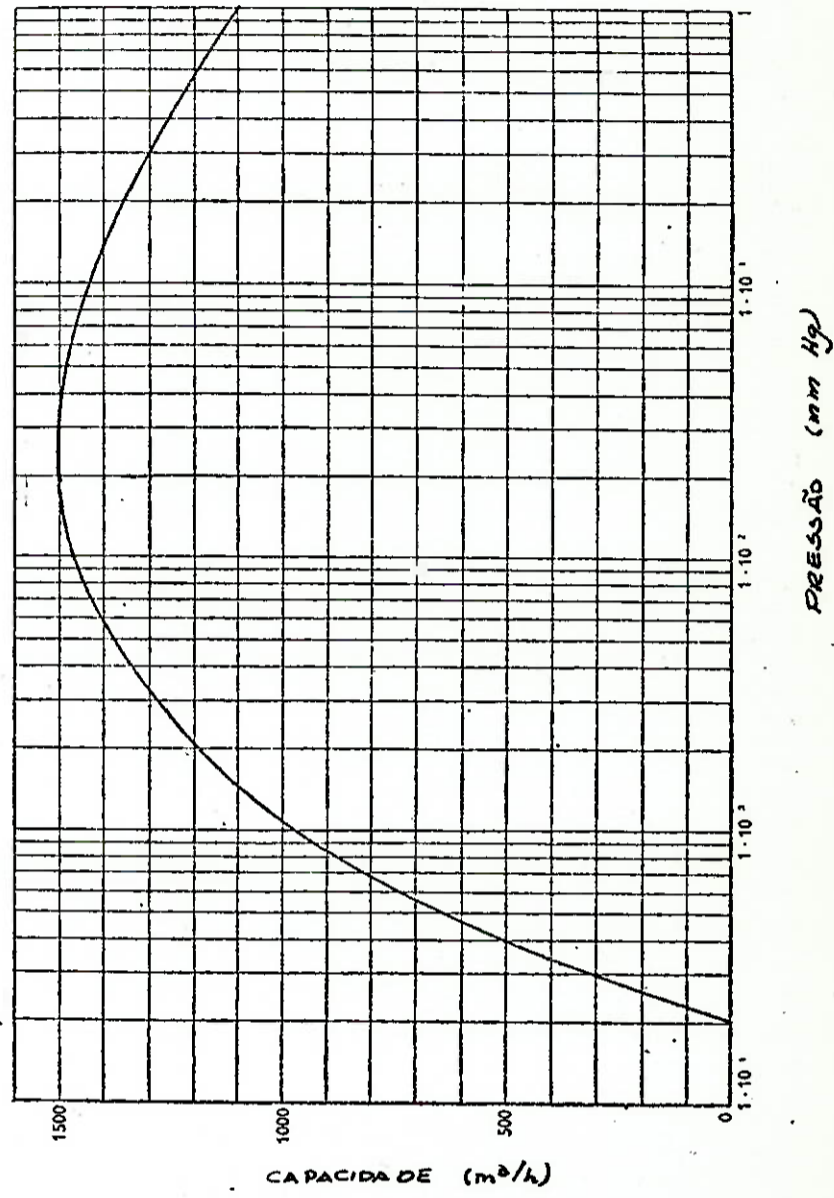
Estas bombas tem dois rotores que giram em sentido inverso um do outro sem que haja deslizamento entre eles, pelo menos não mais do que entre cada rotor e o corpo da bomba. (Ver figura abaixo)



CORTE ESQUEMÁTICO DE UMA BOMBA ROOTS FIG. 3. 14.

Estas máquinas podem girar a grandes velocidades sem que haja excessiva dissipação de energia devido ao baixíssimo atrito entre as partes móveis. A distância existente entre as partes móveis permanece pequena em relação ao PML (percurso médio livre). A faixa de rotação de trabalho desta bomba está entre 1000 e 3000 rpm.

No Brasil a firma Leybold-Heraeus fornece bombas tipo Roots, e na figura a seguir podemos ver a curva de capacidade em função da pressão para o modelo VPR1600.



CURVA DE CAPACIDADE DA BOMBA ROOTS
TIPO VPR 1600 DA HERAEUS.

FIG. 3.15.

3.4. Instrumentos de Medição

Os manômetros de vácuo podem ser divididos em absolutos e indiretos. Nos manômetros absolutos a calibração é feita em função de parâmetros geométricos, como nos manômetros de óleo ou mercúrio, McLeod, etc. Os manômetros indiretos medem características do gás relacionadas com a pressão.

Cada tipo de manômetro funciona em uma determinada faixa de pressão. A tabela abaixo indica a faixa de atuação de vários tipos de manômetros.

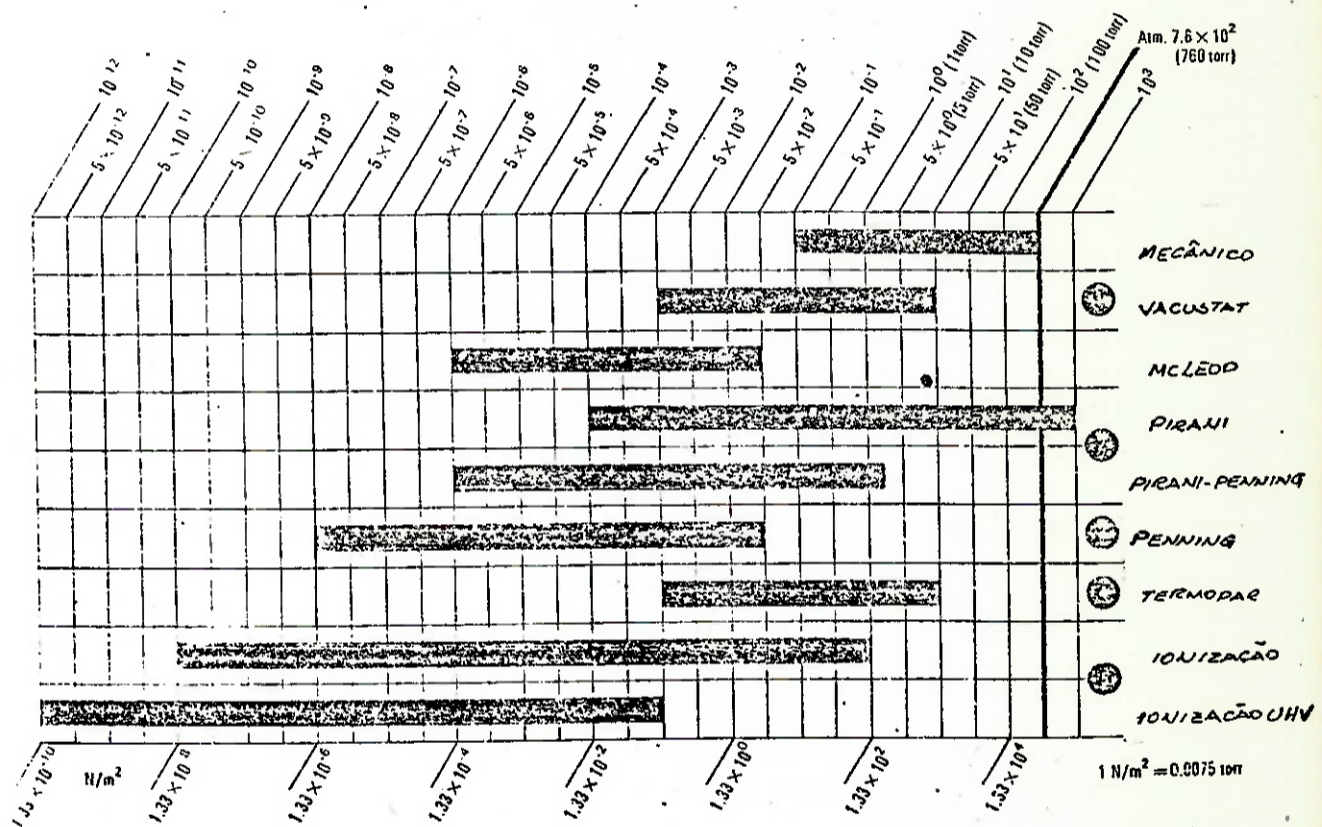


DIAGRAMA DE ALCANCE DOS VÁRIOS TIPOS DE MANÔMETROS FIG. 3. 16.

3.4.1. Manômetros de Mercúrio e Óleo.

Consistem em um tubo de vidro ligado de um lado ao sistema de vácuo e a outra extremidade fica imersa em um recipiente com mercúrio ou óleo aberto à pressão atmosférica.

A mínima pressão que se pode medir com um manômetro de mercúrio é 1 torr com um erro máximo de 10% .

No caso de usar óleo , a pressão em mm de Hg é dada por :

$$P(\text{mm Hg}) = \frac{h_{\text{óleo}} \cdot d_{\text{óleo}}}{13,6}$$

onde : $h_{\text{óleo}}$ = altura da coluna de óleo em mm.

$d_{\text{óleo}}$ = densidade do óleo em gramas/cm³.

Para o óleo , com grandes precauções , pode-se medir pressões de até 0,05 torr.

3.4.2. Manômetros mecânicos.

Nestes manômetros , a pressão exerce uma força sobre o sistema mecânico, causando deformação temporária.

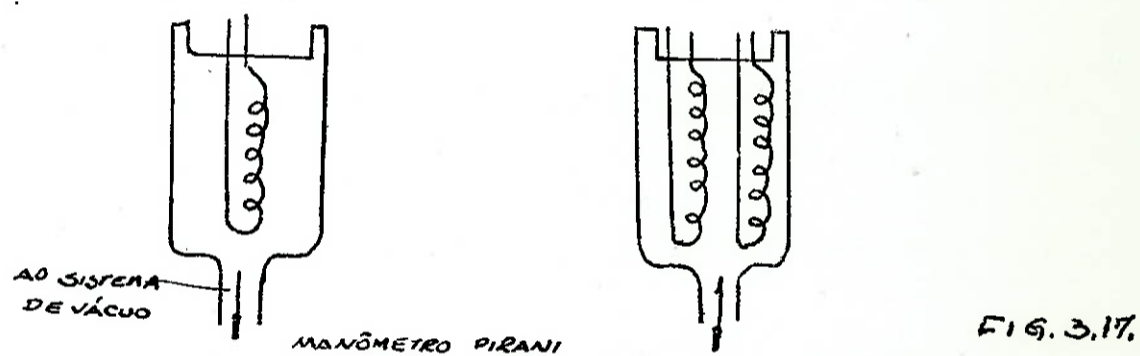
Como, exemplo deste tipo de manômetro temos o manômetro de Bourdon, o qual consiste em um tubo com a forma de um arco fechado em uma extremidade e na outra rigidamente fixado e ligado ao sistema de vácuo. Com a diminuição da pressão o raio de curvatura tende a mudar e, como o lado fechado está ligado a um ponteiro, obtém-se a indicação em uma escala convenientemente posicionada.

Este manômetro atua com baixa precisão na faixa de 760 a 10 mm Hg.

3.4.3 Manômetros de Termo-condutividade.

Estes manômetros medem a transferência de energia térmica através de gases rarefeitos.

Como exemplo deste tipo de manometro temos o manometro Pirani. Este consiste em um tubo de vidro ou metal, fechado de um lado com um diametro de 1 a 2 centímetros. O lado aberto está ligado ao sistema de vácuo. Dentro do tubo há um filamento de tungstenio de 0,005 a 0,01 mm de diametro e 20 a 30 centímetros de comprimento, enrolado em espiral conforme figura abaixo.



Mantém-se o filamento a aproximadamente 200°C. Coloca-se ao lado do filamento outro filamento compensador. Os dois filamentos mais duas resistências formam a ponte de Wheatstone que servirá para medir indiretamente a pressão. Este manômetro mede a variação da resistência devido à variação da temperatura com a pressão.

O manômetro de Pirani é geralmente o mais usado dada a sua relativa robustez e facilidade de leitura.

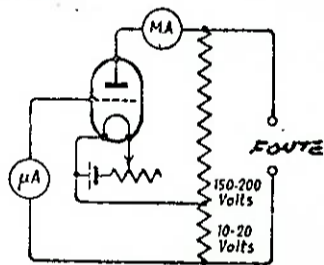
3.4.4. Manômetros de Ionização,

Estes manômetros operam produzindo um feixe de elétrons, o qual tem a finalidade de ionizar algumas moléculas do gás.

Como em pressões muito baixas este feixe produz um número de íons proporcional à concentração molecular e, como a pressão do gás é diretamente proporcional à concentração molecular, a corrente de íons devidamente calibrada pode dar uma medida da pressão.

Os manômetros de ionização trabalham com boa precisão na faixa de 10^{-3} a 10^{-6} mm Hg.

Na sua forma mais simples este manômetro consiste em uma válvula triodo. O catodo fornece os elétrons que são acelerados pela grade e pelo anodo. No caminho os elétrons ionizam moléculas de gás com as quais eles colidem, e os íons carregados positivamente dirigem-se ao eletrodo de potencial negativo.



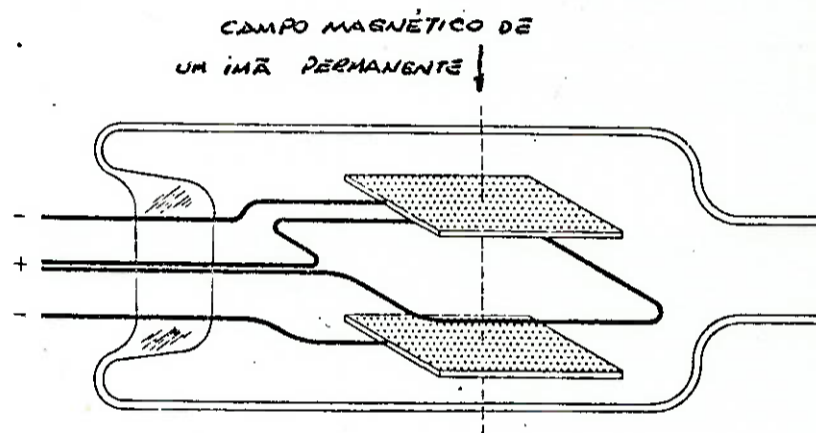
MANÔMETRO DE
IONIZAÇÃO.

FIG. 3.18.

O manômetro de ionização tipo Phillips opera pelo mesmo princípio, mas o circuito elétrico é superior e o manômetro mais robusto. A válvula é do tipo diodo. O catodo é de zirconio ou tório, os quais são chamados de catodos de descarga fria, pois emitem elétrons somente sob a influência do potencial do anodo.

3.4.5. Manômetros de Descarga. (Penning).

Nestes manômetros os elétrons são produzidos por meio de uma tensão bem alta (2 KV). Como não é possível manter a ionização em pressões muito baixas Penning colocou um campo magnético de 400 G paralelo ao campo elétrico para aumentar o percurso dos elétrons. Estes giram em uma espiral perpendicular ao campo magnético entre os catodos até chegar ao anodo. Desta maneira o percurso médio livre é grandemente aumentado e há uma ionização contínua, constatável por uma emissão luminosa. Os íons positivos não são afetados pelo campo magnético devido à sua grande massa. Assim a corrente de íons positivos é proporcional à pressão.



MANÔMETRO PENNING.

FIG 3.19.

Este manômetro tem a grande vantagem de ser robusto e fácil de operar, e não é danificado por pressões elevadas.

No entanto tem como desvantagem a baixa precisão, a sensibilidade diferente para gases diferentes e certas instabilidades nas leituras devido às oscilações eletrônicas.

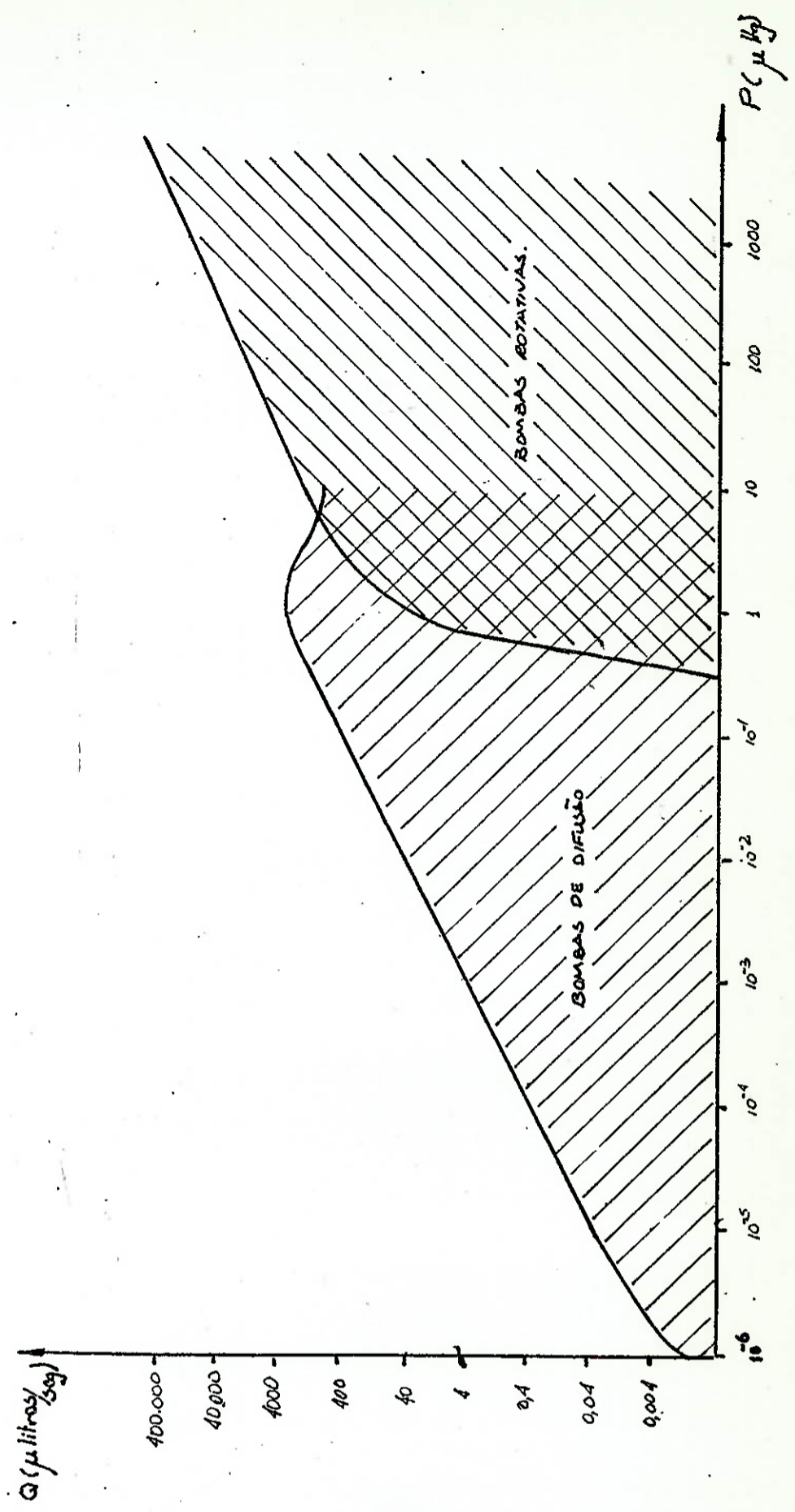
Capítulo 4

EQUIPAMENTOS DE ALTO VÁCUO DISPONÍVEIS NO BRASIL

Existem duas empresas, as quais tem matrizes fora do Brasil, e que são as principais fornecedoras de equipamentos de alto vácuo em nosso país.

As duas empresas fornecem praticamente todos os equipamentos disponíveis no mercado internacional, pois parte dos equipamentos é fabricada aqui, parte é apenas montada e parte é totalmente importada.

Procuraremos dar nos parágrafos seguintes uma listagem relativamente completa dos equipamentos fornecidos por estas empresas e algumas de suas principais características, com a finalidade de orientar o projetista do equipamento de vácuo.



ESPECTRO VAZÃO POR PRESSÃO COBERTO PELAS
 VÁRIAS BOMBAS DISPONÍVEIS NO MERCADO
 BRASILEIRO.

FIG. 4.1.

4.1. Edwards do Brasil.

4.1.1. Bombas de Pré-Vácuo (Backing Pump)

A Edwards fornece bombas com capacidade na faixa de 2,7 a 465 m³/h, podendo ser de um ou dois estágios.

Modelo	Estágios	Velocidade de Bomb. (m ³ /h)	Vácuo Máximo (mbar)	Conexão de Entrada	Conexão de Saída	Peso (Kg)	Motor (Kw)
ELM5	1	6,0	3.10 ⁻²	KP25 flange 15mm	Bocal 15mm	16,8	0,25
E2M5	2	6,0	5.10 ⁻⁴	KP25 flange 15mm	Bocal 15mm	19,6	0,37
E2M2	2	2,9	5.10 ⁻⁴	KP25 flange 15mm	Bocal 15mm	18,2	0,25
ELM8	1	9,8	3.10 ⁻²	KP25 flange 15mm	Bocal 15mm	20,0	0,37
E2M8	2	9,8	2,5.10 ⁻⁴	KP25 flange 15mm	Bocal 15mm	22,8	0,55
EDM2	2	13,0	1,3.10 ⁻⁴	KP25 p/ braçad.	Bocal 15mm	36,0	0,55
EDM20	2	20,0	1,3.10 ⁻⁴	KP25 p/ braçad.	Bocal 15mm	37,0	0,75
ELM40	1	44,0	3.10 ⁻²	KP40 flange	Flange 25mm	70,5	1,50
E2M40	2	44,0	2.10 ⁻⁴	KP40 flange	Flange 25mm	72,0	1,50
ELM80	1	90,0	5.10 ⁻²	KP40 flange	Flange 25mm	95,0	3,00
E2M80	2	90,0	2.10 ⁻⁴	KP40 flange	Flange 25mm	105,0	3,00
ELM175	1	135,0	5.10 ⁻²	ISO63 flange	ISO40 flange	194,0	4,00
E2M175	2	135,0	2.10 ⁻⁴	ISO63 flange	ISO40 flange	200,0	4,00
ELM275	1	211,0	5.10 ⁻²	ISO63 flange	ISO40 flange	220,0	6,00
E2M275	2	211,0	2.10 ⁻⁴	ISO63 flange	ISO40 flange	225,0	6,00
ES7500	1	400,0	5.10 ⁻²	ISO100 flange	Rosca 2 1/2" BSP	1000,0	11,00

TAB. A.1.

4.1.2. Bomba de Alto Vácuo.

As bombas de alto vácuo são todas de difusão, com capacidade de 10 a 45000 l/s, tendo óleo como fluido de trabalho.

Modelo	Estágios	Velocidade de Bomb. (ar) (l/s)	Vácuo Máximo (mm Hg)	Bomba Final Mínima (l/min)	Conexão de Saída	Aquecedor (W)	Peso (Kg) *	Peso (Kg) **
E01	2	10	10 ⁻⁷	30	Acopl. 1/2"	175	3,18	1,24
E203D	3	90	5.10 ⁻⁷	35	Acopl. 1/2"	350	-	3,2
E02	4	150	10 ⁻¹⁰	50	Acopl. 1/2"	400	8,2	4,5
403A	3	300	10 ⁻⁸	150	Acopl. 21,4mm	500	-	18
E 04	4	600	10 ⁻¹⁰	110	Flange 1"	850	17	10
E06	4	1300	10 ⁻¹⁰	200	Acopl. 1"	1350	-	18
E09	4	2500	10 ⁻¹⁰	480	Acopl. 1"	2250	-	27
E012	4	4200	10 ⁻¹⁰	800	Acopl. 2"	3750	-	54
E020/4	4	16000	10 ⁻⁶	4800	Flange 150mm	12250	-	106
F3605	5	45000	3.10 ⁻⁸	2500	União 2"	15000	-	454

* Refrigeradas à ar

** Refrigeradas à água.

4.1.3. Fluidos de trabalho.

Os fluidos usados tanto na bomba de difusão como na rotativa podem ser: óleos minerais aditivados, óleos a base de silicone (dimetil siloxanes ou fenil metil siloxanes), óleos a base de fluor (perfluoro polyethers) ou compostos orgânicos sintéticos.

Óleos Edwards	
Modelo	Características
APIEZON A, B e C	Destilado de óleos minerais. Vácuo máximo 10^{-5} a 10^{-7} mbar.
SILICONE 702, 704/F4 e 705/F5	Fluido sintético, polímero orgânico de silicone. Vácuo máximo 10^{-5} a 10^{-9} mbar.
SANTOVAC	Éter polifenílico, desenvolvido inicialmente para veículos espaciais, utilizado em equipamentos de ultra alto vácuo, com alta limpeza. Vácuo máximo 10^{-9} mbar. Usado em microscópios eletrônicos, espectrometro de massa, etc.
L9	Material sintético com base em naftaleno, ideal para usos onde o silicone não é tolerado (pois este forma filmes isolantes). Vácuo máximo $5 \cdot 10^{-5}$ mbar.

TAB. 4.3.

4.1.4. Instrumentos de medida de vácuo.

A Edwards fornece os vários tipos de medidores de vácuo de maneira a cobrir toda a faixa de pressões.

Unidades de controle.		
Tipo	Modelo	Faixa de atuação
Por ionização	5M	10^{-3} a 10^{-11} torr
Por ionização	Ion 7	10^{-3} a 10^{-10} torr
Penning	Penning 8	10^{-2} a 10^{-7} torr
Termopar	Termocouple 1	3 a 10^{-3} torr
Pirani	10	3 a 10^{-3} torr
Pirani	8-1	10 a 10^{-3} torr
Pirani	8-2	1 a 10^{-3} torr
Pirani	9A	500 a 10^{-3} torr

TAB. 4.4.

Manômetros		
Tipo	Modelo	Faixa de atuação
Mecânico	Serie CG3	0 a 760 torr
McLeod	Vacustats	1 a 10^{-3} torr
McLeod	HLSA	$4 \cdot 10^{-2}$ a 10^{-6} torr

TAB. 4.5.

4.1.5. Outros acessórios.

A Edwards fornece ainda : cold traps, válvulas borboleta e espaçadores nas seguintes medidas : 1" , 2" , 4" , 6" , 9" , 12" , 16" , 20" , e 36" .

4.1.6. Sistema Diffstak.

Este sistema desenvolvido pela empresa consiste em uma bomba de difusão que proporciona vácuos bem altos, com elevado grau de limpeza, comparável ao das bombas turbomoleculares. A Edwards garante que além de ser uma bomba mais barata que a turbomolecular, sob certos aspectos ela é superior a última, principalmente no bombeamento de gases leves, como o hidrogênio.

O sistema diffstak é constituído por bombas com flanges padronizadas, sendo portanto um sistema onde praticamente todos os componentes são compatíveis, podendo formar assim, vários sistemas de vácuo diferentes. A Edwards chama o sistema diffstak de "easy to built".

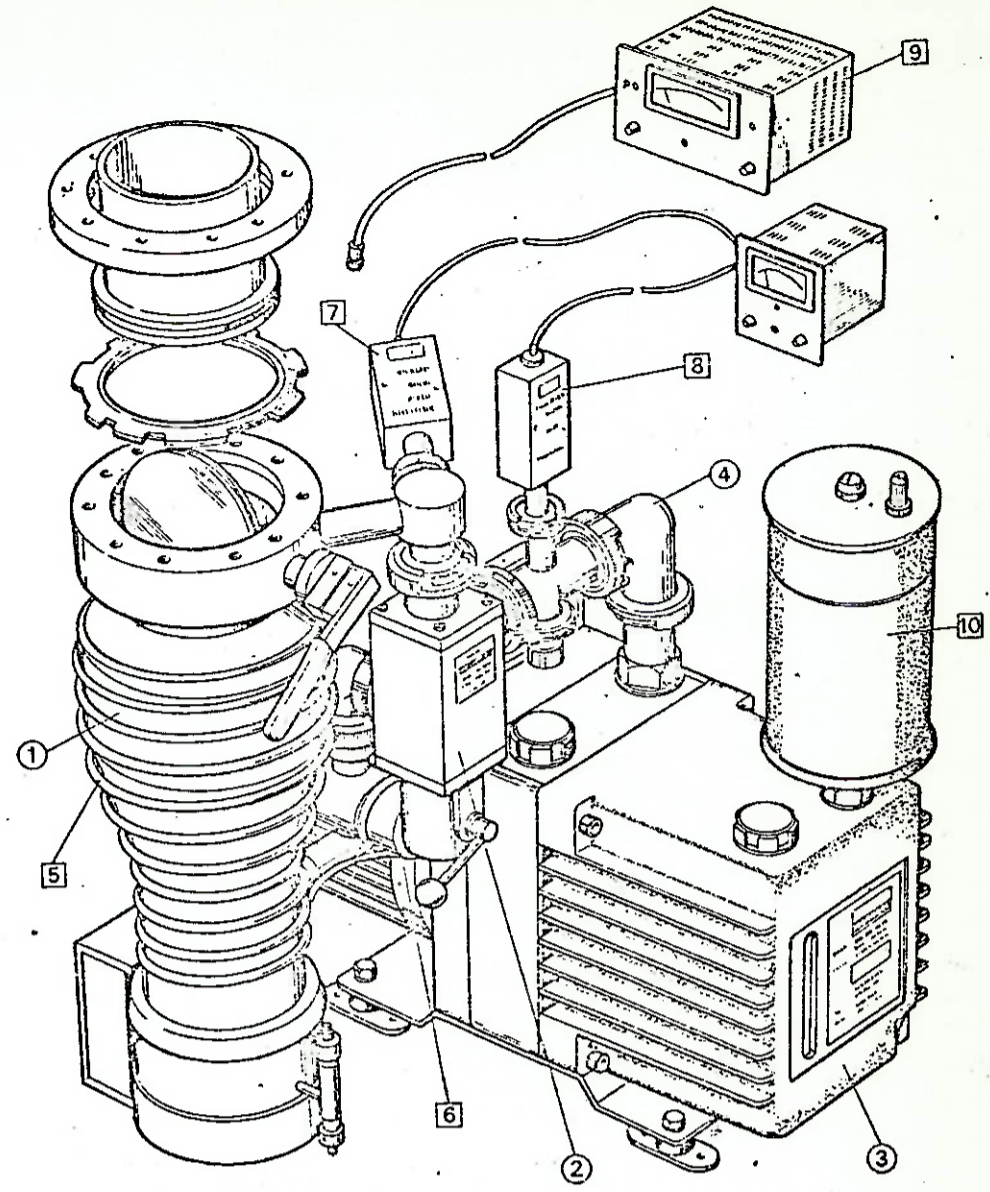


FIG. 4.2.

Sistema Diffstak

- 1 Diffstak Mk2 incluindo Co-seal
- 2 Válvula secundária
- 3 Bomba final (rotativa)
- 4 Componentes de acoplamento
- Ítems opcionais para completar o sistema
- 5 Interruptor térmico do fluxo de água
- 6 Interruptor térmico 'pump ready'
- 7 Manometro da linha secundária.
- 8 Manometro próximo à bomba final
- 9 Manometro de ionização na linha de alto vácuo.
- 10 Filtro

4.2. Leybold-Heraeus.

4.2.1. Bombas de Pré Vácuo. (Backing Pump).

As bombas fornecidas pela Leybold abrangem uma larga faixa de pressões e de vazões. Quanto ao aspecto construtivo elas podem ser de palhetas, de pistão, trocoides ou roots.

Série	Características	Vel. de bomb. (m ³ /h)	Vácuo máx. (mbar)	Diferença de pressão
Minni-A	Rotativa de palhetas	1,0	0,8	-
Trivac S	Rot. de palhetas, 1 estágio	3,2 até 76	$< 2,5 \cdot 10^{-2}$	-
Trivac D	Rot. de palhetas, 2 est.	3,2 até 76	$< 2,5 \cdot 10^{-4}$	-
Trivac, vedadas p/He	Rot. de palhetas, 1 est.	10 a 20	10^{-5}	-
Vacompac	Rot. de palhetas	40 a 160	1	-
Monobloco E	Rot. de pistão, 1 est.	170 a 290	$2,5 \cdot 10^{-2}$	-
Monobloco DK	Rot. de pistão, 2 est.	115 e 225	$1,5 \cdot 10^{-4}$	-
Trocóideas	P/ vácuo grosso e médio	460 a 670	$6,5 \cdot 10^{-2}$	-
Ruvac WA	Roots, 1 estágio	153 a 2050	-	130 mbar
Ruvac WS	Roots, 1 estágio	153 a 2050	-	80 "
Ruvac WS	Roots, 2 est.	153 a 2050	-	133 "
Ruvac RA	Roots, 1 est.	3740 a 13000	-	93 "

* Máxima diferença de pressão admissível para funcionamento longo.

4.2.2. Bomba de Alto Vácuo.

Modelo	Velocidade de Bomb.(l/s)	Vácuo Máx(mbar)	Características
Série Leyboldiff	30 a 1000	$6,7 \cdot 10^{-7}$ a $1,3 \cdot 10^{-9}$	Difusão, refri- geradas a água
Série DI	3000 a 50000	$6,7 \cdot 10^{-7}$ a $1,3 \cdot 10^{-9}$	Difusão, refri- geradas a água
Série Turbovac	220 a 3500	$< 10^{-10}$	Turbomoleculares, alguns modelos com mancais magnéticos

TAG. 4.7.

4.2.3. Instrumentos de medida de vácuo

Manômetros

Tipo	Caraterísticas	Precisão	Alcance*
Bourdon	Mecânico	$\pm 1 \%$	0 a 1020
Diavac	De membrana	0,3 a 1%	0,1 a 1000
Termovac	De cond. térmica	$\pm 1 \%$	10^{-3} a 760
Penningvac	De ionização, cat. frio	-	10^{-9} a 10^{-2}
Ionivac	De ionização, cat. quente	$\pm 10\%$	10^{-10} a 1
Ionivac	P/ultra alto vácuo	$\pm 10\%$	10^{-12} a 10^{-3}

* em mbar .

TAB. 4.8.

Capítulo 5

EXEMPLO DE CÁLCULO PARA UM SISTEMA REAL

Procuraremos neste capítulo redigir um exemplo de cálculo de um sistema de vácuo para um caso real.

Para tanto, inicialmente descreveremos dois sistemas que podem ser encontrados no laboratório de microeletrônica do departamento de engenharia elétrica da Escola Politécnica da USP.

5.1. Detetor de defeitos cristalinos.

Trata-se de um aparelho destinado a inserir átomos de Boro em cristais de silício, de maneira a detectar falhas na estrutura do mesmo.

Neste caso o recipiente de trabalho tem uma forma diversa dos sistemas convencionais. O recipiente de trabalho é um conduto de 150 mm de diâmetro por três metros de comprimento. O projetista optou também por um arranjo não convencional, colocando dois sistemas de vácuo ao longo do conduto: (ver esquema a seguir).

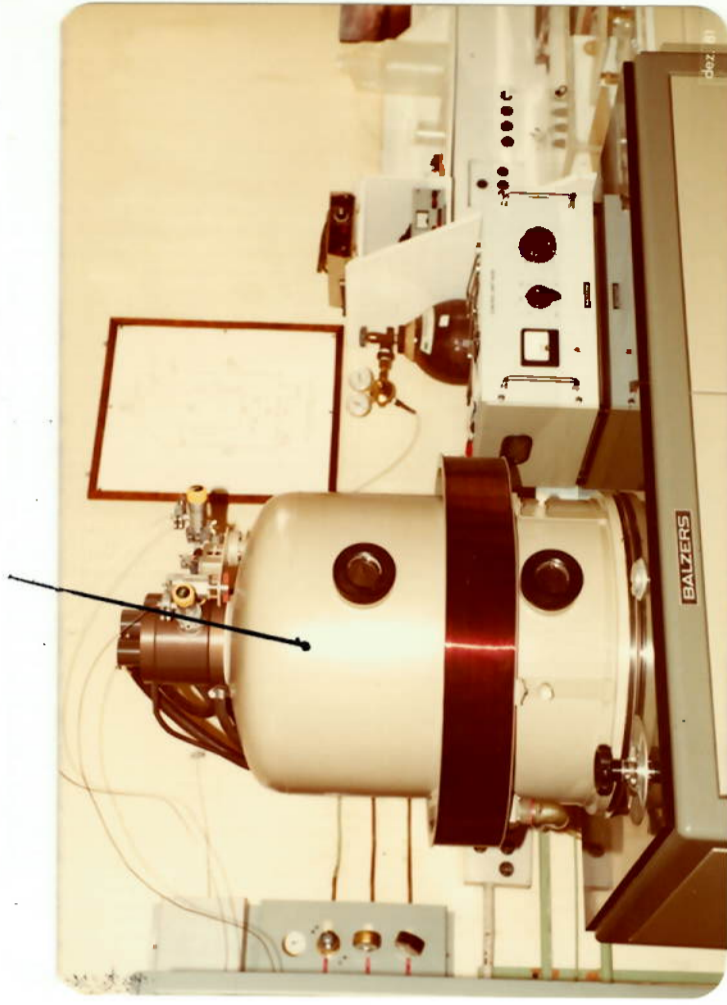
59

5.2. Metalizador à Vácuo.

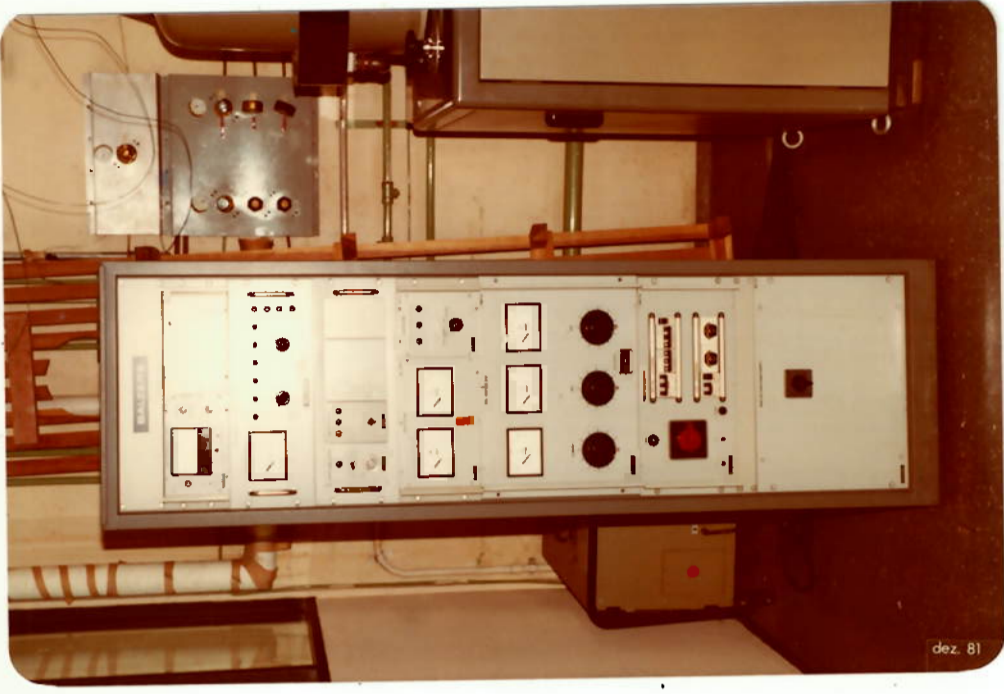
Este é um equipamento de uso extremamente generalizado, sendo que só neste laboratório existem quatro equipamentos com essa finalidade.

As fotos a seguir mostram detalhes de uma máquina de procedência Suíça (BALZERS) na qual todo o procedimento de evacuação descrito no capítulo 3 é feito automaticamente. Para tanto todas as válvulas são acionadas por solenóides. Numa das fotos a seguir também é possível ver o produto final de uma metalização, um circuito de ouro em uma pastilha de cerâmica para uso em aparelhos de microondas.

CÂMARA DE TRABALHO

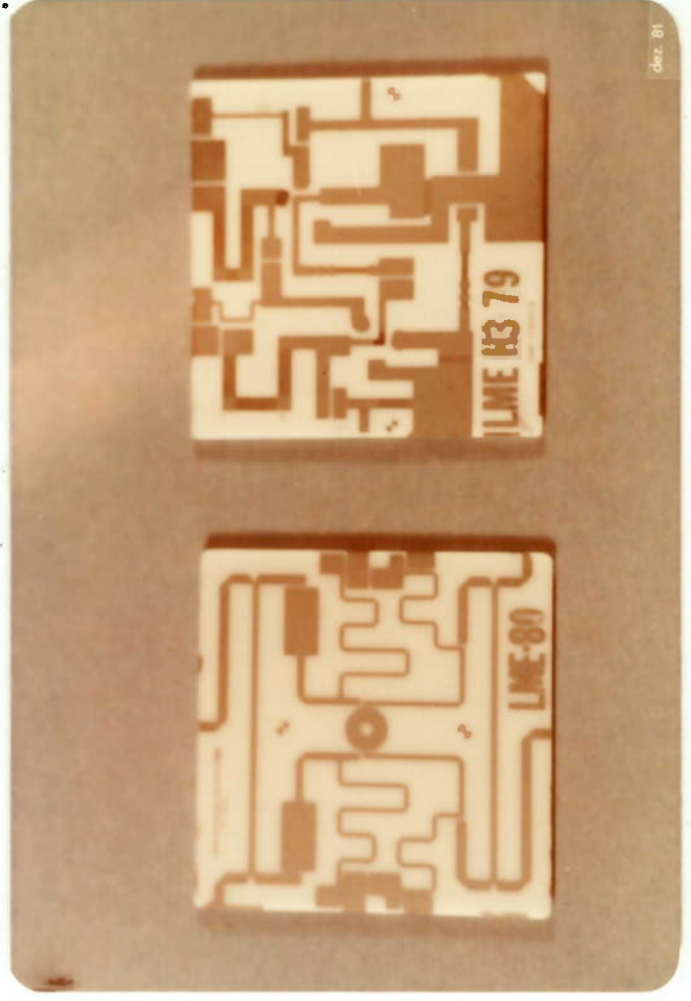


EQUIPAMENTO DE METALIZAÇÃO À VÁCUO



QUADRO DE COMANDO DO METALIZADOR

FIG 5.5.

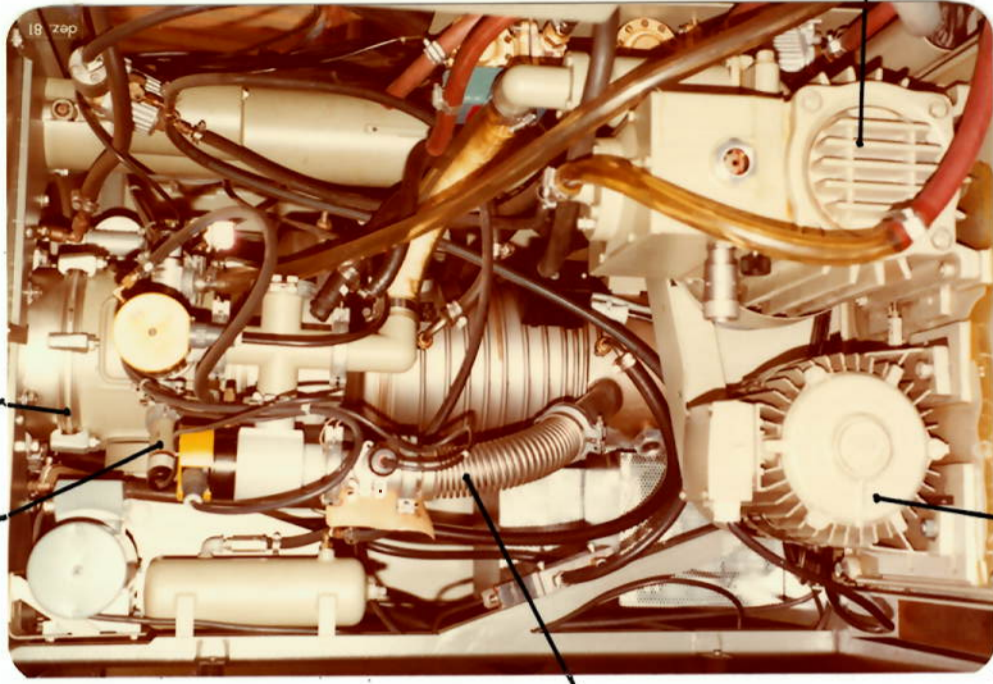


0 1 cm

CIRCUITO METALIZADO (OURO SOBRE CERÂMICA)

MANÔMETRO DE ALTO VÁCUO

ACOPLAMENTO DA BOMBA DE
DIFUSÃO À CÂMARA DE TRABALHO



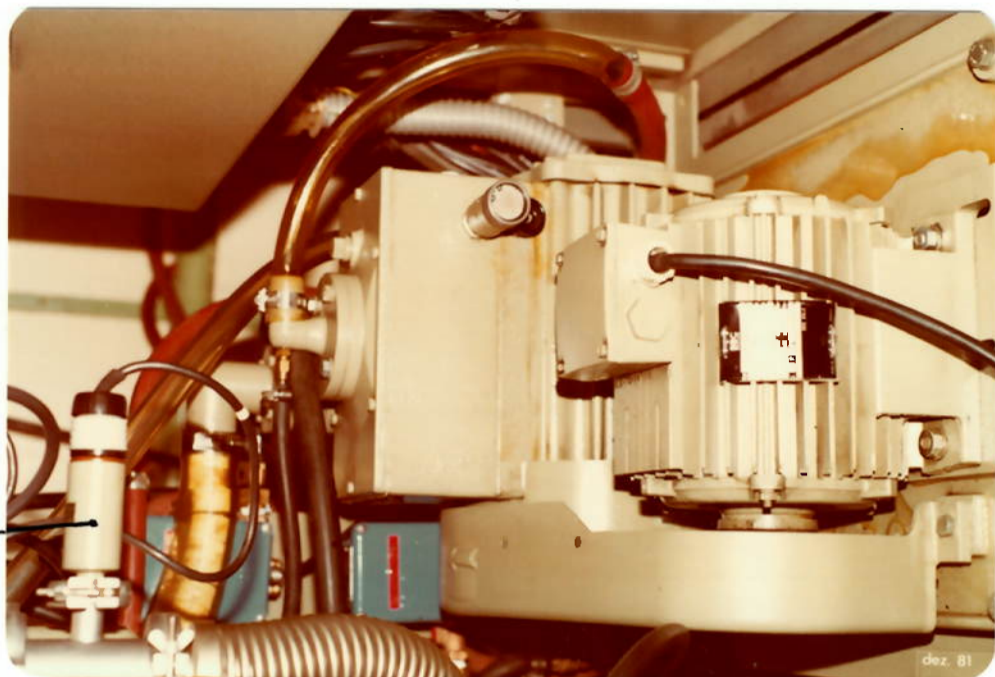
LINHA
PRINCIPAL

BOMBA DE
PRÉ-VÁCUO

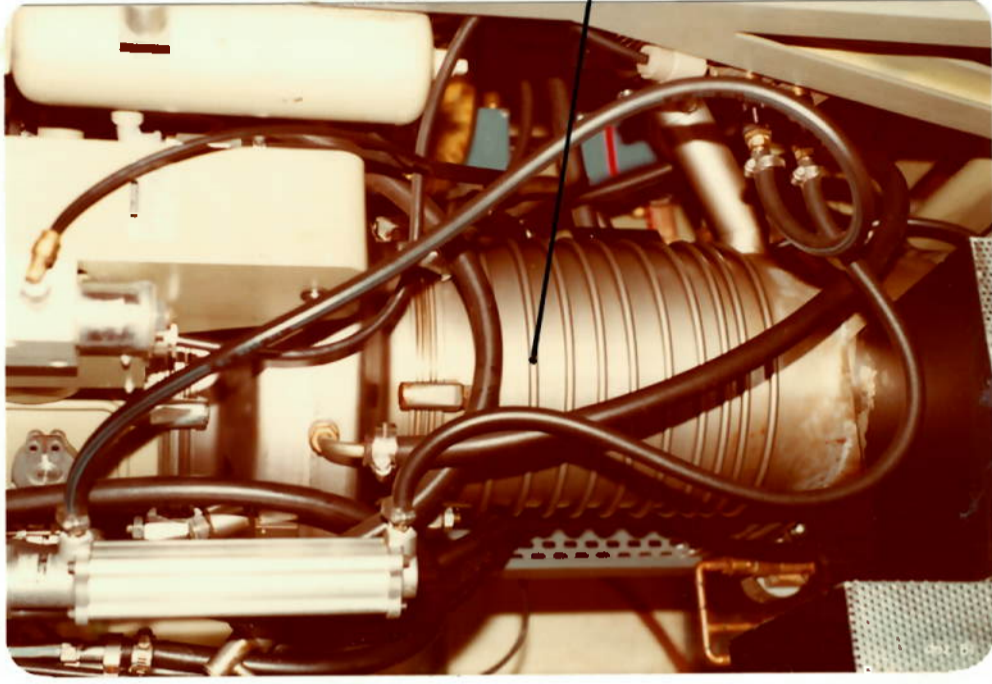
MOTOR DA
BOMBA DE
PRÉ-VÁCUO.

VISTA GERAL DO SISTEMA DE EVACUAÇÃO
DO METALIZADOR

MANÔMETRO DA LINHA PRINCIPAL.



DETALHE: - BOMBA DE PRÉ-VÁCUO



CONDUITO DE
ÁGUA DE
RESFRIAMENTO

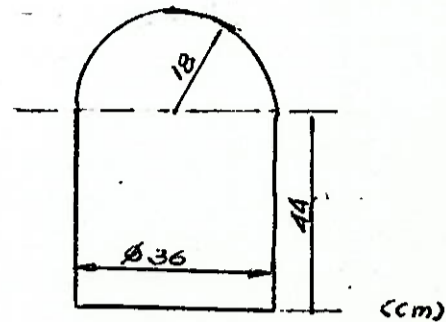
DETALHE: BOMBA DE DIFUSÃO

FIG. 5.9.

5.3. Exemplo de Cálculo.

O exemplo a seguir é feito para um pequeno sistema de metalização com os seguintes dados.

— Câmara de trabalho.



— Conduto de saída 4"

— Vácuo final 10^{-6} mm Hg

— Distância entre a câmara de trabalho e a bomba de difusão, 40 cm.

Cálculo do sistema.

Calculemos a condutância do conduto de 4" ligado à câmara de 36 cm de diâmetro.

$$C = 12,1 \cdot \frac{D^3}{L} \quad (31),, \text{ para escoamento molecular}$$

$$C = 12,1 \cdot \frac{(10,16)^3}{40} = 317,25 \text{ litros/seg.}$$

Como trata-se de um duto curto a condutância de entrada não é desprezível, então :

$$C_{ent} = 11,6 \frac{A \cdot A_0}{A - A_0} = \frac{9,11 \cdot D^2}{1 - (D/D_0)} \quad (32)$$

$$C_{ent} = \frac{9,11 \cdot (10,16)^2}{1 - (10,16/36)} = 1310,13 \text{ litros/seg.}$$

$$\frac{1}{C_{\text{tot}}} = \frac{1}{317} + \frac{1}{1310} \quad C_{\text{tot}} = 255 \text{ litros/seg.}$$

Ou usando a tabela 1 do capítulo 3 para maior precisão | :

$$\frac{L}{D} = \frac{40}{10,16} = 3,94 \longrightarrow \alpha = 0,70$$

Da equação 33 , vem :

$$C_{\text{tot}} = 12,1 \cdot \frac{D^3}{L} \cdot \alpha$$

$$C_{\text{tot}} = 12,1 \cdot \frac{(10,16)^3}{40} \cdot 0,70 =$$

$$\underline{C_{\text{tot}} = 222 \text{ litros/seg.}}$$

A equação 32 não é muito precisa . O valor de α tabelado foi calculado por Clausing e apresenta 1 % de erro, logo usaremos a condutancia do trecho em questão como :

$$C = 222 \text{ l/s.}$$

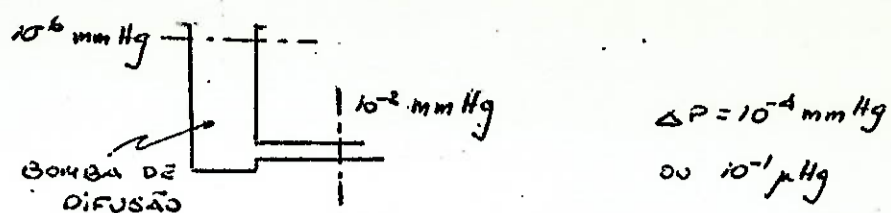
Usemos então uma bomba de difusão Edwards modelo 403A , com $S = 300 \text{ l/s}$, vácuo máximo 10^{-8} mm Hg , refrigerada a água.

Para tal bomba de difusão , a bomba final mínima deve ter $S = 150 \text{ l/min}$ ou $S = 2,5 \text{ l/s}$.

Como o duto de saída da bomba de difusão tem 21,4 mm de diametro, devemos conferir se a condutancia deste duto não interferirá de maneira significativa.

Assumiremos que a bomba final forneça um vácuo de $10 \mu\text{Hg}$, e vejamos que tipo de escoamento ocorre no duto.

$\bar{P} \cdot D = 10 \cdot 2,14 = 21,4 \mu \text{ cm}$, logo o escoamento pode ser considerado como molecular (por aproximação , pois somente quando o produto é menor que 15 que se pode considerar o escoamento como molecular puro).



$$S = \frac{Q}{P} \quad Q = 222 \cdot 10^{-1}$$

$$Q = 22,2 \text{ litros/seg}$$

Assim pela suposição já feita de que a bomba final mantém um pressão de 10 uHg, vem :

$$S = \frac{22,2}{10} \quad S = 2,22 \text{ litros/seg}$$

O que está próximo da bomba final mínima requerida pela bomba de difusão.

Vejamos então a condutância da linha em regime de escoamento molecular.

$$C = 12,2 \cdot \frac{D^3}{L} = 12,2 \cdot \frac{(2,14)^3}{30} = 3,95 \text{ l/s}$$

Como pode ser visto pela fórmula acima, adotamos como comprimento da linha 30 cm.

Usemos a bomba de pré-vácuo ELM8 de $9,8 \text{ m}^3/\text{h}$ e vácuo máximo $3 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$

$$9,8 \text{ m}^3/\text{h} = 2,7 \text{ l/s}$$

Usando a equação 17, vem :

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{C} + \frac{1}{S_p} \quad \frac{1}{S} = \frac{1}{3,95} + \frac{1}{2,7}$$

$$\boxed{S = 1,6 \text{ l/s.}}, \text{ como } P = Q/S = \frac{22,2}{1,6} = 13,9 \text{ } \mu\text{Hg, próximo da suposição inicial. OK!}$$

— Tempo de evacuação

Tomemos como valores iniciais, que o sistema de vácuo completo tenha 90 litros.

$$\text{Temos que } t = \frac{V}{S_p} \ln \frac{P_1}{P}$$

$$t = \frac{90}{1,6} \ln \frac{7,6 \cdot 10^5}{10^{-3}} = 1150,2 \text{ seg}$$

$$t = 19,17 \text{ minutos}$$

Este é um tempo razoável de evacuação, consequentemente o sistema pode ser considerado satisfatório.

Para o cálculo deste tempo de evacuação foi feita implicitamente a hipótese de que o gás a ser evacuado é totalmente limpo, isento de água, óleo, álcool ou outra substância que tenha apreciável pressão de vapor. Caso contrário a pressão não diminuirá até que a substância tenha sido totalmente evaporada. Se o sistema ficar aberto para o ambiente por muitas horas, uma quantidade razoável de vapor de água será absorvida pelas paredes, de maneira que quando o sistema for operado o tempo de evacuação será bastante aumentado.

Apêndice 1

UNIDADES

TABELA 1 : UNIDADES

	bar	Millibar. m bar.	Pascal Pa (Nxm ⁻²)	Micron (μ)	Torr (mm.Hg)	Atmosphere (atm)
1 bar	1	10 ³	10 ⁵	7,5x10 ⁵	750	0,9869
1 m bar	10 ⁻³	1	10 ²	7,5x10 ²	0,750	0,9869x10 ⁻³
1 Pa	10 ⁻⁵	10 ⁻²	1	7,5	0,750x10 ⁻²	0,9869x10 ⁻⁵
1 μ	1,333x10 ⁻⁶	1,333x10 ⁻³	0,1333	1	10 ⁻³	1,316x10 ⁻⁶
1 Torr	1,33322x10 ⁻³	1,33322	1,33322x10 ²	10 ³	1	1,316x10 ⁻³
1 atm	1,01325	1,01325x10 ³	1,01325x10 ⁵	7,6x10 ⁵	760	1

Apêndice 2

PRESSÕES USADAS EM VÁRIAS APLICAÇÕES DE VÁCUO

Aplicação	Pressão (mm Hg)
Lampada de mercúrio	1000 - 100
Lamp. incandescente cheia de gás	500
Freio à vácuo(ferroviário)	230
Secagem à vácuo(liofilização)	60 - 10
Válvula de raios X,preenchida de gás	10^{-2}
Lampada de filamento de carbono	10^{-2} - 10^{-3}
Metalurgia sob vácuo	1 - 10^{-3}
Destilação molecular	10^{-2} - 10^{-5}
Metalização por choques	10^{-1} - 10^{-4}
Metalização por evaporação	10^{-5} - 10^{-6}
Válvulas eletrônicas (à vácuo)	10^{-5}

Bibliografia

1. Vacuum Equipament and Techniques
Edited by A. Guthrie, Ph.D. e
R. K. Wakerling, Ph.D., McGraw-Hill, 1949
2. Industrial High Vacuum
by J.R. Davy, B.Sc.
Sir Isaac Pitman e Sons, Ltd.
3. Tratado Prático de la Técnica del Vacío
Max Morand
Ediciones Urmo
4. Catálogos Técnicos da Edwards do Brasil.
5. Catálogos Técnicos da Leybolp-Heraeus
6. Catálogos Técnicos da HF Vácuo Ind. e Com. Eletromecânica e Aparelhos Científicos Ltda.

ANEXO

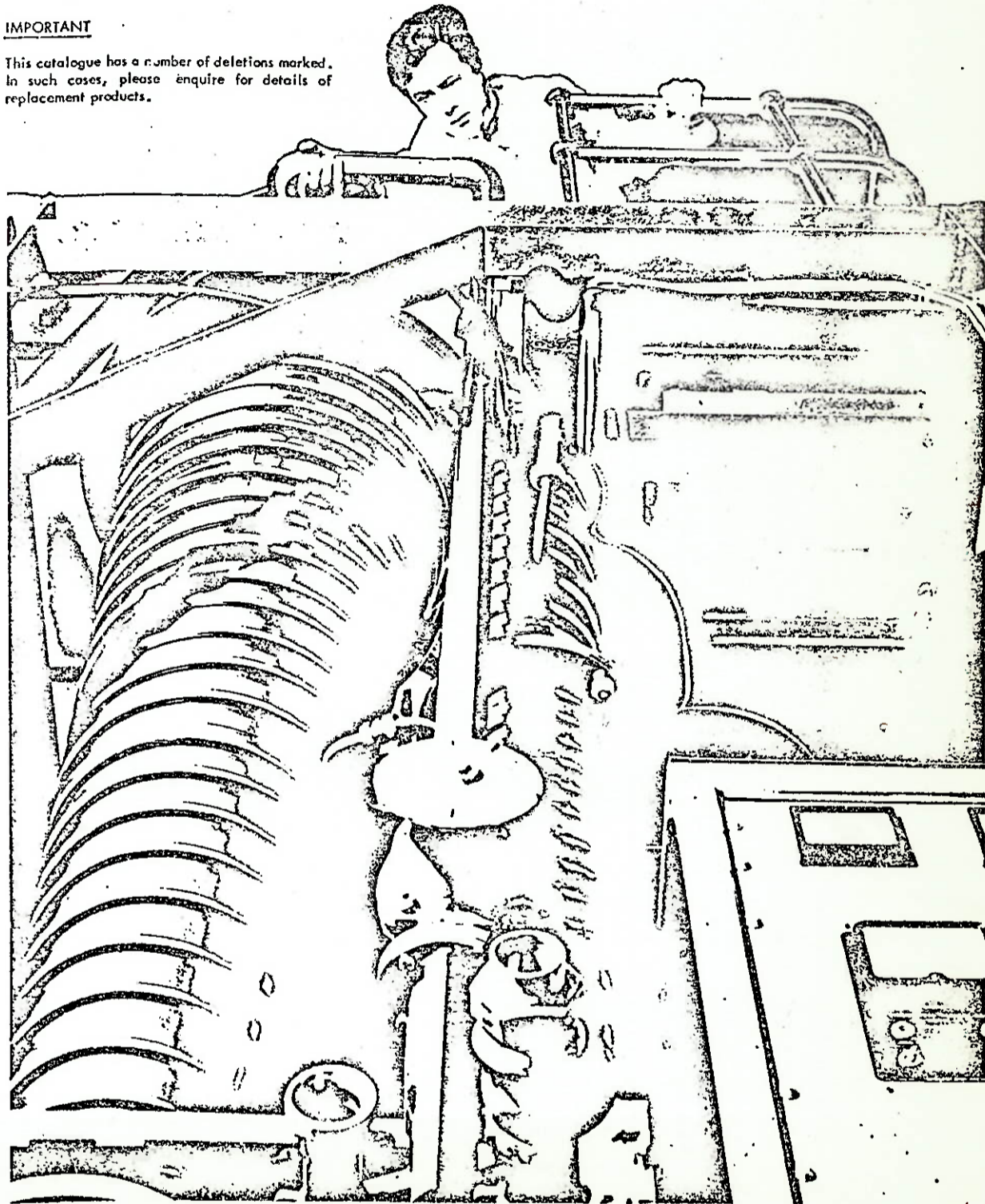
Catálogos de Equipamentos de Alto Vácuo.

Vapour diffusion pumps and accessories



IMPORTANT

This catalogue has a number of deletions marked. In such cases, please enquire for details of replacement products.

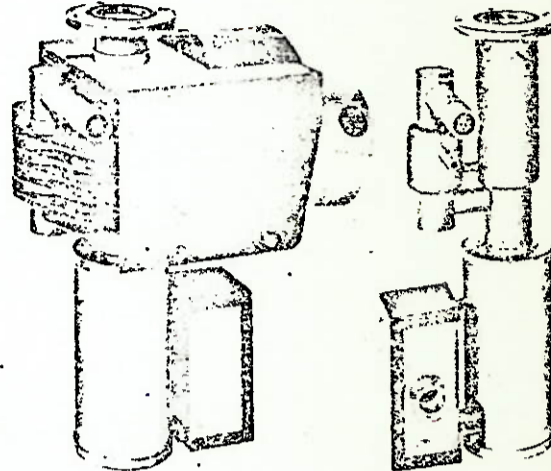




Vapour diffusion pumps—oil—10 l/s

*** Model EO1—**

	Water cooled	Air cooled
Pumping speed (air)	10 l/s	12 l/s
(hydrogen)		12 l/s
Ultimate vacuum		10 ⁻⁷
No. of stages		2
Fluid capacity		11ml
Minimum backing pump		30 l/s
Recommended backing pump		EDM2
Backing connexion	1/2 in (15.85) external Ø tube for 1/2 in coupling	
Cooling water connexion	1/2 in (6.4mm) external Ø tube	—
Minimum cooling water flow at 15°C	0.25 l/min	—
Heater loading		175W
Weight	2 3/4 lb (1.24kg)	7 lb (3.18kg)
Product description	Ordering number	
Pump 110-125V s.ph 50/60Hz	05-B007-04-110	05-B007-06-110
200-225V s.ph 50/60Hz	05-B007-04-210	05-B007-06-210
230-250V s.ph 50/60Hz	05-B007-04-240	05-B007-06-240



Spares

Heater (175W) 110-125V	14-H017-05-001
200-225V	14-H017-05-003
230-250V	14-H017-05-007
Fluid Silicone 702 200ml	09-H024-00-005
Fluid Silicone 704 200ml	09-H024-00-020
Pump inlet flange 'O' ring VOR 0218 (pack of 10)	08-H021-05-028

Tool

Lifting tool for interior assembly	06-B041-00-000
------------------------------------	----------------

Accessories 1 in (25mm) system

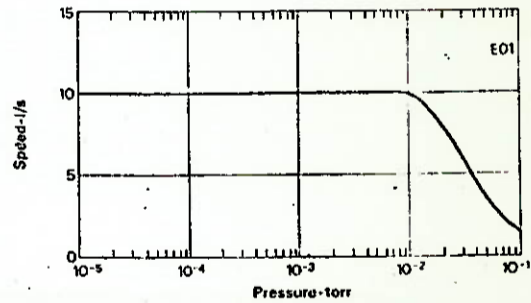
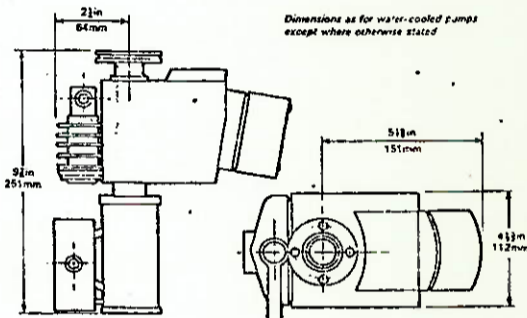
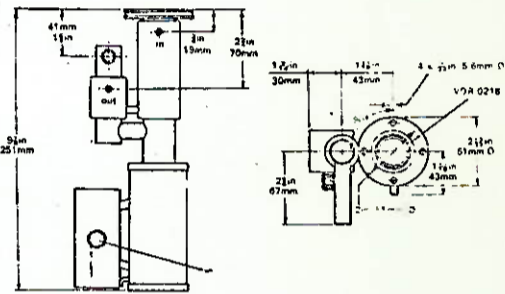
1. 1 in slip-in baffle	06-B021-00-000
2. Model 2L1B baffle and isolation valve	06-B014-02-000
Conc to flange connexion for 2L1B	06-B080-00-000
3. Model NTM1 liquefied gas trap	06-B029-01-000
4. Model QSB1B quarter swing valve	06-B033-19-000
Connexion (split flange and 'O' ring) NTM1 to QSB1B	06-B029-01-014

*** Exchange/replacement scheme**

Refer to vapour pump accessories section for complete data on accessories. For full range of vapour pump fluids, see fluids and sealants section.

Performance

	Critical backing pressure (torr)	Ultimate vacuum - torr (better than)			
		5 x 10 ⁻⁴	5 x 10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶
Silicone 702	0.5	5 x 10 ⁻⁴	5 x 10 ⁻⁴	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶
Air speed l/sec		6	7.5	3.5	3.3
Hydrogen speed l/sec		10	11	7.5	7.0





Vapour diffusion pumps (special purpose)—oil—80 l/s

• Model E203D fast warm up with special heater arrangement.

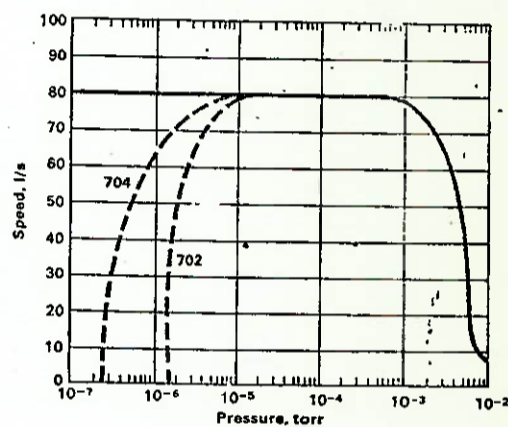
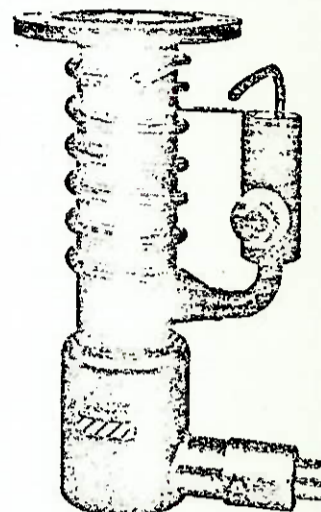
Pumping speed (air)	ISO 80 l/s AVS 95 l/s
(hydrogen)	90 l/s
Ultimate vacuum	better than 5×10^{-7} torr
No. of stages	3
Fluid capacity	50ml
Minimum backing pump displacement	35 l/min
Recommended backing pump	ES50
Backing connexion	$\frac{3}{4}$ in union
Cooling water connexion	$\frac{1}{2}$ in BSP
Minimum cooling water flow at 15°C	0.5 l/min
Heater loading	350W
Weight	7 lb (3.2kg)

Product description	Ordering number
Pump 100 125V s.ph 50/60Hz	05-B008-29-110
Pump 200 220V s.ph 50/60Hz	05-B008-29-210
Pump 230 250V s.ph 50/60Hz	05-B008-29-240

Spare	
Heater 100V	14-H017-07-003
220V	14-H017-07-002
230 250V	14-H017-07-001
Fluid Silicone 702 200ml	09-H024-00-005
Silicone 704 50ml	09-H024-00-017
Pump inlet flange 'O' ring VOR 0337	08-H021-05-052

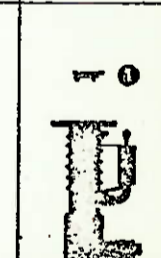
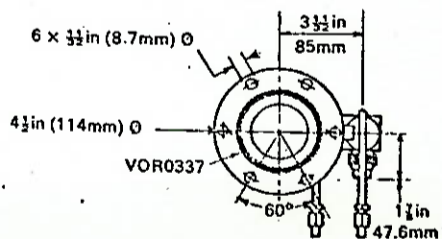
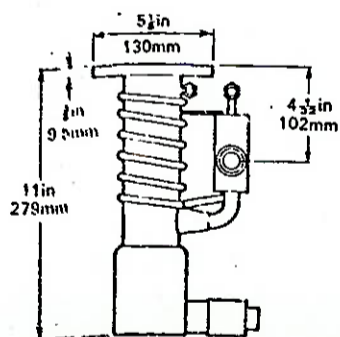
Accessory 2in (51mm) system	
1. 2in slip in baffle	06-B019-01-000

Refer to vapour pump accessories section for complete data on accessories.
For full range of vapour pump fluids, see fluids and sealants section.
• Exchange/replacement service.

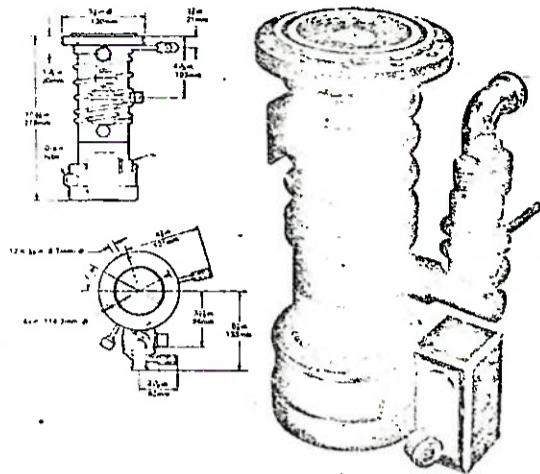


Performance

	Critical backing pressure (torr)	Ultimate vacuum—torr (better than)
Silicone 702	1.0	5×10^{-6}
Silicone 704	0.8	5×10^{-7}
Air Speed: l/s	—	35
Hydrogen Speed: l/s	—	65



Vapour diffusion pumps—oil—150 l/s

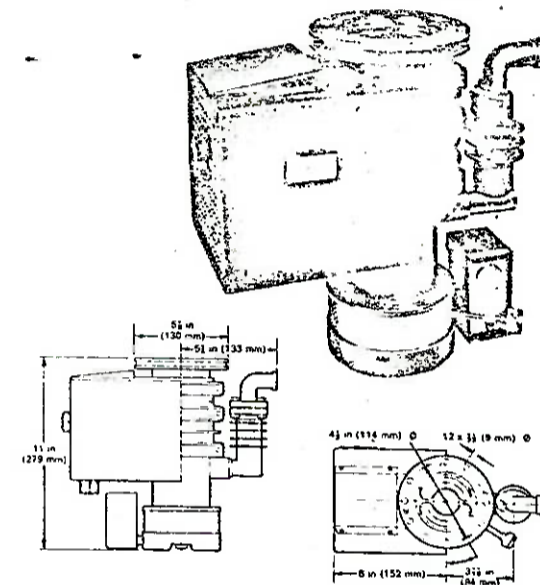


Model E02—

	Water cooled	Air cooled
Pumping speed (air)†	ISO 150 l/s	AVS 170 l/s
(hydrogen)	200 l/s	
Ultimate vacuum		10 ⁻¹⁰ torr
No. of stages		4
Fluid capacity		75ml
Minimum backing pump displacement	50 l/min (100 l/min for maximum throughput)	
Recommended backing pump	ES50 (ES100)	
Backing connexion	3/8 in (15.86mm) external Ø tube for 1/2 in coupling.	
Cooling water connexion	1/2 in Wade coupling	—
Minimum cooling water flow at 15°C	0.4 l/min	—
Heater loading		400W
Weight	10 lb (4.5kg)	18 lb (8.2kg)

†With guard ring removed the pumping speed is 20% higher.

Product description	Ordering number	
Pump 100-125V s.ph 50/60Hz	05-B008-23-110	05-B008-25-110
220-225V s.ph 50/60Hz	05-B008-23-210	05-B008-25-210
230-250V s.ph 50/60Hz	05-B008-23-240	05-B008-25-240



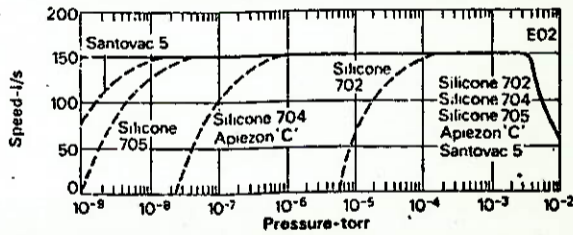
Spares		
Heater (400W) 100-125V		14-H017-00-182
200-225V		14-H017-00-185
230-250V		14-H017-00-183
Fluid Silicone 702 200ml		09-H024-00-005
702 500ml		09-H024-00-007
704 200ml		09-H024-00-020
704 500ml		09-H024-00-009
705 100ml		09-H024-00-025
705 500ml		09-H024-00-027
Apiezon C — 500ml		09-H023-00-039
Santovac 5 — 500ml		09-H023-00-046
Pump inlet flange 'O' ring (pack of 10)		08-H021-05-055
VOR 0340		

Accessories	2in (51mm) system	Water cooled	Air cooled
Water flow thermal snap switch		06-B023-02-000	—
1. Model H5L2B baffle and isolation valve		06-B015-15-000	—
Model S5L2B (solenoid operated)		06-B015-18-000	—
Model E5L2B (motor operated)		06-B015-17-000	—
*2. Model CB02 chevron baffle		06-B032-09-000	—
*3. Model DCB2B thermo-electric water-cooled baffle		06-B072-04-000	—
or * Model DCB2C (air cooled)		—	06-B072-05-000
Power pack for DCB2 baffles			06-D241-11-000
4. Model OSB2 quarter swing valve		06-B033-04-000	—
or Model QSB2P (pneumatically operated)		06-B033-05-000	—
*5. Model NTM2A liquefied gas trap		06-B024-03-000	—
6. 2in (51mm) spacer for use with QSB2		06-B063-05-000	—

Performance

Fluid	Critical backing pressure (torr)	Ultimate vacuum—torr (better than)						
		A	B	C Baked system	D	E	F Baked system	G
Silicone 702	0.7	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁷
Silicone 704	0.5	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁷
Silicone 705	0.35	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁷
Apiezon C	0.35	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁷
Santovac 5	0.30	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	5 × 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	3 × 10 ⁻⁷
Air Speed l/s		80	65	50	30	35		
Hydrogen Speed l/s		150	140	115	85	90		

* Exchange/replacement scheme. Refer to vapour pump accessories section for complete data on accessories. For full range of vapour pump fluids, see fluids and sealants section.



For new products and prices current at time of ordering, see latest price list



Vapour diffusion pumps—oil—300 l/s

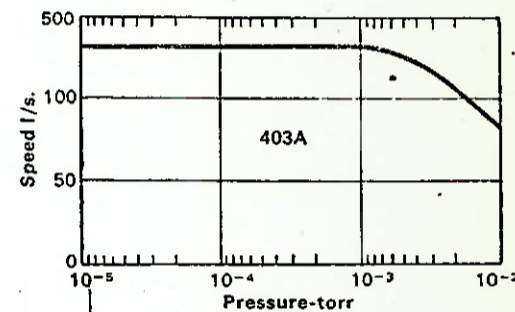
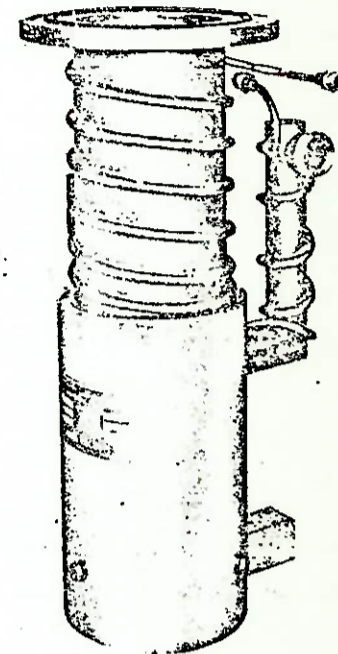
Model 403A—

Pumping speed (air)	ISO 300 l/s AVS 340 l/s
(hydrogen)	350 l/s
Ultimate vacuum	better than 10^{-8} torr
No. of stages	3
Fluid capacity	100ml
Minimum backing pump displacement	150 l/min
Recommended backing pump	ES200
Backing connexion	union for 0.846in (21.4mm) external \varnothing tube
Cooling water connexion	$\frac{1}{2}$ in BSP
Minimum cooling water flow at 15°C	0.7 l/min
Heater loading	500W
Weight	18 lb (8.2kg)
Product description	Ordering number
Pump 100-125V s.ph	05-B009-01-110
200-220V s.ph	05-B009-01-210
230-250V s.ph	05-B009-01-240

Spares	
*Heater 100-125V 110V	14-H017-00-122
200-220V 115V	14-H017-00-124
230-250V 230V	14-H017-00-126
Fluid Silicone 702 500ml	09-H024-00-007
Silicone 704 500ml	09-H024-00-009
Pump inlet flange 'O' ring (pack of 2) VOR 1208	08-H021-05-208

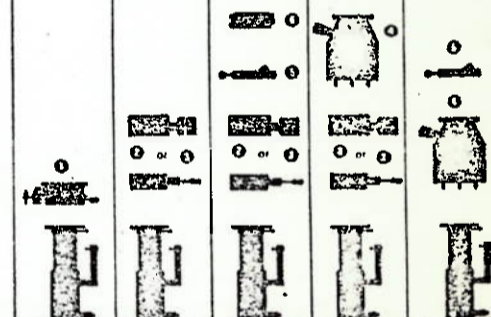
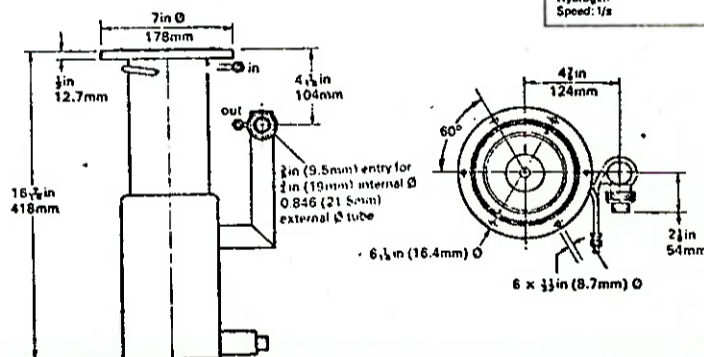
Accessories 4in (102mm) system	
1. Model H7L4 baffle and isolation valve	06-B016-01-000
2. Model CB4A water-cooled chevron baffle	06-B055-00-000
3. Model DCB4 thermo-electric water-cooled baffle	06-B072-01-000
Power pack for DCB4 baffles	06-B073-01-000
4. Model QSB4 quarter swing valve or Model OSB4 (pneumatically operated)	06-B033-00-000
5. Model NTM4 liquefied gas-cooled trap	06-B033-02-000
6. 4in (102mm) spacer for use with QSB4	06-B031-01-000
Water flow thermal snap switch	06-B063-12-000
	06-B023-01-000

Refer to vapour pump accessories section for complete data on accessories. For full range of pump fluids, see fluids and sealants section.
* Exchange/replacement service.



Performance

Fluid	Critical backing pressure (torr)	Ultimate vacuum—torr (better than)				
		A	B	C	D	E
Silicone 702	0.5	5×10^{-4}	5×10^{-3}	5×10^{-3}	10^{-4}	10^{-4}
Silicone 704	0.35	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-4}
Air Speed: l/s		185	170	135	105	120
Hydrogen Speed: l/s		295	280	255	225	240



NEW

Edwards

RANGE OF ROTARY VACUUM PUMPS

A completely new range of Edwards rotary vacuum pumps for the 1980's

Edwards has unrivalled experience in rotary vacuum pump technology and Edwards pumps are internationally recognised in factories and laboratories alike for their high performance and long trouble-free life.

Building on this unique experience, Edwards has now, after five years of design, development, pre-production manufacture, testing and field trials produced a completely new range of single and two-stage rotary vane pumps and accessories for all industrial and laboratory applications.

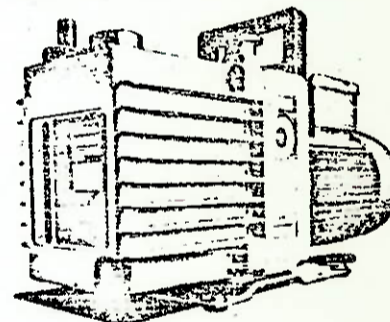
10 good reasons for buying Edwards high performance rotary vacuum pumps

- Comprehensive range - 2.7 to 465m³ h⁻¹
- Single and two-stage for all industrial and laboratory applications
- Complete range of easy-to-fit accessories to protect both pumps and the environment
- Proven reliability
- Direct-drive - built to exacting safety standards
- Advanced oil lubrication - ensures reliable running even at high gas loads
- Low noise levels and minimum vibration
- Easy maintenance
- Effective service back-up
- Competitive prices

Edwards design approach

Using the direct-drive, rotary vane principle, Edwards new pumps are inherently compact and vibration-free. With their fingerproof fan and coupling housings and their totally enclosed fan-cooled motors to IP44 safety standard, they offer excellent operator protection.

Each pump is lubricated by a pumped oil feed from a generous oil reservoir in which the pump mechanism is immersed, an arrangement particularly suited to arduous pumping duties.



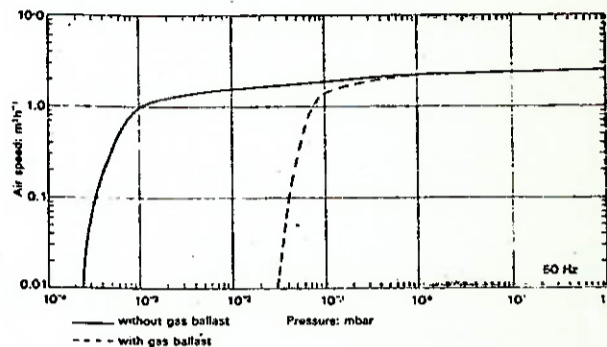
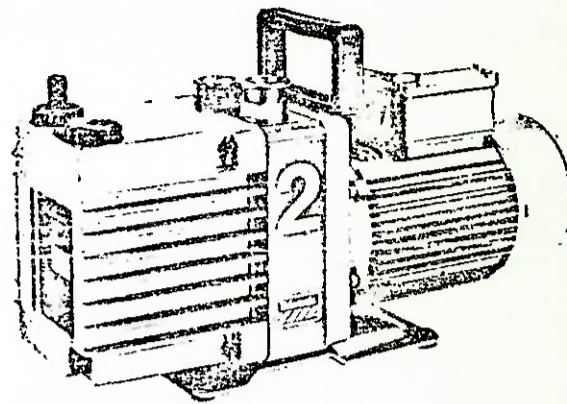
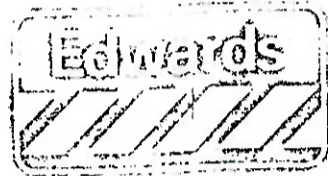
The larger two-stage pumps employ a staging ratio selected to retain good pumping performance while providing advantages in reduced size, weight, noise and motor power.

Pumps up to 80m³ h⁻¹ are fan-cooled; larger pumps are water-cooled but can be operated without cooling over a useful range of high vacuum duties.

E2M2

double stage

2.8m³ h⁻¹
1.6ft³ min⁻¹
47 l min⁻¹

**Specification**

Displacement (swept volume) 50Hz	2.8m ³ h ⁻¹
Displacement (swept volume) 60Hz	3.4m ³ h ⁻¹
Speed (Pneurop) 50Hz	2.4m ³ h ⁻¹
Speed (Pneurop) 60Hz	2.9m ³ h ⁻¹
Ultimate vacuum	
without gas ballast (partial pressure)	2.5 × 10 ⁻⁴ mbar
without gas ballast (total pressure)	1 × 10 ⁻³ mbar
with gas ballast (partial pressure)	3 × 10 ⁻² mbar
Inlet connexion	KF25 flange with 15mm nozzle alternative (flange is compatible with SC25 screwed connexion) Nozzle 15mm external diameter
Outlet connexion	
Maximum inlet pressure for water vapour	15 mbar
Maximum water vapour pumping rate	0.03kg h ⁻¹
Weight	18.2kg
Motor 50Hz	0.25kW
Motor 60Hz	0.25kW
Oil capacity	0.55 litres

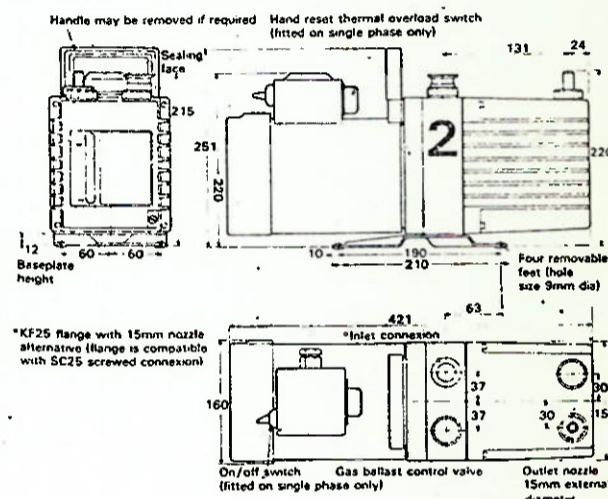
Product description

Pump 220-240V s.ph 50Hz	03-A360-01-912
Pump 115 or 230V s.ph 60Hz	03-A360-01-981
Pump 220-240V s.ph 50/60Hz	03-A360-02-930
Pump 220-240V or 380-420V 3ph 50Hz	03-A360-01-916
Pump 230 or 460V 3ph 60Hz	03-A360-02-982

(1 litre No. 15 oil, KF O-ring and centring ring, inlet nozzle, two Allen keys and spare seals for oil drain and filler plugs supplied with each pump)

Exchange/replacement service available**Spares**

Kit comprising blades, springs, seals, gaskets, filters and washers	14-A360-01-800
No. 15 oil, 1 litre	09-H110-02-015
No. 17 oil, 1 litre	09-H110-04-015
KF25 centring ring	08-C105-10-004
KF25 O-ring	08-H021-24-005

**Accessories**

Model ITO20 inlet catchpot*	04-A441-01-000
Model ITF20 inlet dust filter*	04-A442-01-000
Model ITC20 inlet chemical trap*	04-A444-01-000
Model ITD20 inlet desiccant trap*	04-A445-01-000
Model FL20 foreline trap with sorbent charge*	04-A133-04-000
Model MF20 outlet mist filter	04-A462-01-000
Model OF20 odour filter to fit MF20	04-A462-10-000
Model ODP20 oil drain pack†	04-A500-02-000
Vibration isolators (set of four)	04-A248-01-404
SC25 flexibla bellows for inlet	08-C110-04-442
Model PV25E solenoid operated isolation valve*‡	
200-250V s.ph 50/60Hz	08-C313-03-000
110-127V s.ph 50/60Hz	08-C313-04-000
0.5kg charcoal for ITC20 and OF20	09-H122-05-001
0.45kg activated alumina for ITC20 and FL20	09-H026-00-050
SC25 O-ring and O-ring carrier assembly (pack of five)	08-C110-04-105

* Supplied with two SC25 coupling nuts (O-ring and carriers not supplied)

† Contains gravity drain extension and pressure drain facility

‡ Fit to inlet for complete protection against air return when gas ballast valve is open

see pages 16 to 24 for details of accessories

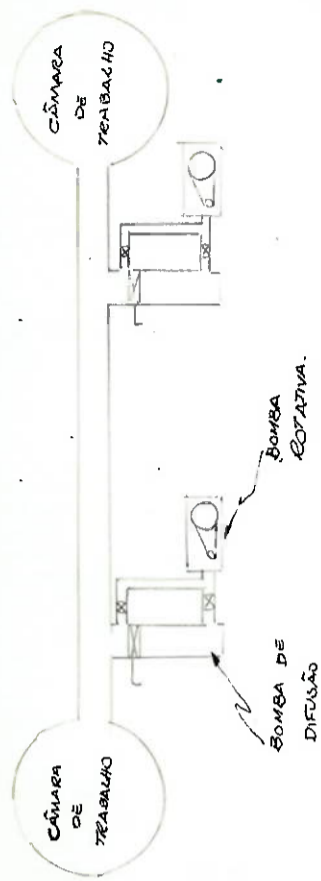
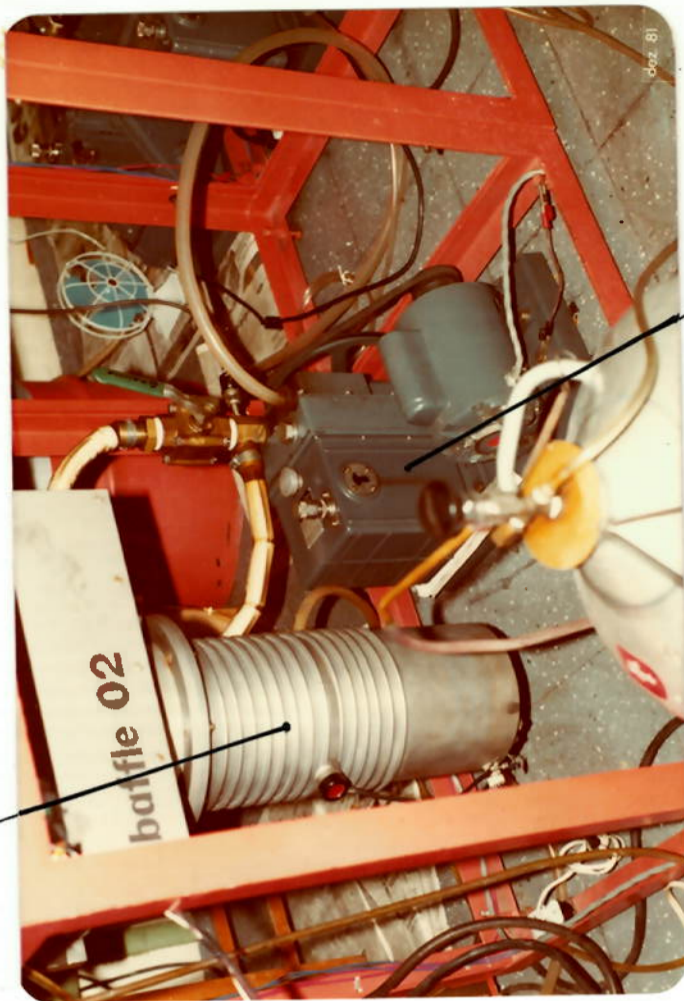


FIG. 5.1.

Pode-se ver o sistema de evacuação nas fotos abaixo.

BOMBA DE DIFUSÃO

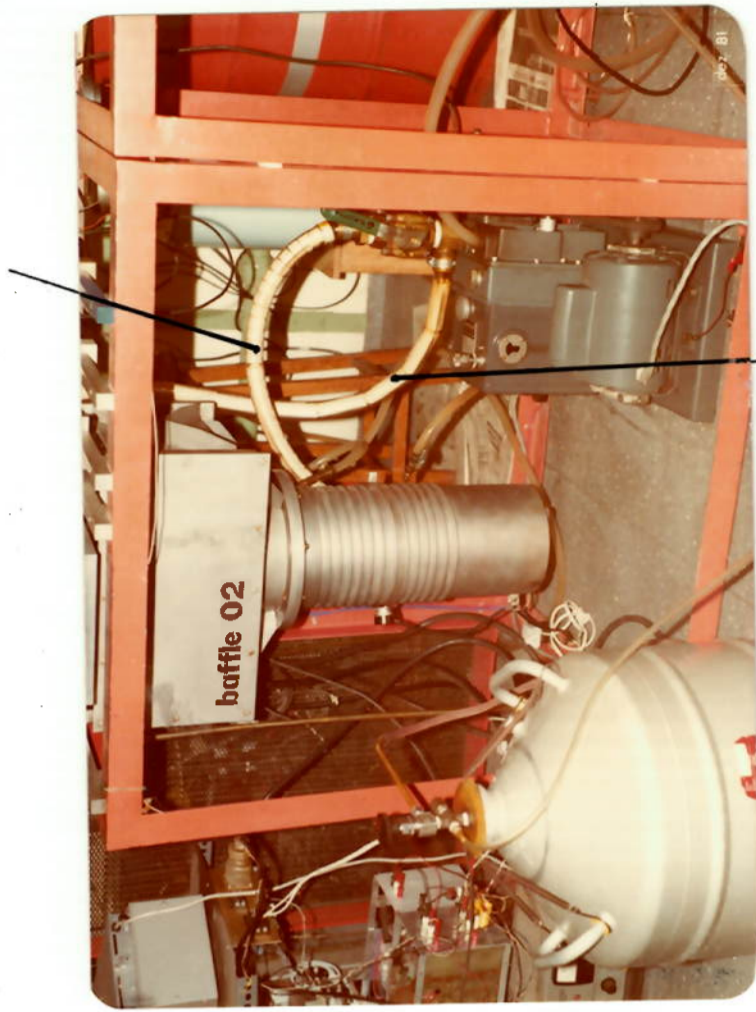


BOMBA DE PRÉ-VÁCUO

SISTEMA DE EVACUAÇÃO

FIG. 5.2.

LINHA PRINCIPAL

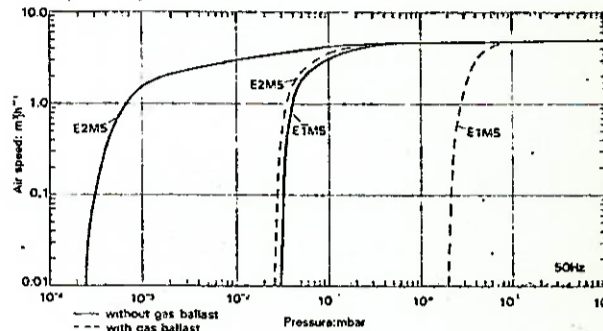
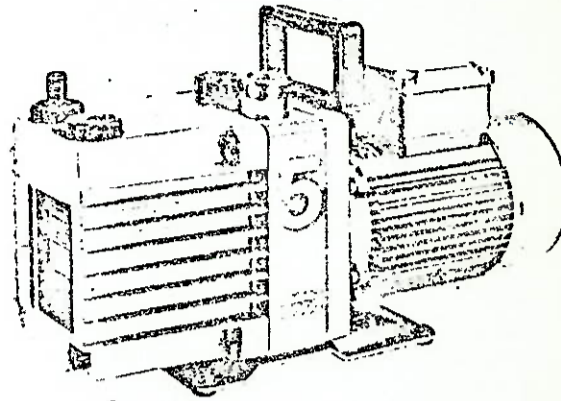
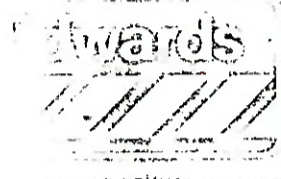


LINHA SECUNDÁRIA

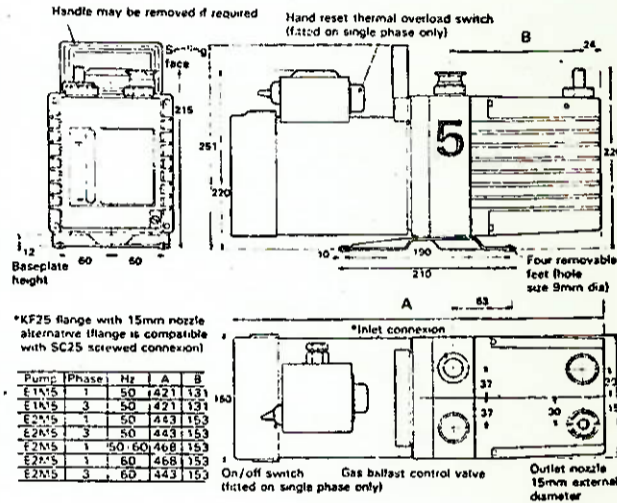
F195.3

E1M5
single stage
E2M5
double stage

5.6m³ h⁻¹
3.3ft³ min⁻¹
93 l min⁻¹



Specification	E1M5	E2M5
Displacement (swept volume) 50Hz	5.6m ³ h ⁻¹	6.7m ³ h ⁻¹
Displacement (swept volume) 60Hz	5.0m ³ h ⁻¹	6.0m ³ h ⁻¹
Speed (Pneurop) 50Hz	5.0m ³ h ⁻¹	6.0m ³ h ⁻¹
Speed (Pneurop) 60Hz	6.0m ³ h ⁻¹	6.0m ³ h ⁻¹
Ultimate vacuum		
without gas ballast (partial pressure)	3 × 10 ⁻² mbar	2.5 × 10 ⁻⁴ mbar
without gas ballast (total pressure)	—	1 × 10 ⁻³ mbar
with gas ballast (partial pressure)	2 mbar	3 × 10 ⁻² mbar
Inlet connexion	KF25 flange with 15mm nozzle alternative (flange is compatible with SC25 screwed connexion)	
Outlet connexion	Nozzle 15mm external diameter	
Maximum inlet pressure		
for water vapour	35 mbar	15 mbar
Maximum water vapour pumping rate	0.13kg h ⁻¹	0.06kg h ⁻¹
Weight	16.8kg	19.6kg
Motor 50Hz	0.25kW	0.25kW
Motor 60Hz	0.25kW	0.37kW
C.I capacity	0.6 litres	0.55 litres



Product description	Ordering number	
Pump 220-240V s.ph 50Hz	03-A341-01-912	03-A361-01-912
Pump 115 or 230V s.ph 60Hz	03-A341-02-981	03-A361-02-981
Pump 220-240V s.ph 50/60Hz	03-A341-03-930	03-A361-03-930
Pump 220-240V or 380-420V 3ph 50Hz	03-A341-01-916	03-A361-01-916
Pump 230 or 460V 3ph 60Hz	03-A341-02-982	03-A361-01-982

(1 litre No. 15 oil, KF O-ring and centring ring, inlet nozzle, two Allen keys, and spare seals for oil drain and filler plugs supplied with each pump)

Exchange/replacement service available

Spares	Ordering number	
Kit comprising blades, springs, seals, gaskets, filters and washers	14-A341-01-800	14-A361-01-800
No. 15 oil, 1 litre	09-H110-02-015	
No. 17 oil, 1 litre	09-H110-04-015	
KF25 centring ring	08-C105-10-004	
KF25 O-ring	08-H021-24-005	

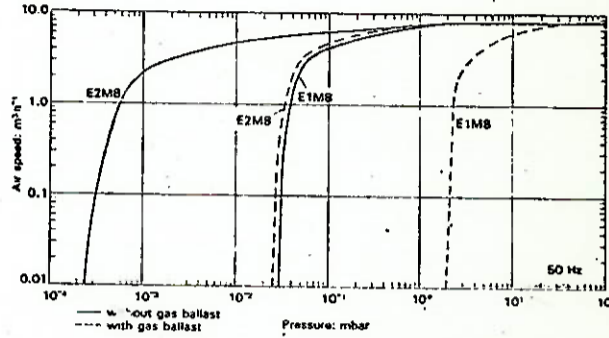
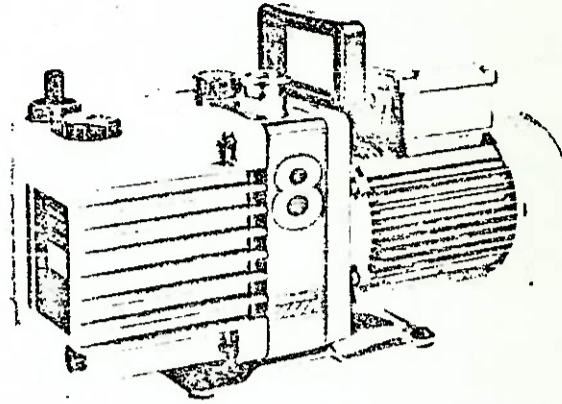
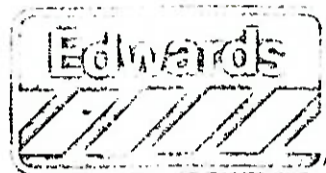
see pages 16 to 24 for details of accessories

- Accessories**
- Model ITO20 inlet catchpot* 04-A441-01-000
 - Model ITF20 inlet dust filter* 04-A442-01-000
 - Model ITC20 inlet chemical trap* 04-A444-01-000
 - Model ITD20 inlet desiccant trap* 04-A445-01-000
 - Model FL20 foreline trap with sorbent charge* 04-A133-04-000
 - Model MF20 outlet mist filter 04-A462-01-000
 - Model OF20 odour filter to fit MF20 04-A462-10-000
 - Model ODP20 oil drain pack† 04-A500-02-000
 - Vibration isolators (set of four) 04-A248-01-404
 - SC25 flexible bellows for inlet 03-C110-03-442
 - Model FV25E solenoid operated isolation valve*‡ 08-C313-03-000
 - 200-250V s.ph 50/60Hz 08-C313-04-000
 - 110-127V s.ph 50/60Hz 09-H122-05-001
 - 0.5kg charcoal for ITC20 and OF20 09-H026-00-050
 - 0.45kg activated alumina for ITC20 and FL20 08-C110-04-105
 - SC25 O-ring and O-ring carrier assembly (pack of five)

*Supplied with two SC25 coupling nuts (O-ring and carriers not supplied)
†Contains gravity drain extension and pressure drain facility
‡Fit to inlet for complete protection against air return when gas ballast valve is open

E1MB
single stage
E2MB
double stage

9.5m³h⁻¹
5.6ft³min⁻¹
158 l min⁻¹



Specification	E1MB	E2MB
Displacement (swept volume) 50Hz	9.5m ³ h ⁻¹	11.4m ³ h ⁻¹
Displacement (swept volume) 60Hz	8.2m ³ h ⁻¹	9.8m ³ h ⁻¹
Speed (Pneurop) 50Hz	3 x 10 ⁻² mbar	2.5 x 10 ⁻⁴ mbar
Speed (Pneurop) 60Hz	1 x 10 ⁻³ mbar	1 x 10 ⁻³ mbar
Ultimate vacuum without gas ballast (partial pressure)	2 mbar	3 x 10 ⁻² mbar
without gas ballast (total pressure)	KF25 flange with 15mm nozzle alternative (flange is compatible with SC25 screwed connexion)	Nozzle 15mm external diameter
with gas ballast (partial pressure)	45 mbar	15 mbar
Inlet connexion	0.27kg h ⁻¹	0.1kg h ⁻¹
Outlet connexion	20kg	22.8kg
Maximum inlet pressure for water vapour	0.37kW	0.55kW
Maximum water vapour pumping rate	0.6 litres	0.55 litres
Weight		
Motor 50Hz		
Motor 60Hz		
Oil capacity		

Product description	Ordering number
Pump 220-240V s.ph 50Hz	03-A342-01-912
Pump 115 or 230V s.ph 60Hz	03-A342-01-981
Pump 220-240V s.ph 50/60Hz*	03-A342-02-920
Pump 220-240V or 380-420V 3ph 50Hz	03-A342-01-916
Pump 230 or 460V 3ph 60Hz	03-A342-01-982

(1 litre No. 15 oil, KF O-ring and centring ring, inlet nozzle, two Allen keys and spare seals for oil drain and filler plugs supplied with each pump)

Exchange/replacement service available
*To IP22 safety standard

Spares

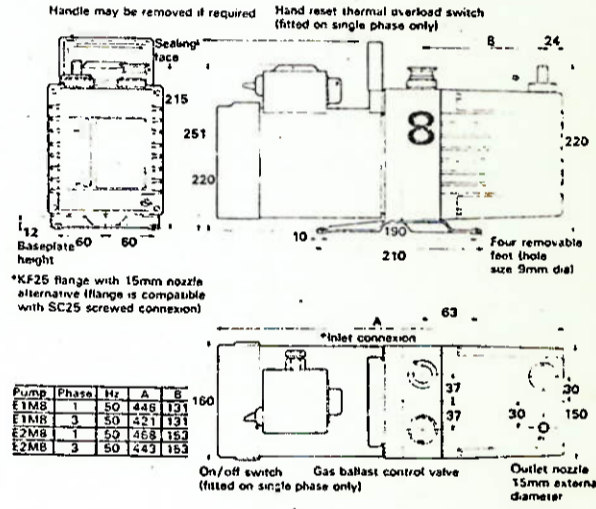
Kit comprising blades, springs, seals, gaskets, filters and washers 14-A342-01-800 | 14-A362-01-800

No. 15 oil, 1 litre 09-H110-02-015

No. 17 oil, 1 litre 09-H110-04-015

KF25 centring ring 08-C105-10-004

KF25 O-ring 08-H021-24-005



Accessories

Model ITO20 inlet catchpot*	04-A441-01-000
Model ITF20 inlet dust filter*	04-A442-01-000
Model ITC20 inlet chemical trap*	04-A444-01-000
Model ITD20 inlet desiccant trap*	04-A445-01-000
Model FL20 foreline trap with sorbent charge*	04-A133-04-000
Model MF20 outlet mist filter	04-A462-01-000
Model OF20 odour filter to fit MF20	04-A462-10-000
Model ODP20 oil drain pack †	04-A500-02-000
Vibration isolators (set of four)	04-A248-01-404
SC25 flexible bellows for inlet	08-C110-04-442
Model PV25E solenoid operated isolation valve* ‡	
200-250V s.ph 50/60Hz	08-C313-03-000
110-127V s.ph 50/60Hz	08-C313-04-000
0.5kg charcoal for ITC20 and OF20	09-H122-05-001
0.45kg activated alumina for ITC20 and FL20	09-H026-00-050
SC25 O-ring and O-ring carrier assembly (pack of five)	08-C110-04-105

*Supplied with two SC25 coupling nuts (O-ring and carriers not supplied)
†Contains gravity drain extension and pressure drain facility
‡Fit to inlet for complete protection against air return when gas ballast valve is open

see pages 16 to 24 for details of accessories

EDM12

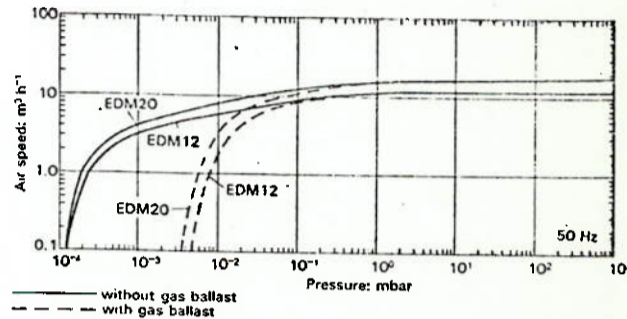
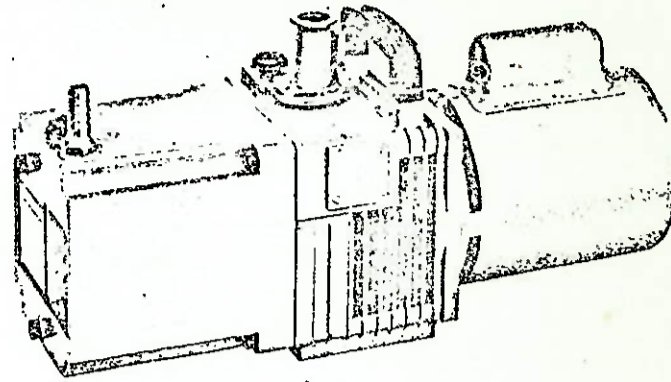
double stage

14.6 m³ h⁻¹
8.6 ft³ min⁻¹
243 l min⁻¹

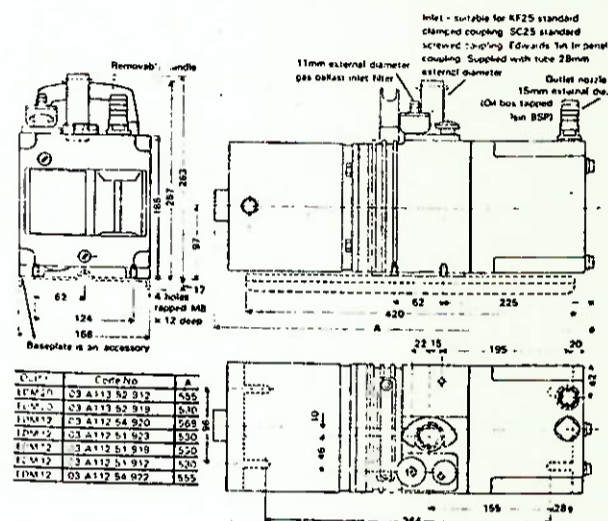
EDM20

double stage

20.5 m³ h⁻¹
12 ft³ min⁻¹
342 l min⁻¹



	EDM12	EDM20
Displacement (swept volume) 50Hz	14.6 m ³ h ⁻¹	20.5 m ³ h ⁻¹
Displacement (swept volume) 60Hz	17.5 m ³ h ⁻¹	24.6 m ³ h ⁻¹
Speed (Pneurop) 50Hz	11 m ³ h ⁻¹	17 m ³ h ⁻¹
Speed (Pneurop) 60Hz	13 m ³ h ⁻¹	20 m ³ h ⁻¹
Ultimate vacuum (partial pressure)		
without gas ballast	1.3 x 10 ⁻⁴ mbar	
with gas ballast	5 x 10 ⁻³ mbar	
Inlet connexion	Suitable for KF25 standard clamped coupling, SC25 standard screwed coupling, Edwards 1in imperial coupling.	
Outlet connexion	Supplied with tube 28mm external diameter Tapped 3/8in BSP. Supplied with nozzle 15mm external diameter	
Maximum inlet pressure for water vapour	25 mbar	
Maximum water vapour pumping rate	0.2 kg h ⁻¹	0.3 kg h ⁻¹
Weight	36 kg	37 kg
Motor 50Hz	0.35 kW	0.55 kW
Motor 60Hz	0.55 kW	0.75 kW
Oil capacity	1.5 litres	



Product description

Pump 220-240V s.ph 50Hz 03-A112-51-912 03-A113-52-912
 Pump 220-250V or 380-440V 3ph 50Hz 03-A112-51-919 03-A113-52-919
 Pump 110-125V s.ph 60Hz 03-A112-54-922
 Pump 220V s.ph 50 Hz 03-A112-51-923
 Pump 220V s.ph 50/60Hz 03-A112-54-920

(1.5 litres No. 15 oil, KF25/SC25 adaptor, centring ring, O-ring carrier, O-rings, 'C' clamp, compression sleeve, bolts and washers for inlet, 17.5mm external diameter nozzle for outlet. Gas ballast filter supplied with each pump)

Exchange/replacement service available

Spares

Kit comprising blades, springs, supports, seals, gaskets, filters, sight glass and washers
 No. 17 oil, 2.5 litres
 KF25 centring ring
 KF25 O-ring
 see pages 16 to 24 for details of accessories

14-A112-01-802
 09-H110-04-014
 08-C105-10-004
 08-H021-24-005

Accessories

Model ITO20 inlet catchpot* 04-A441-01-000
 Model ITF20 inlet dust filter* 04-A442-01-000
 Model ITC20 inlet chemical trap* 04-A444-01-000
 Model ITD20 inlet desiccant trap* 04-A445-01-000
 Model FL20 foreline trap with sorbent charge* 04-A133-04-000
 Model MF20 outlet mist filter 04-A462-01-000
 Model OF20 odour filter to fit MF20 04-A462-10-000
 Vibration isolators (set of four)† 04-A132-01-201
 Baseplate pack for use with vibration isolators 04-A111-51-007
 SC25 flexible bellows for inlet/outlet 08-C110-04-442
 0.5kg charcoal for ITC20 and OF20 09-H122-05-001
 0.45kg activated alumina for ITC20 and FL20 09-H026-00-050
 SC25 O-ring and O-ring carrier assembly (pack of five) 08-C110-01-105

*Supplied with two SC25 coupling nuts (O-ring and carriers not supplied)
 †Baseplate must be used when vibration isolators are required