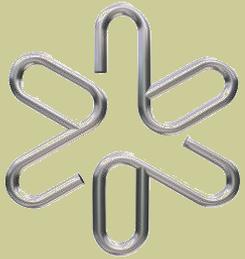


# Ciência e Tecnologia do Vácuo



2018



Uma visão geral da disciplina

Prof. Nilberto H. Medina

# Resumo

---

- Resumo Histórico
- Conceitos gerais
- Sistemas de Vácuo
- Informações gerais

# Resumo Histórico

---

- O que é VÁCUO?
  - no dicionário: *um lugar onde não contém nada; espaço imaginário ou real não ocupado por coisa alguma*
  - no cotidiano: “presença” do nada.

**É possível criar um espaço de ausência total de matéria? Existe o vazio absoluto?**

**Resp.: Não, aparentemente.**

**Definição dada pela American Vacuum Society:**

É um dado espaço preenchido com gás a uma pressão abaixo da atmosférica ( $< 2,5 \times 10^{19}$  moléculas/cm<sup>3</sup> ).

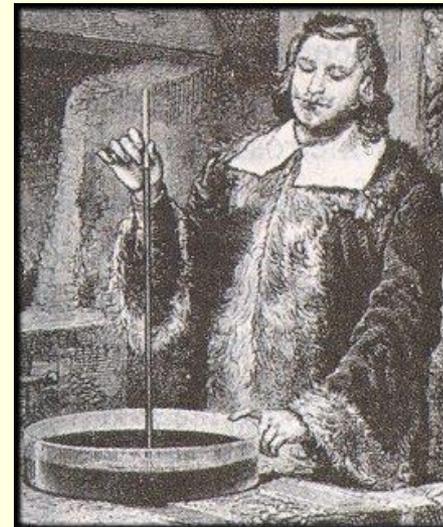
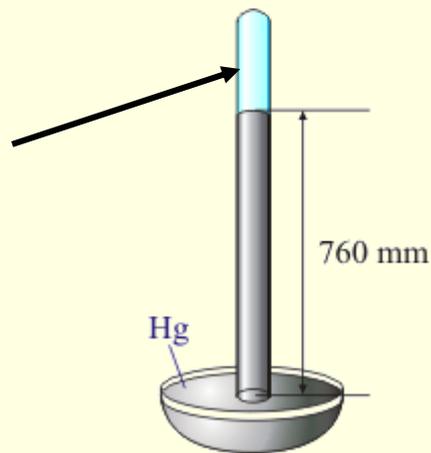
# Resumo Histórico

- Na Grécia antiga, filósofos debatiam sobre a existência do vazio absoluto.
- “A natureza tem horror ao vácuo...”

Aristóteles (384 – 322 a.C.)

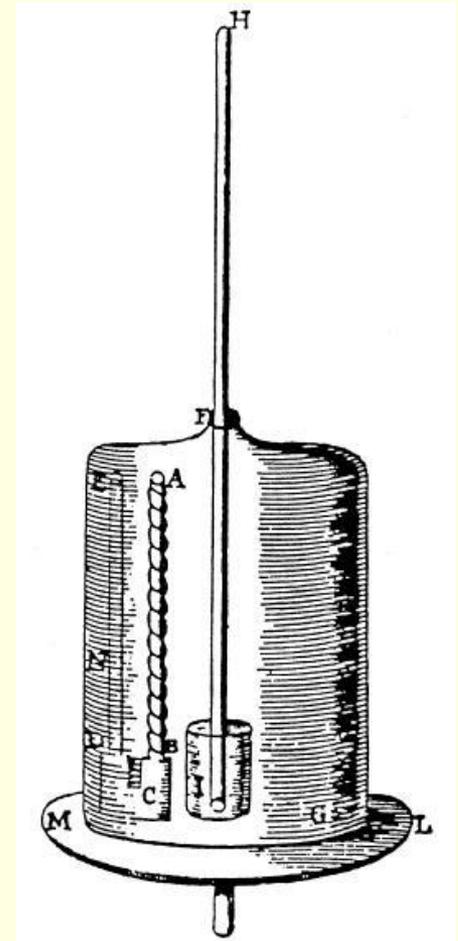
- Século 17 – Galileo Galilei, Torricelli e o barômetro de tubo fechado.

1º vácuo  
produzido  
(1643 ?)



# Resumo Histórico

- 1660 – Primeira notícia da medida de um sistema em baixa pressão (~ 6 Torr) – Boyle
- Vácuo torna-se interesse do grande público. Desenvolvimento para o entretenimento.



# Resumo Histórico

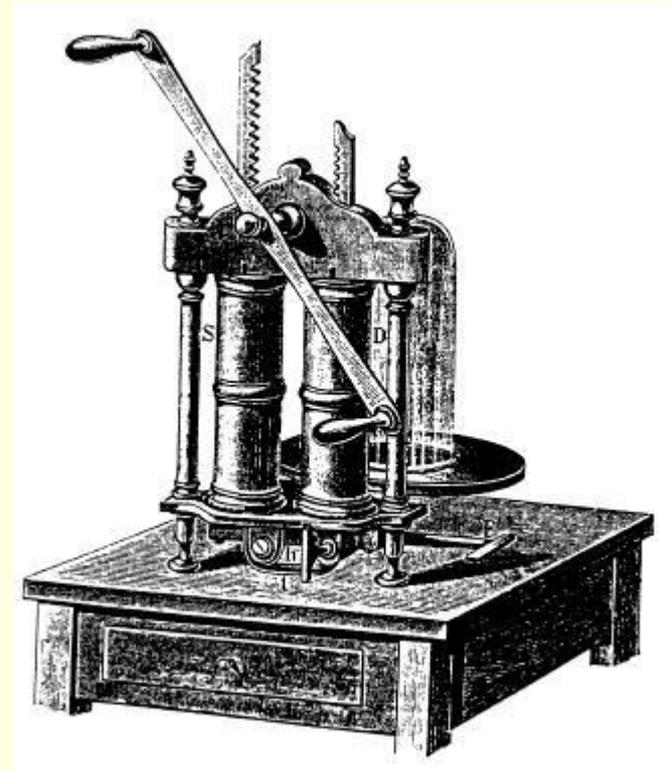


Joseph Wright's painting (1768) of a popular after-dinner demonstration of the effects of vacuum on a small animal. The effects of the lack of atmosphere on a cockatoo is being observed and air was then admitted just in time (in most cases) to save the creature's life.



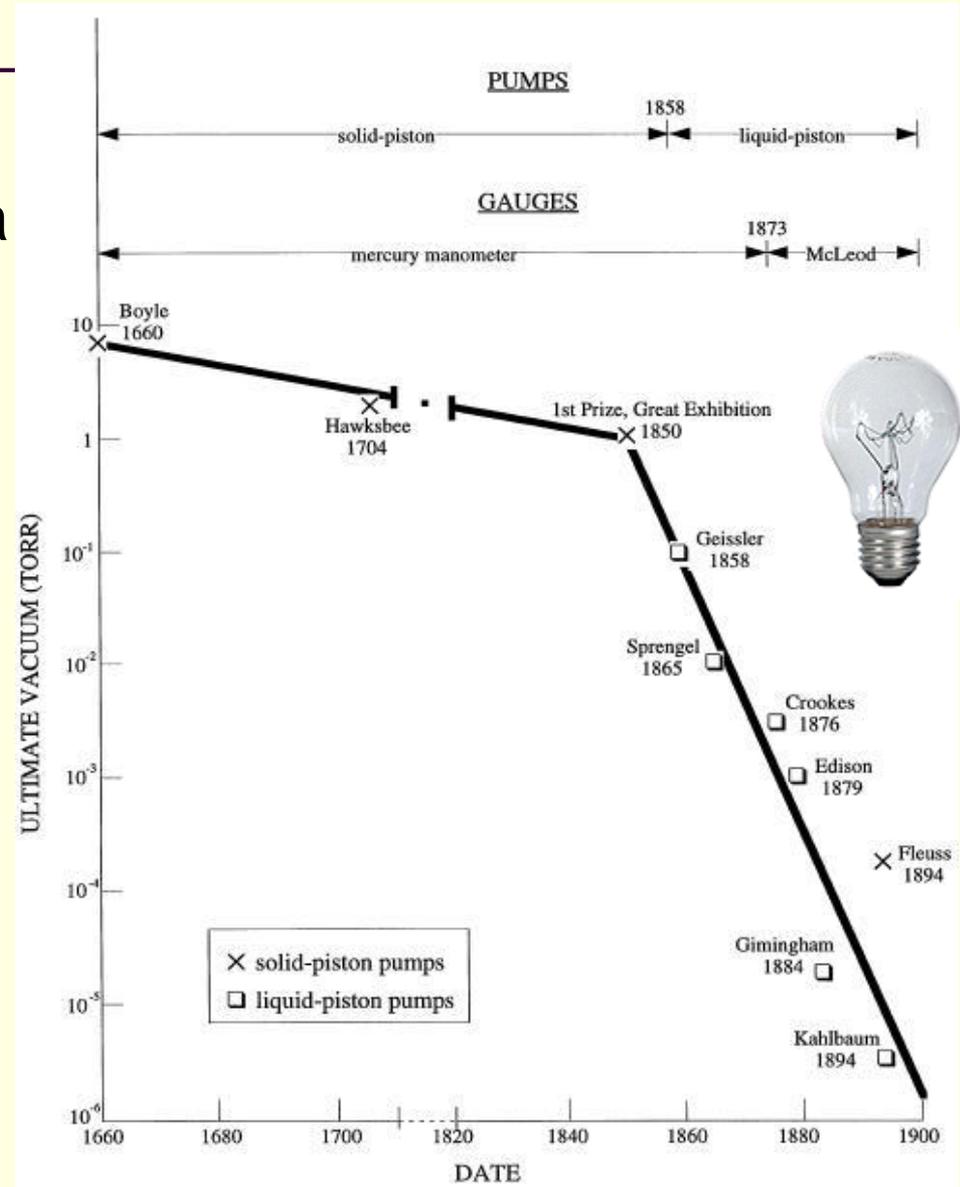
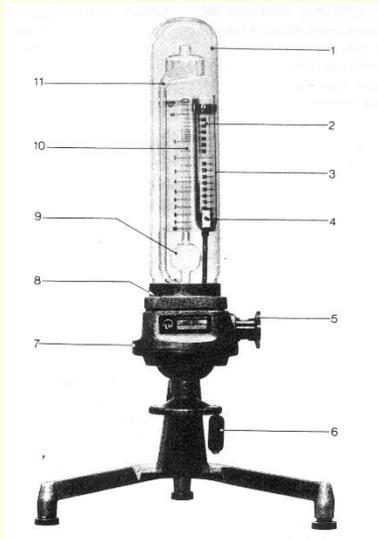
# Resumo Histórico

- Maiores esforços concentravam-se no desenvolvimento das bombas de vácuo
- 1850 – Bombas de pistão duplo começam a ser comercializados.
- Emprego da tecnologia de vácuo na indústria



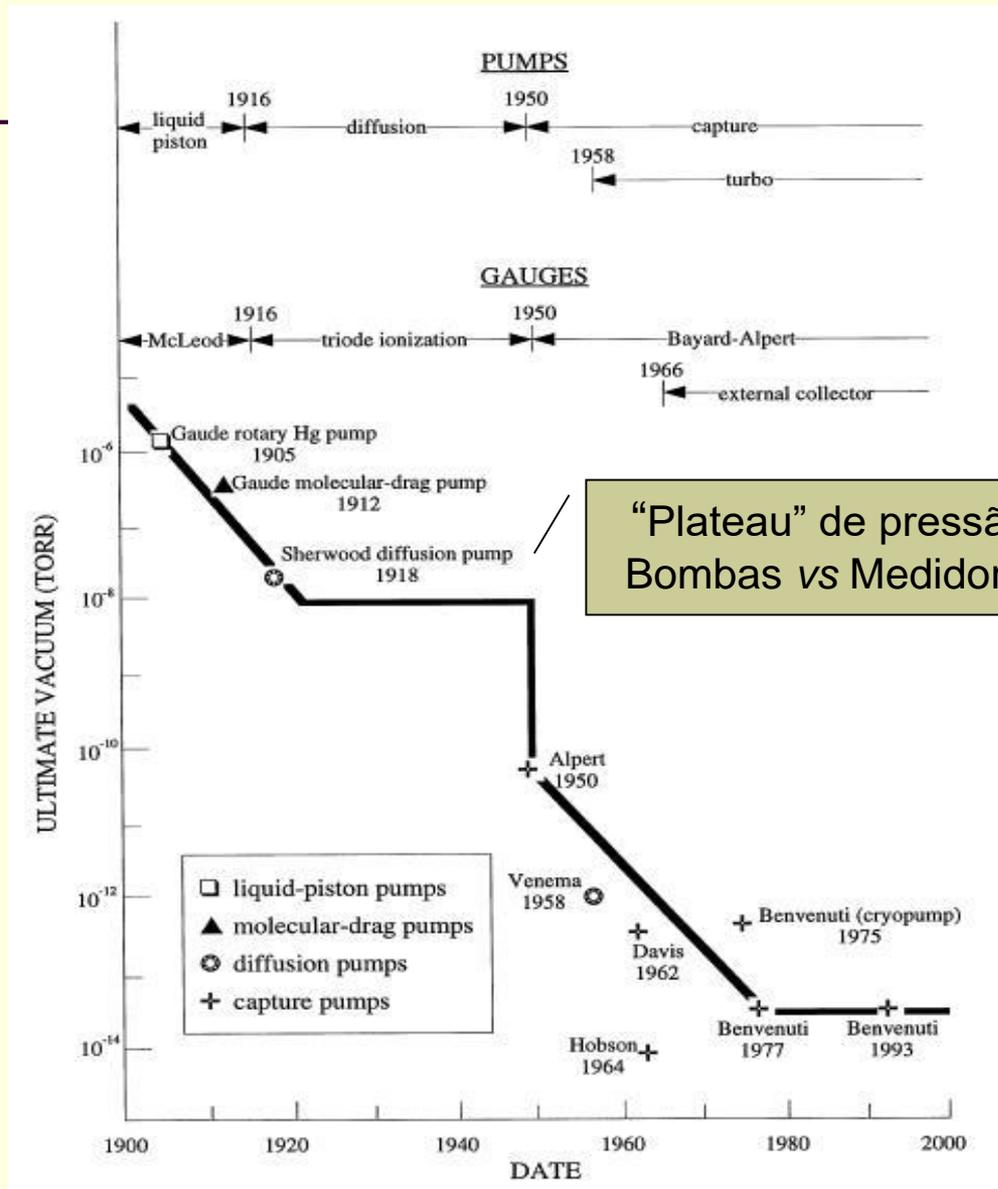
# Resumo Histórico

- Panorama da evolução da tecnologia de vácuo até 1900



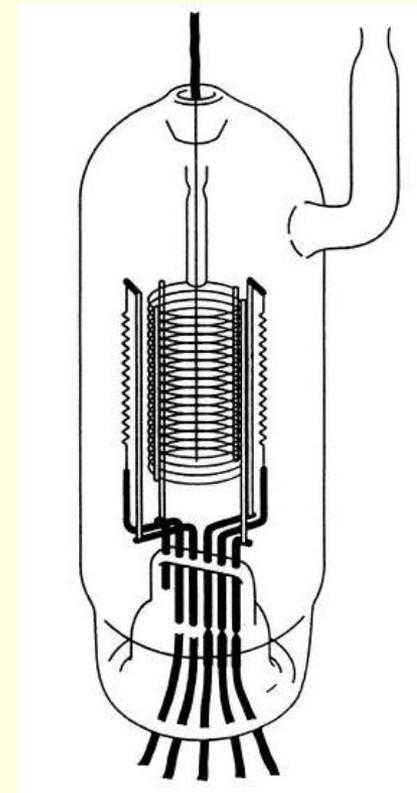
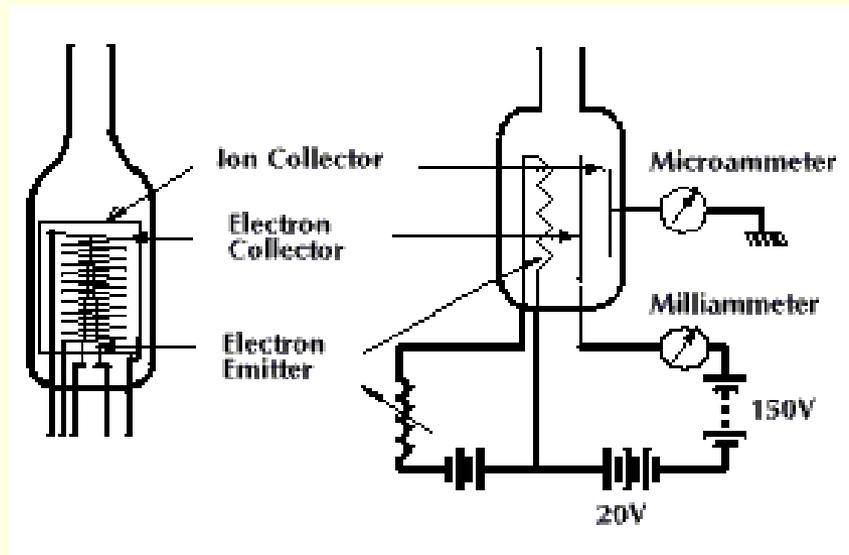
# Resumo Histórico

- Evolução da tecnologia de vácuo 1900-2000
- Desenvolvimento constante
- Era dos grandes aceleradores



# Resumo Histórico

- 1950 – Trípodo de ionização e o manômetro Bayard-Alpert



Limitação inferior na medida de pressão ( $10^{-8}$  Torr)

# Conceitos Gerais

---

- Pressão: **força exercida por unidade de área.**

Unidades de medidas de pressão.

Unidades: atm, mmHg, torr, bar (dina/cm<sup>2</sup>) e Pa (N/m<sup>2</sup>)

1 atm = 760 mmHg

1 mmHg = 1 Torr

1 bar (dina/cm<sup>2</sup>) = 100000 Pa

Pré-vácuo: > 10<sup>-3</sup> Torr

Alto-vácuo: até 10<sup>-7</sup> Torr

Ultra-alto-vácuo: < 10<sup>-8</sup> Torr

# Livre caminho médio

---

$$\lambda = \frac{5 \times 10^{-3} \text{ cm}}{P(\text{Torr})}$$

Pré-vácuo:  $\approx 10^{-3}$  Torr -> 5 cm

Alto-vácuo:  $\approx 10^{-5}$  Torr -> 5 m

Ultra-alto-vácuo:  $\approx 10^{-8}$  Torr -> 5 km

# Tabela de conversão

	<b>bar</b>	<b>mbar</b>	<b>Pa (N/m<sup>2</sup>)</b>	<b>atm</b>	<b>torr</b>
<b>bar</b>	1	10 <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup>	0,986923	750,062
<b>mbar</b>	10 <sup>-3</sup>	1	10 <sup>2</sup>	0,9869×10 <sup>-3</sup>	0,750062
<b>Pa</b>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-2</sup>	1	0,9869×10 <sup>-5</sup>	0,75×10 <sup>-2</sup>
<b>atm</b>	1,0132	1,0132×10 <sup>3</sup>	1,0132×10 <sup>5</sup>	1	760
<b>torr</b>	1,3332×10 <sup>-3</sup>	1,33322	1,33322×10 <sup>2</sup>	1,3158×10 <sup>-3</sup>	1

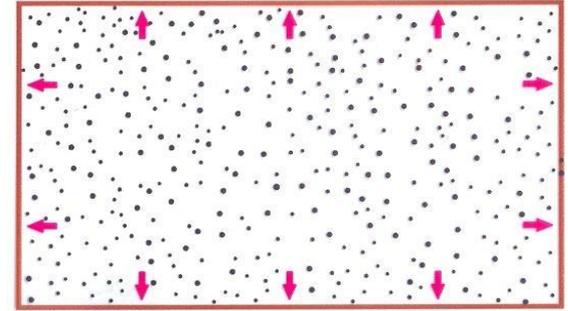
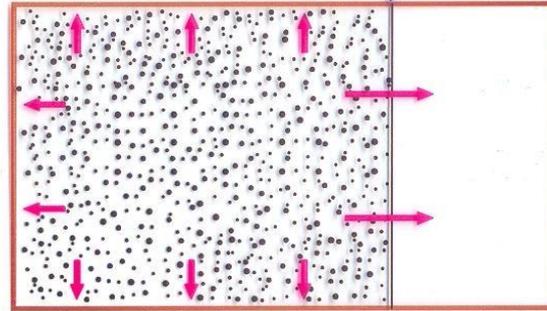
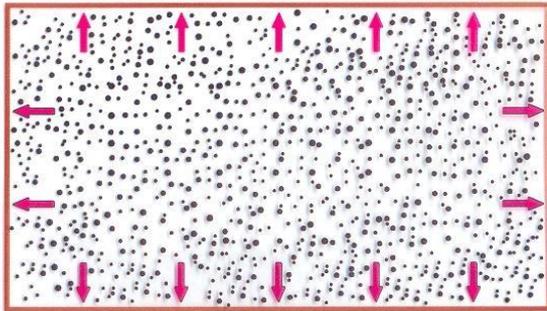
# Conceitos Gerais

## ■ Alguns dados à temperatura ambiente

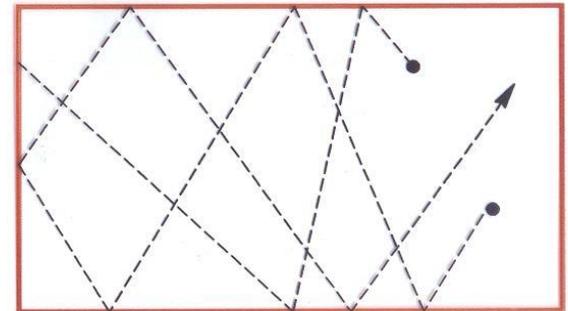
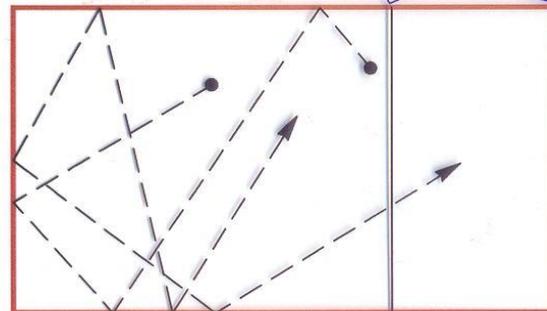
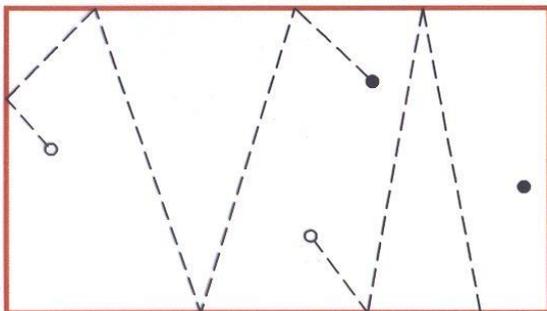
Pressão (Torr)	760	1,0E-03	1,0E-08	1,0E-10	1,0E-12	1,0E-14	1,0E-16
Caminho livre médio	7 $\mu\text{m}$	5 cm	5 km	500 km	$5 \times 10^5$ km	$5 \times 10^6$ km	$5 \times 10^8$ km
Núm. de moléculas colidindo em $\text{cm}^2/\text{s}$	$3,0 \times 10^{23}$	$3,5 \times 10^{17}$	$3,5 \times 10^{12}$	$3,5 \times 10^{10}$	$3,5 \times 10^8$	$3,5 \times 10^6$	$3,5 \times 10^4$

# Regimes de escoamento de gases

## Regime Viscoso



## Regime Molecular



# Regimes de Escoamento de Gases

---

## **Regime Viscoso:**

Massa de gás, colisões entre moléculas, depende da viscosidade do gás,  
 $\lambda$  pequeno,  $\lambda \ll D$

Velocidades altas – fluxo turbulento

Velocidades baixas – fluxo laminar

$D.P \geq 1$  (cm Torr) (fluxo viscoso)

## **Regime Molecular:**

Colisões das moléculas com as paredes do sistema,  
 $\lambda$  grande,  $\lambda \gg D$

$D.P \leq 10^{-2}$  (cm Torr) (fluxo molecular)

# Conceitos Gerais

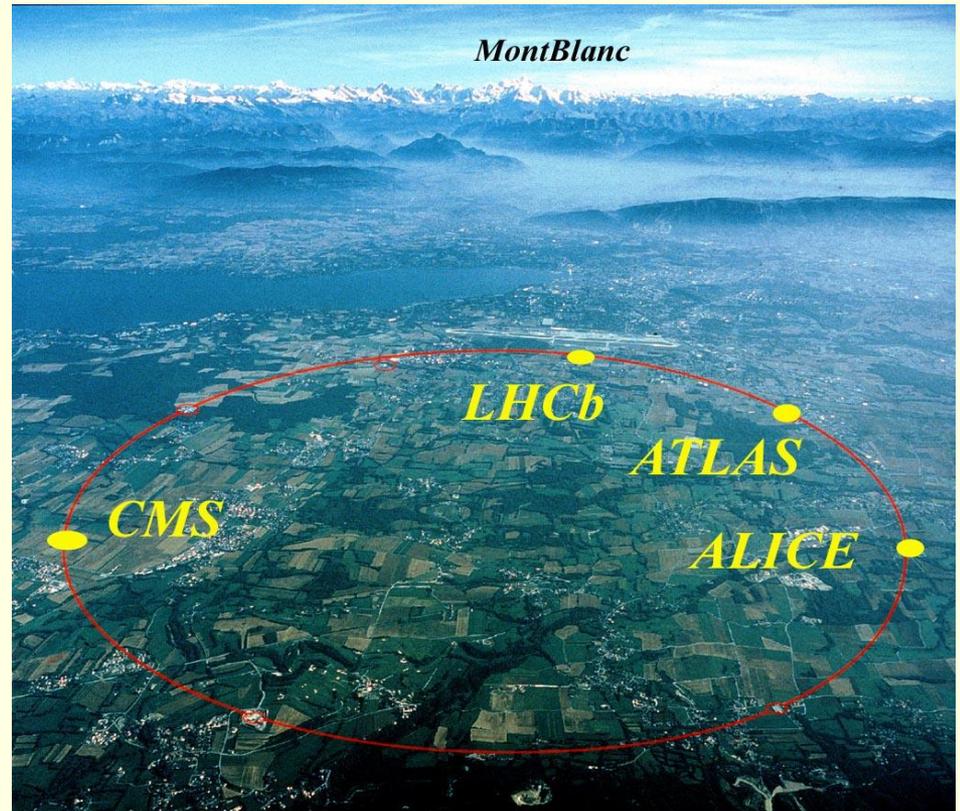
## ■ Grandes aceleradores

Ultra alto vácuo

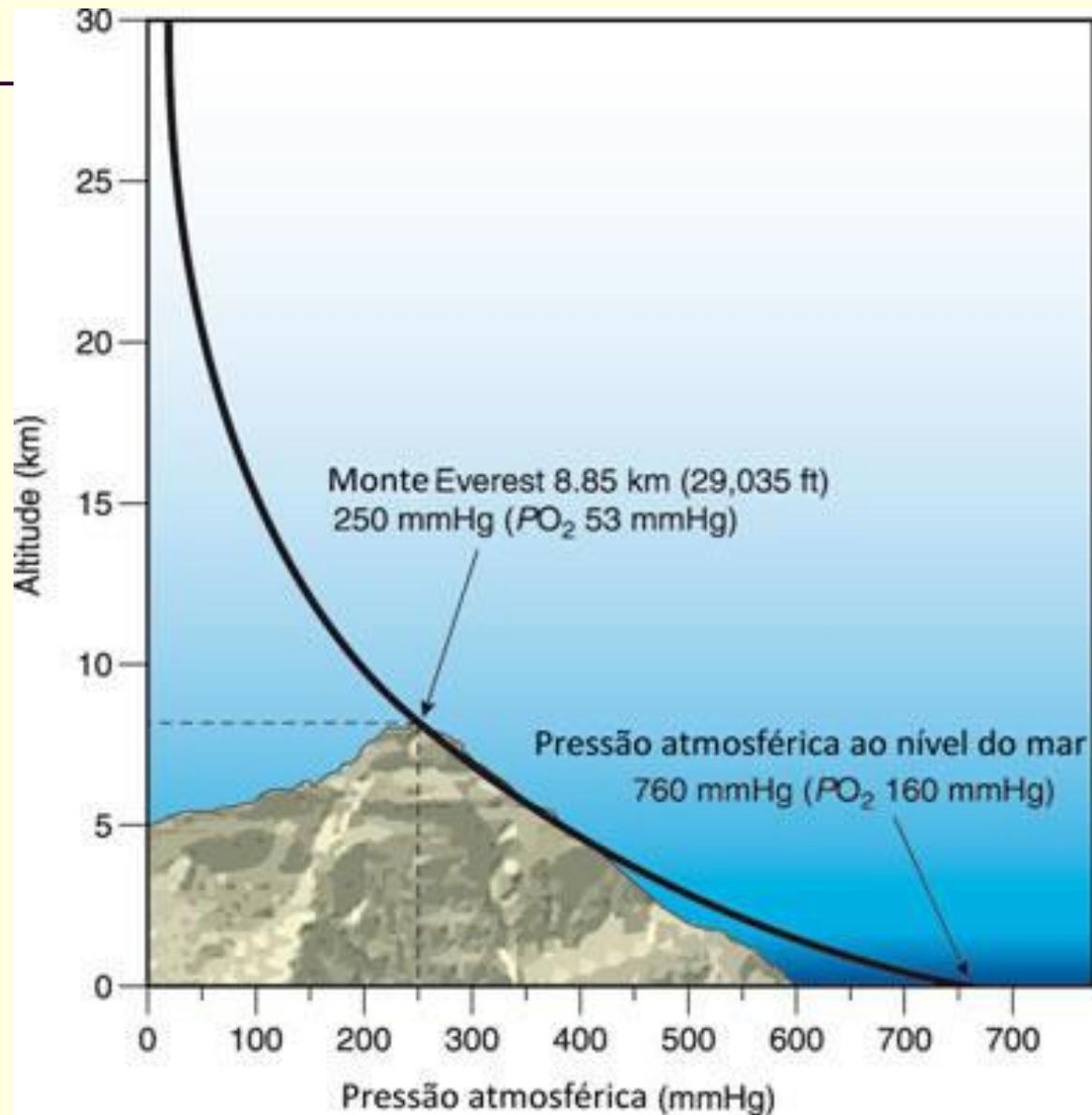
RHIC



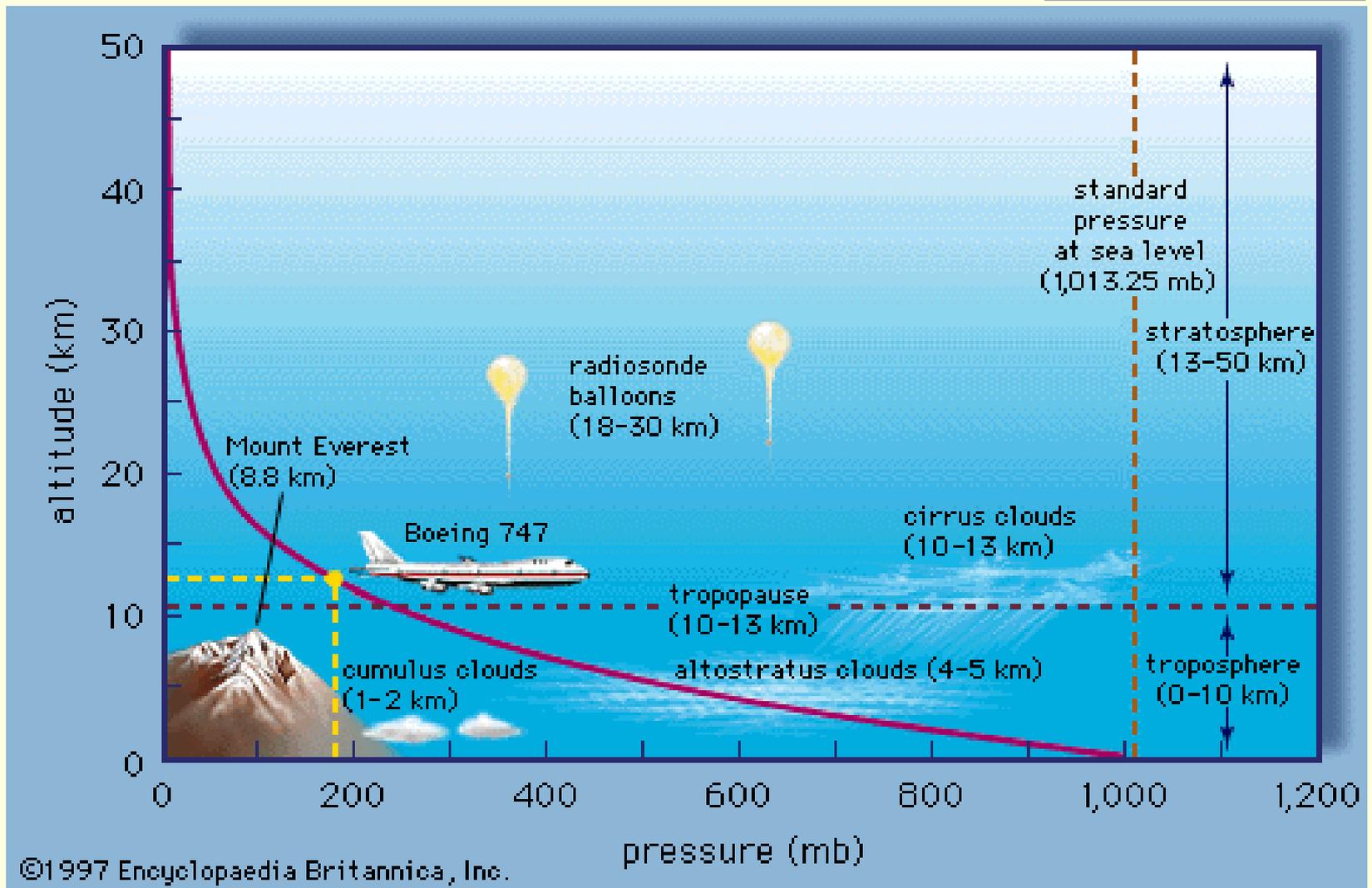
CERN



# Conceitos Gerais

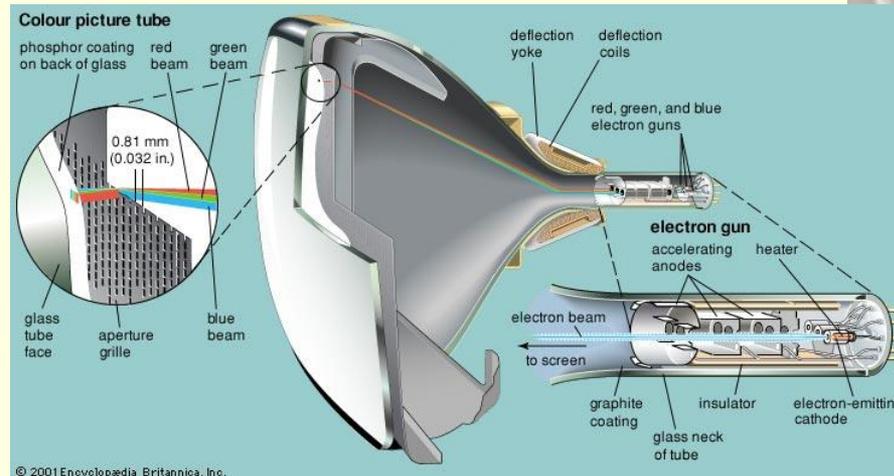


# Conceitos Gerais



# Aplicações

Physical Situation	Objective	Applications
Low pressure	Achieve pressure difference	Holding, Lifting, Transport, Forming
Low molecular density	Remove active atmospheric constituents	Lamps, Packaging, Leak detection
	Decrease energy transfer	Thermal insulation, Electrical insulation
Large mean free path	Avoid collisions	Electron tubes, cathode ray tubes, television tubes, photomultipliers, Accelerators, Storage rings, ...



# Aplicações

Ciência Básica  
Física Aplicada

Física Nuclear  
Estudos de Plasma

Física Atômica  
Nanotecnologia

Metalurgia a vácuo  
Microeletrônica  
Aeronáutica

Filmes finos  
Cristalografia  
Simulação Espacial

Criogenia  
Têmpera de metais  
Cinescópios

Embalagens  
Fontes de íons  
Microscópios eletrônicos

Espectrômetro de massa  
Aceleradores de partículas  
Secagem de plásticos

Feixes moleculares  
Difração de elétrons  
*Sputtering* de metais

Outros Exemplos:

Produção de lâmpadas e válvulas eletrônicas

Desgaseificação de metais fundidos e líquidos

Soldas por bombardeamento eletrônico

Estudo de superfícies e de novos materiais

Secagem de alimentos e liofilização

# Ciência e Tecnologia do Vácuo

## 4300323

### Professores:

Nilberto Heder Medina (Teoria e Laboratório)

Laboratório Aberto de Física Nuclear, sala 206

Sala de Aula (laboratório): 111, Ala II - térreo

Sala de Aula (teoria): 210, Ala II

tel: 3091-6763

**medina@if.usp.br**

Saulo Gabriel Alberton (Laboratório)

Ed. Oscar Sala, sala 122

tel: 3091-6961

alberton@if.usp.br

Sala de Aula: 111 Ala II – andar térreo

Laboratório Didático:

<http://portal.if.usp.br/tecvac> (apostilas)

Sociedade Brasileira de Vácuo:

<http://www.sbvacu.org.br/>

Stoa USP

<http://disciplinas.stoa.usp.br> (material didático)

# Programa da disciplina

---

Introdução à Tecnologia do Vácuo

Teoria Cinética dos Gases

Bombas e Medidores

Escoamento de gases (regimes)

Condutâncias

Variações da pressão

Fontes de gases de um sistema

Vazamentos: Modelos e Detecção

Armadilhas

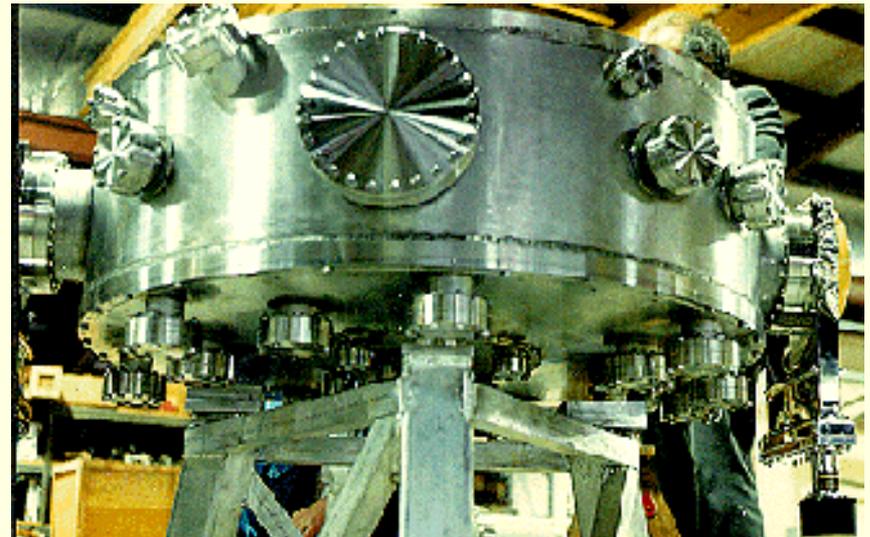
Permeação e desgaseificação

Evaporação

Cálculos de Sistemas de Vácuo e Aplicações

# Sistemas de Vácuo

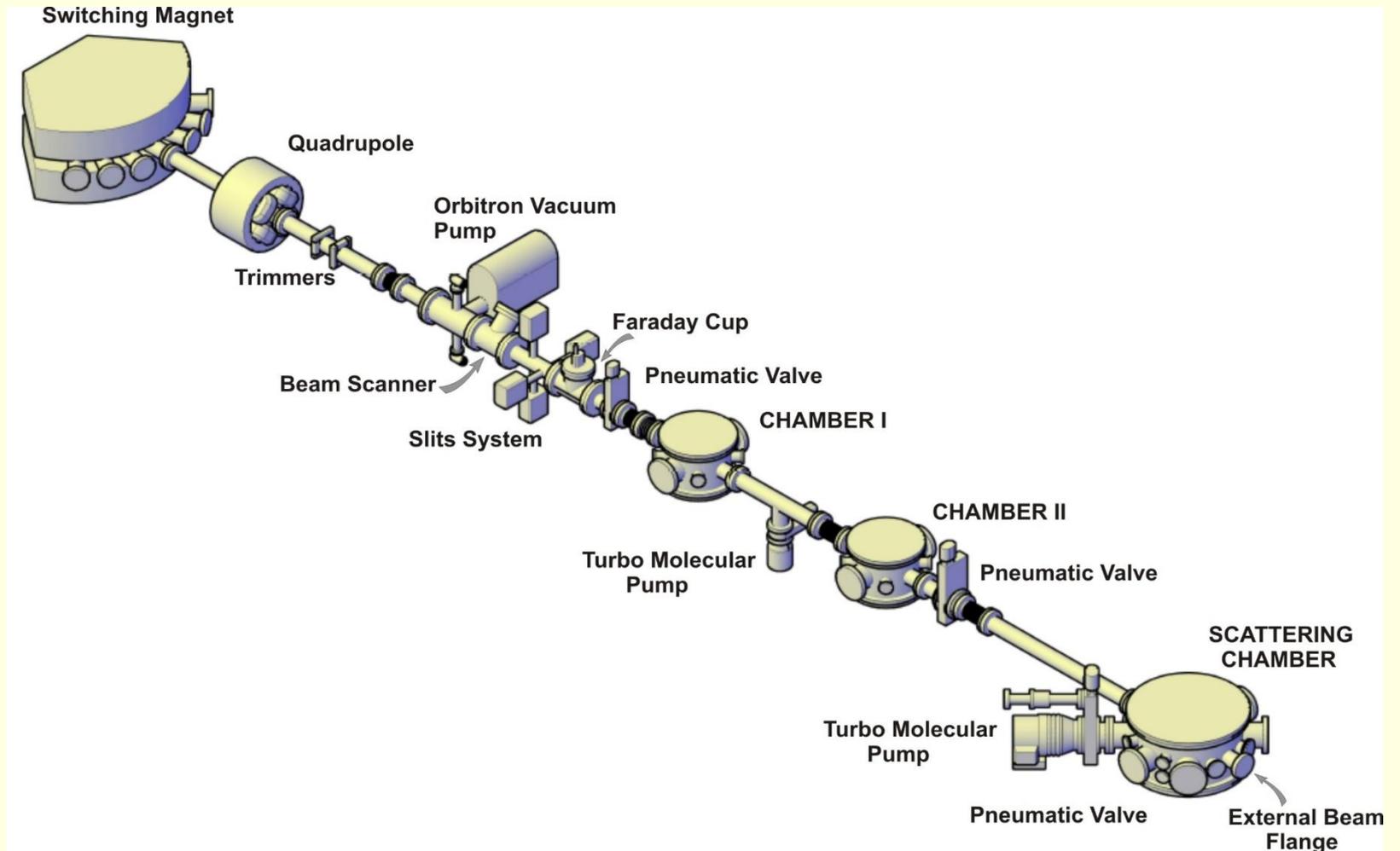
## Exemplos



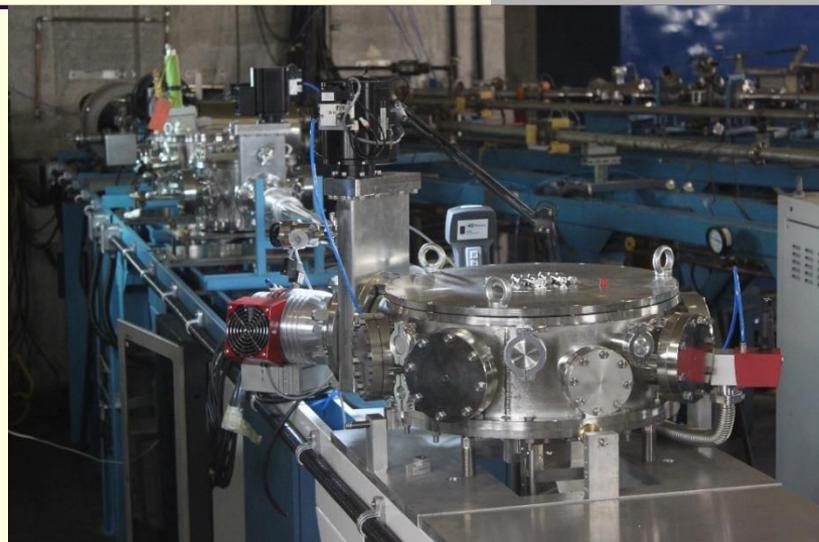
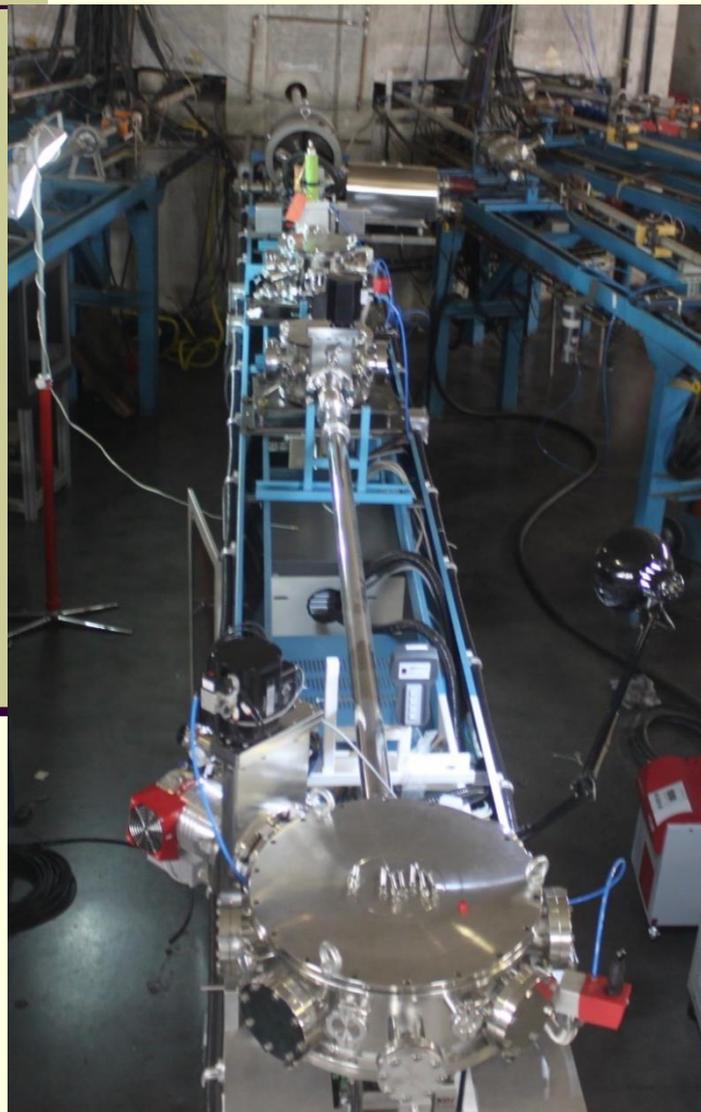
# Sala Experimental do acelerador Pelletron



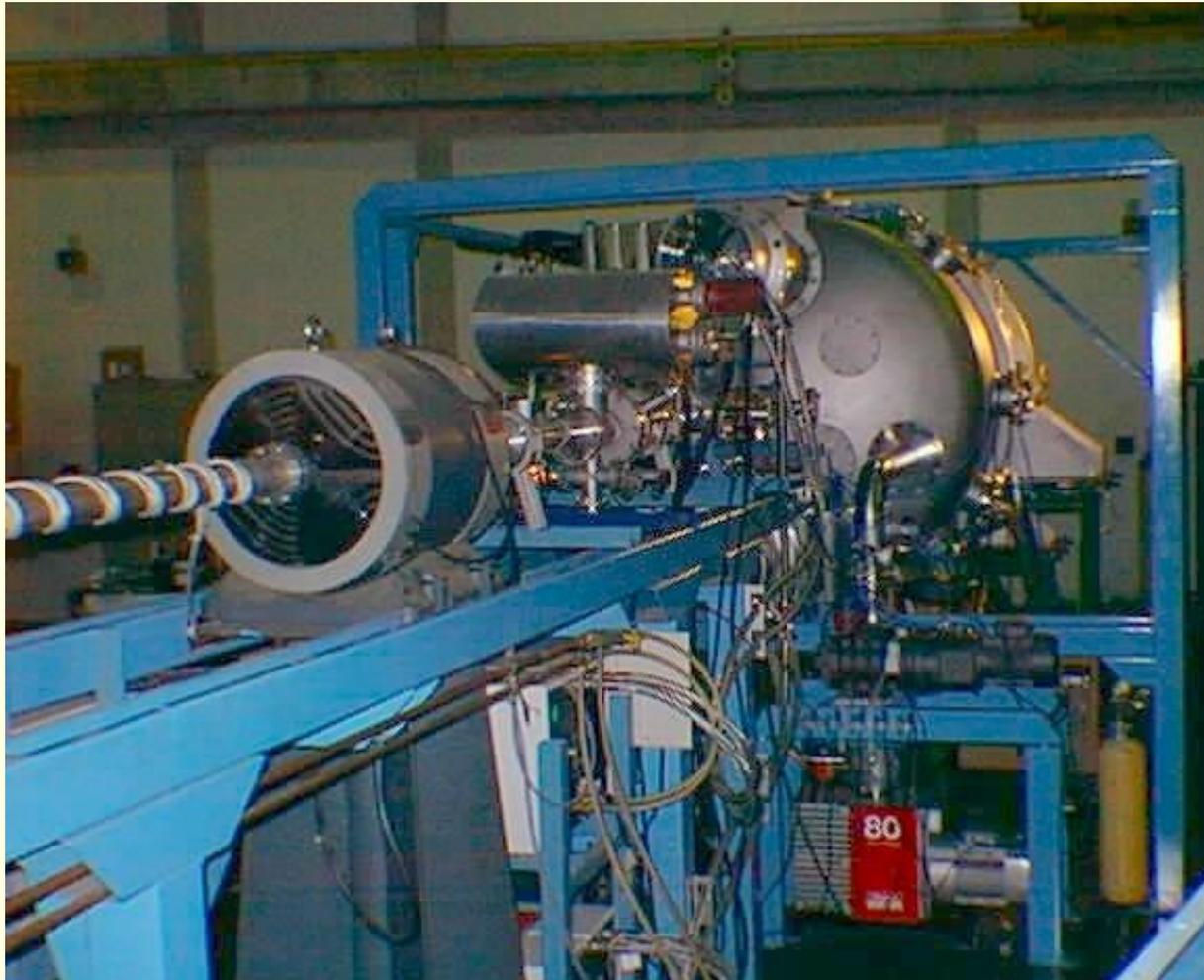
# Canalização 0° do Acelerador Pelletron



# Canalização 0° do Acelerador Pelletron

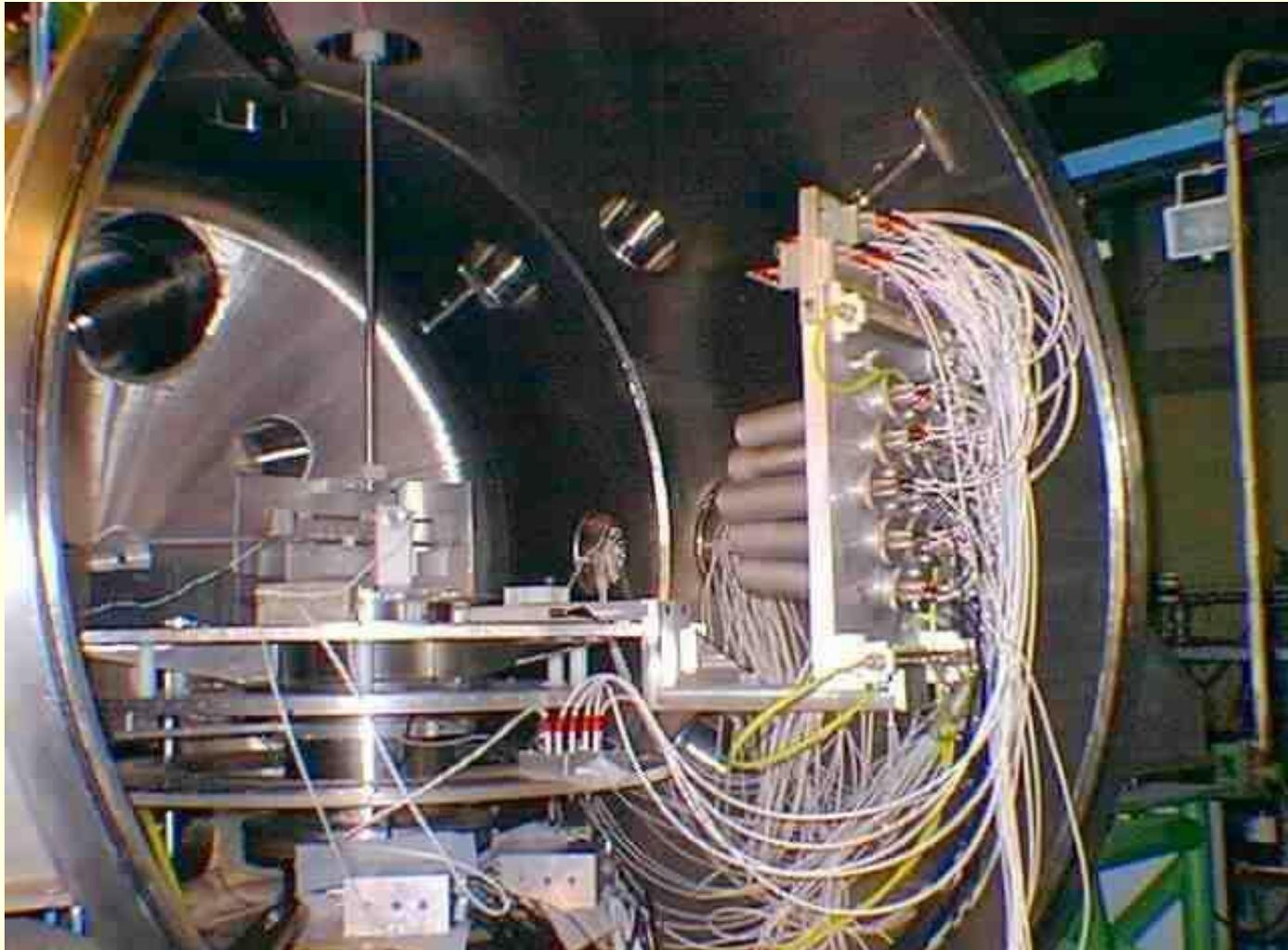


# Canalização 15° do Acelerador Pelletron

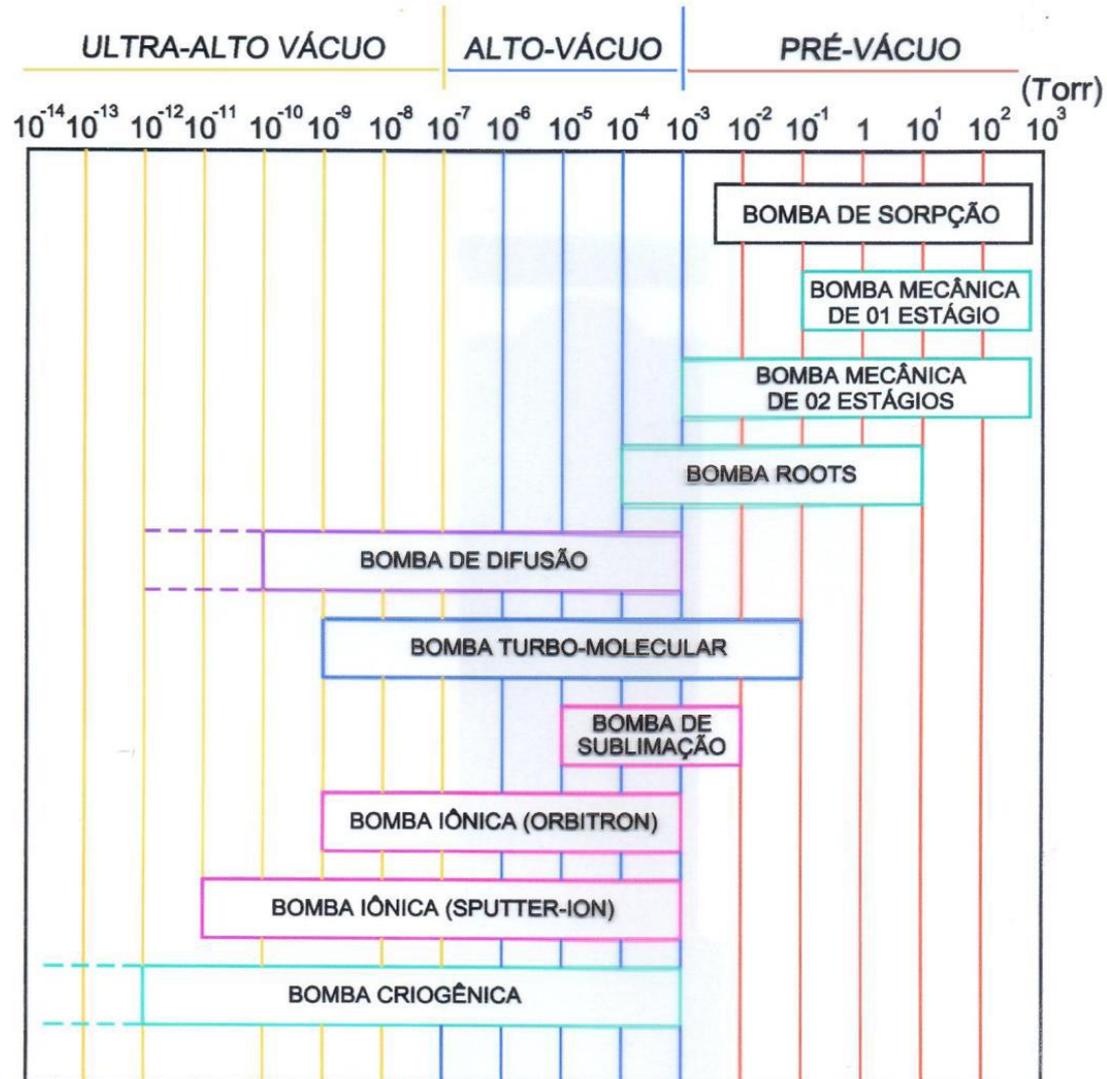


Atualmente está sendo montada no novo acelerador LINAC

# Interior de uma Câmara de Espalhamento



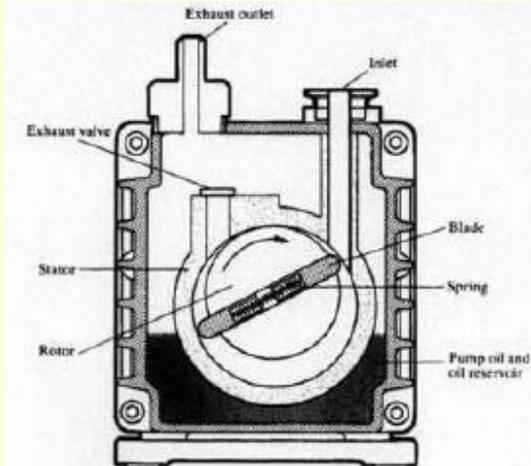
# Bombas de Vácuo



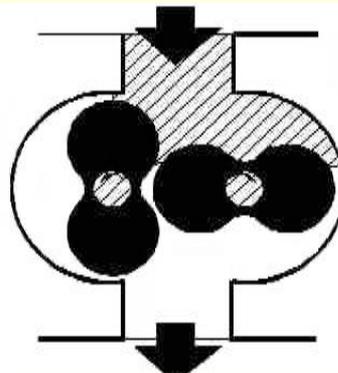
# Pré-vácuo

## Bombas mecânicas

### Bombas rotativas

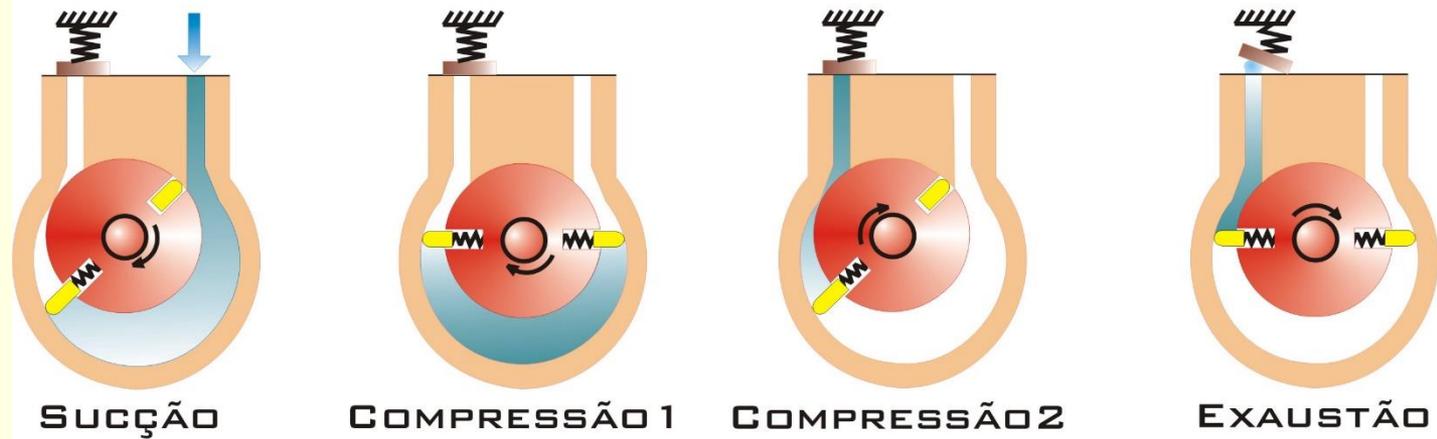


### Bombas roots

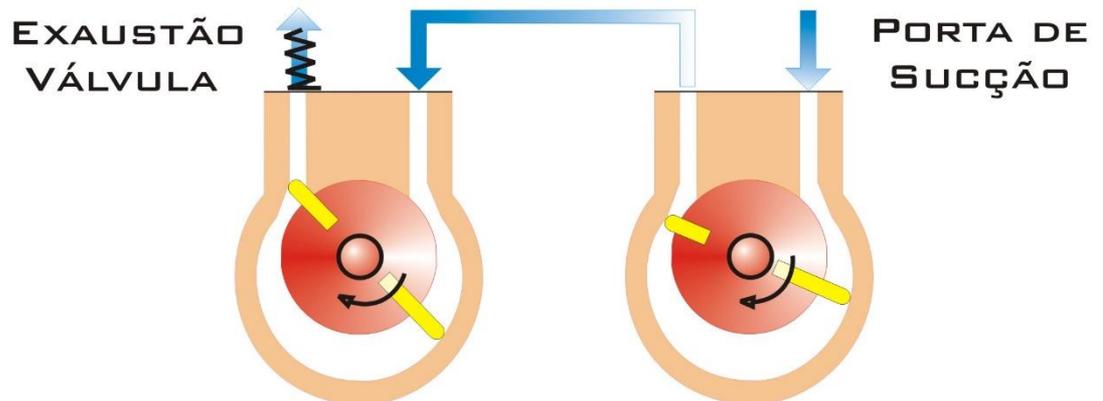


# Bomba rotativa

## BOMBA ROTATIVA SELADA À ÓLEO



## PROCESSO DE ESCAPE DE BOMBAS SELADAS À ÓLEO DE 2 ESTÁGIOS

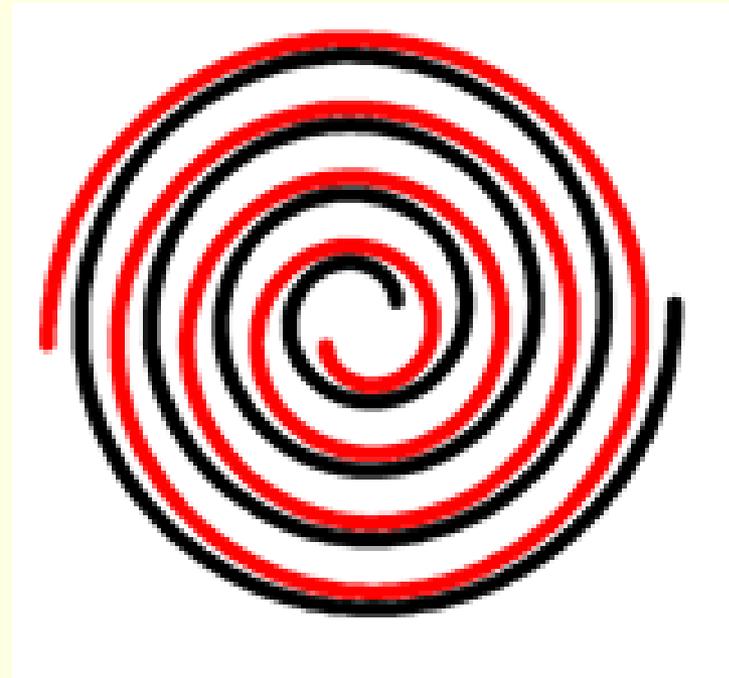


Funções do óleo:

- Vedação
- Lubrificação e ação anti-corrosiva
- refrigeração

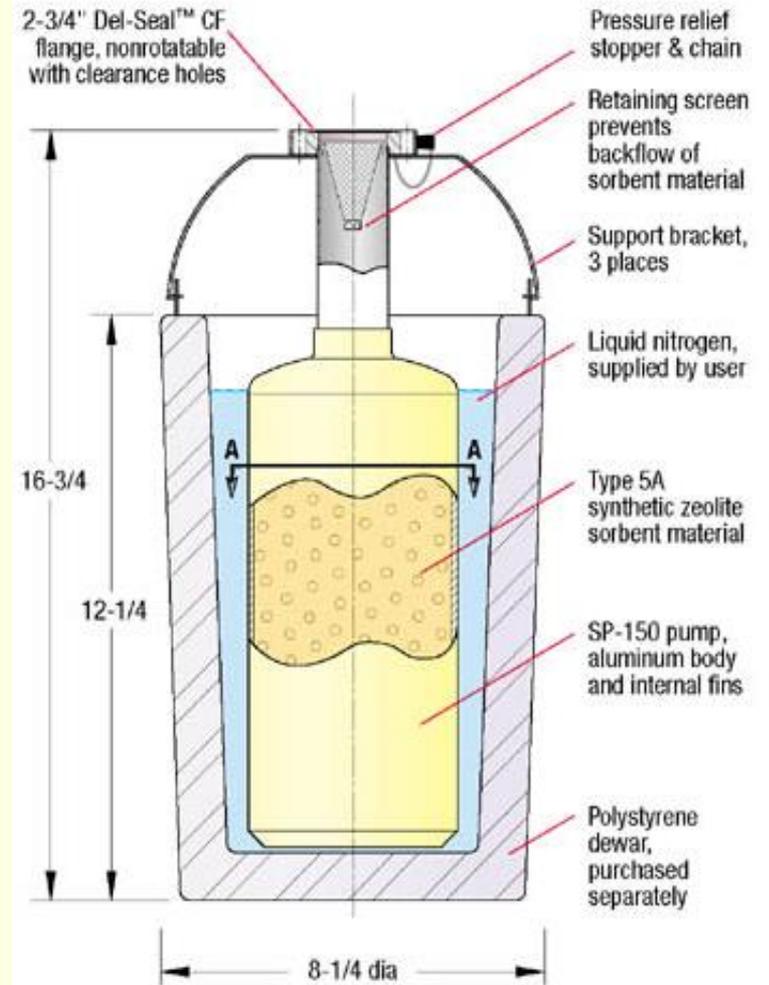
# Bomba Scroll

---



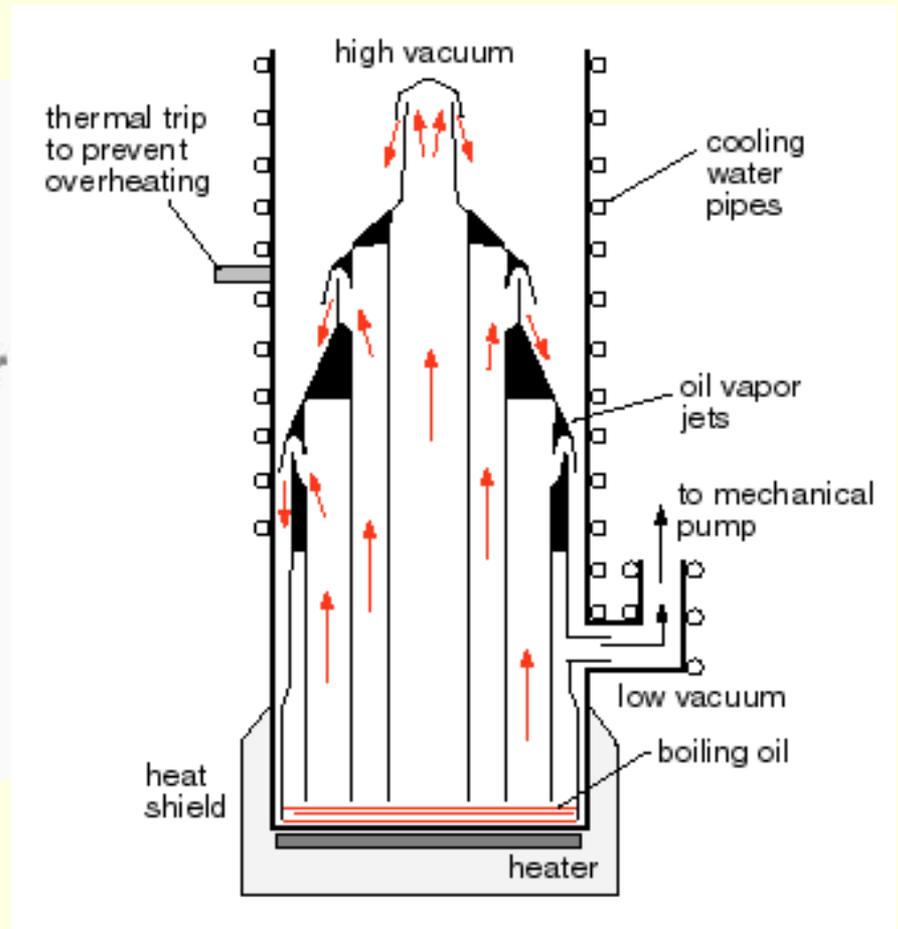
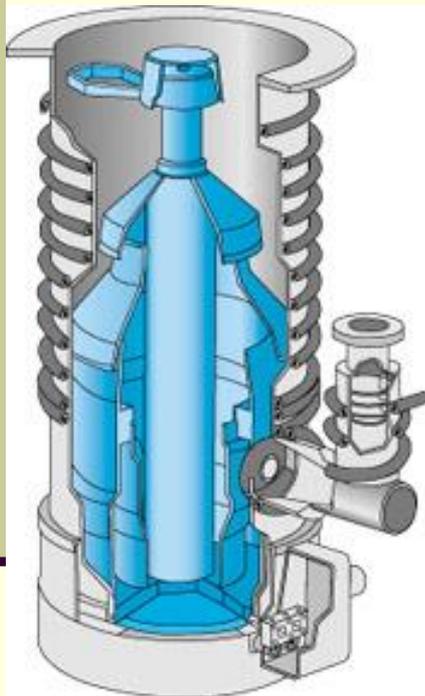
# Pré-vácuo

## Bombas de sorção



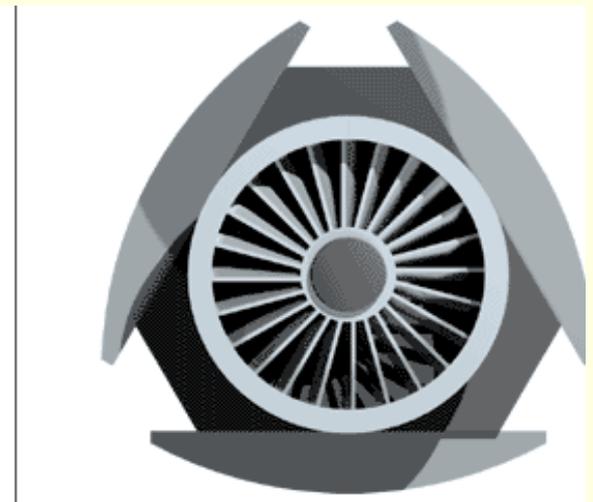
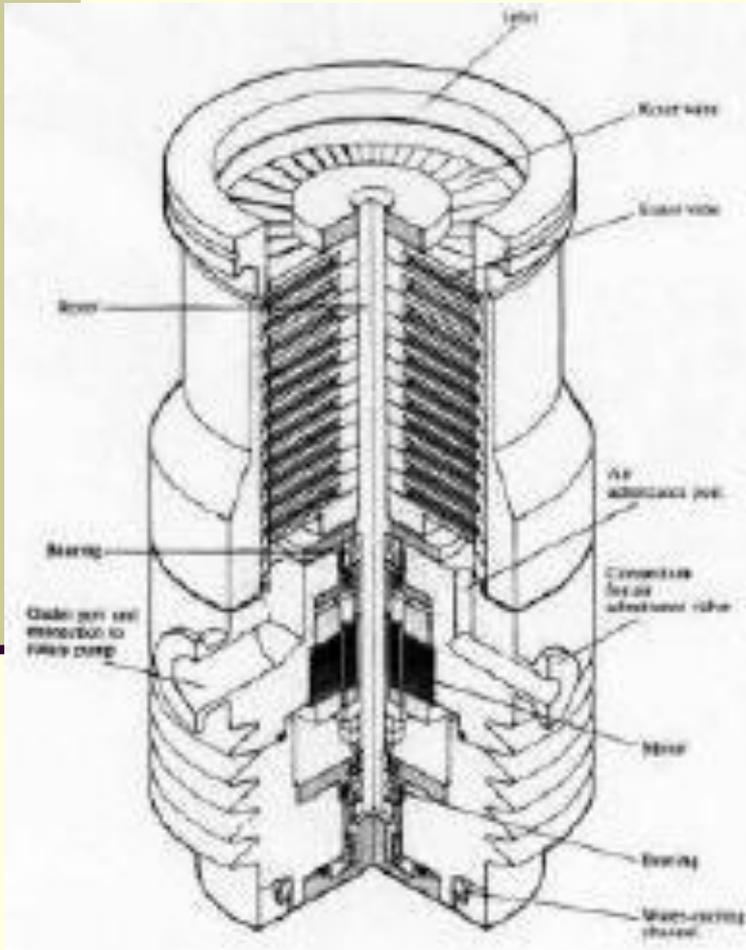
# Alto-vácuo

## Bomba Difusora



# Alto-vácuo

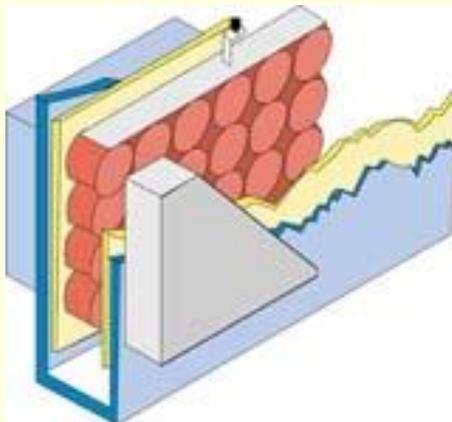
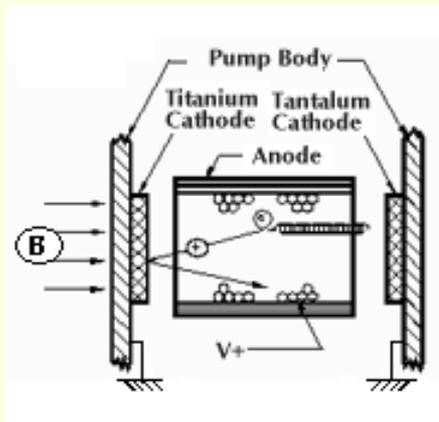
## Bomba Turbo-molecular





# Alto-vácuo

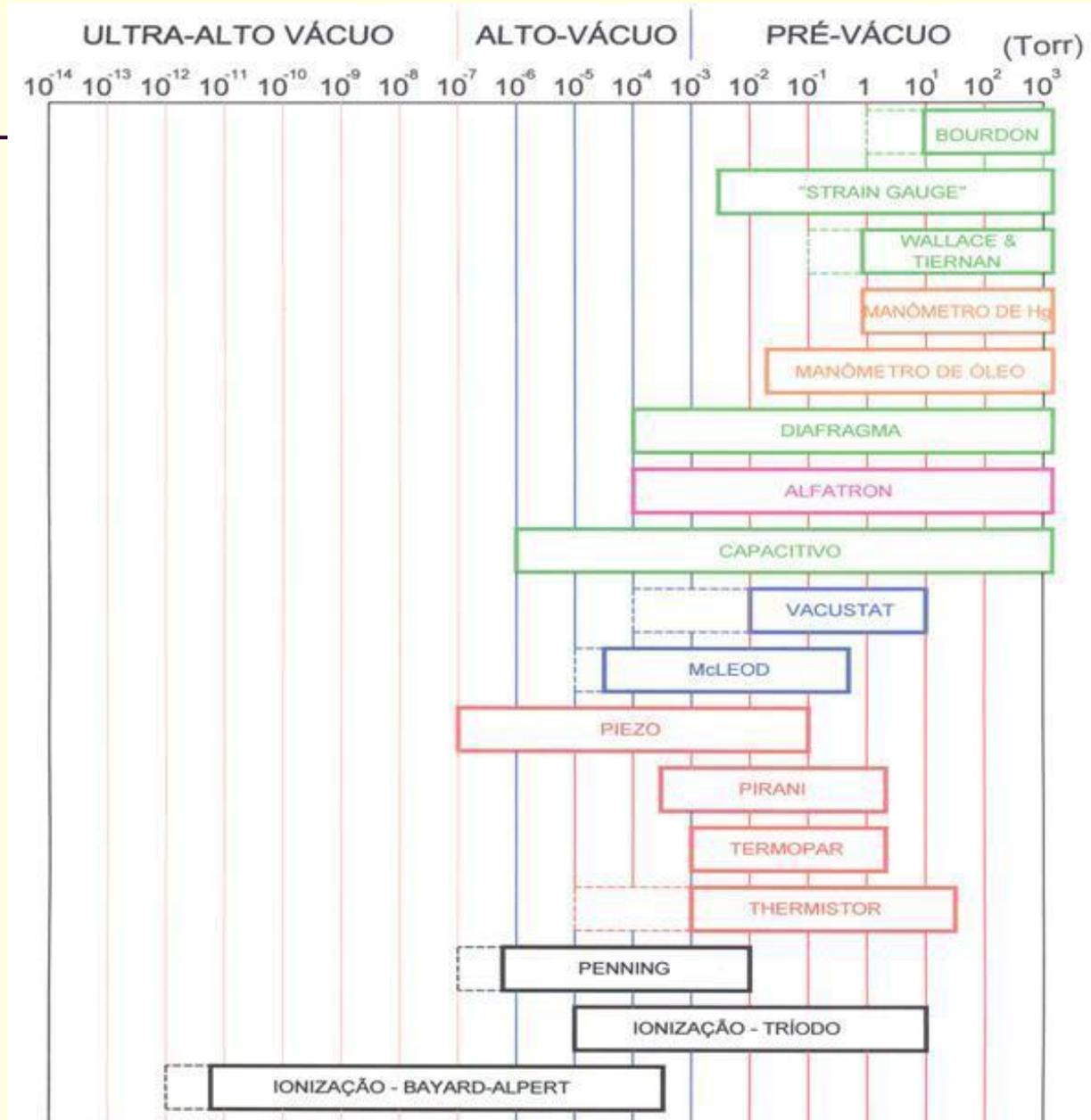
Bomba iônica



Bomba criogênica



# Medidores de Pressão



# Manômetros mecânicos

---

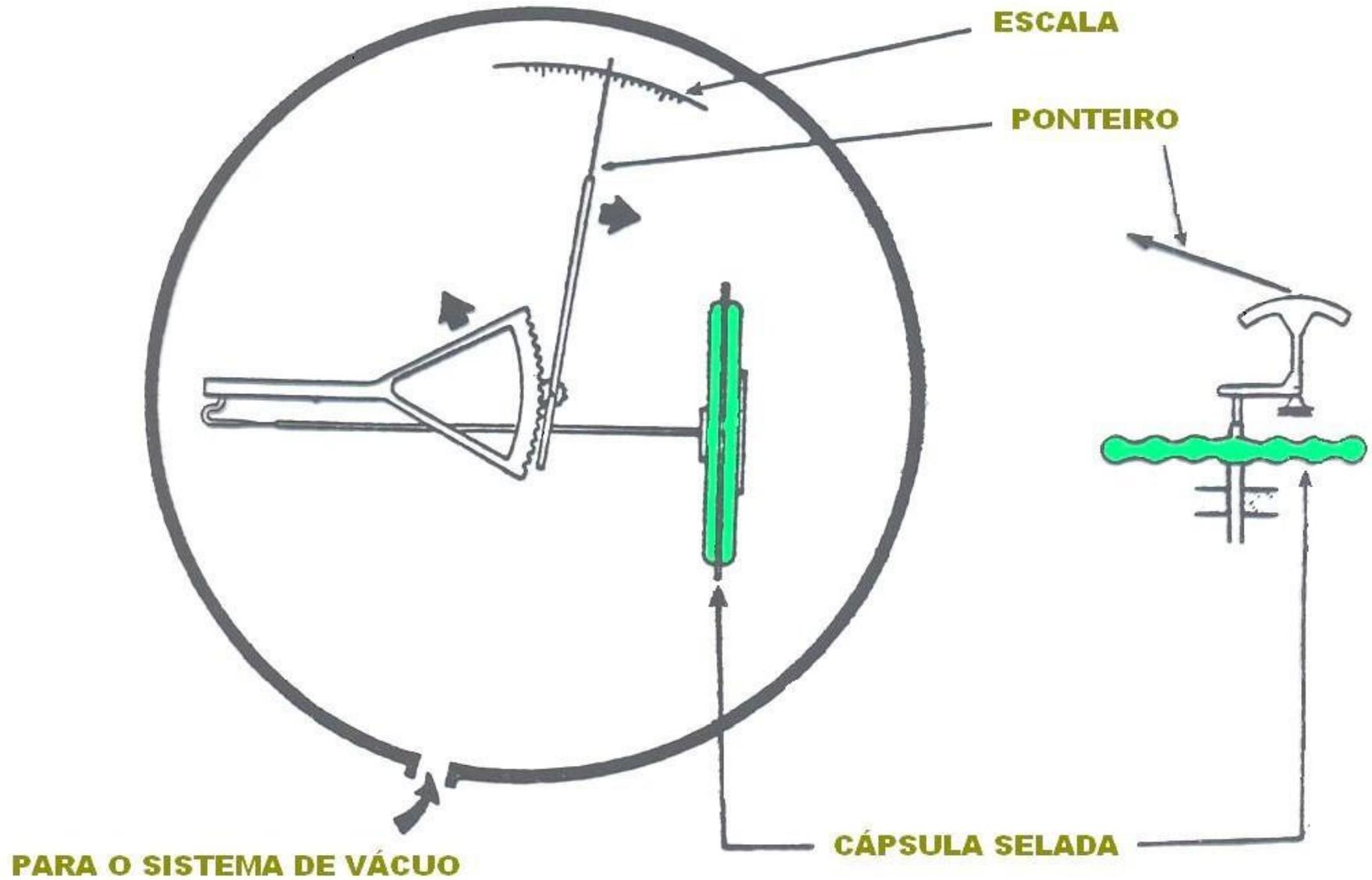
Bourdon



Wallace-Tiernan

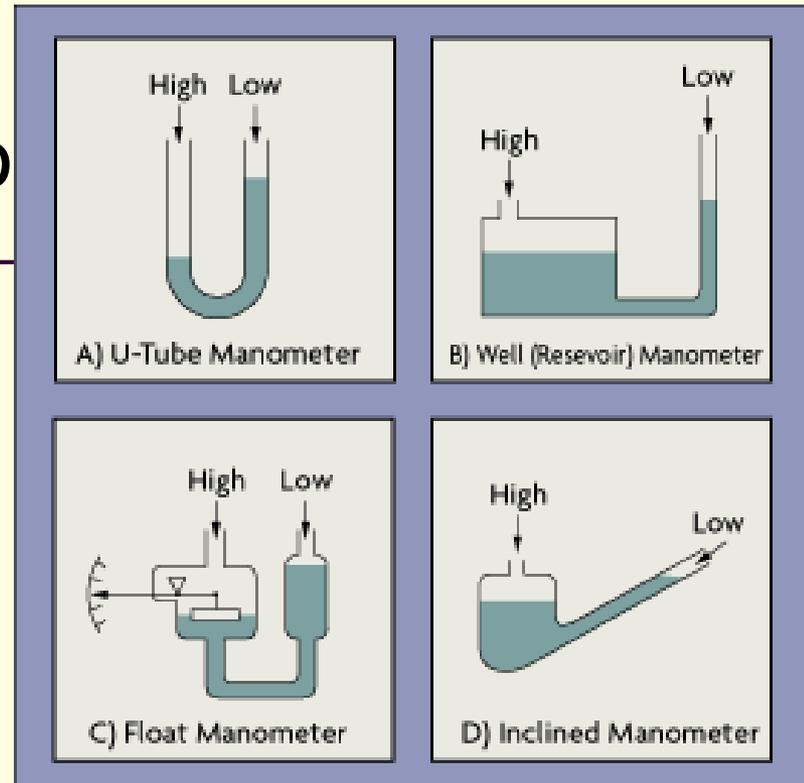


# Wallace-Tiernan



# Manômetros de mercúrio

McLeod

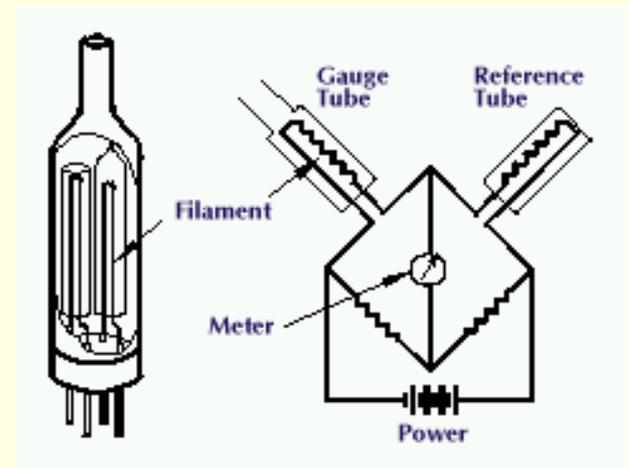
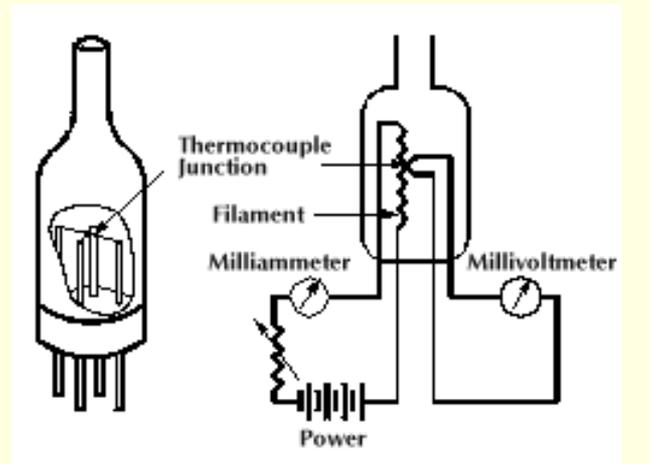


Vacustat



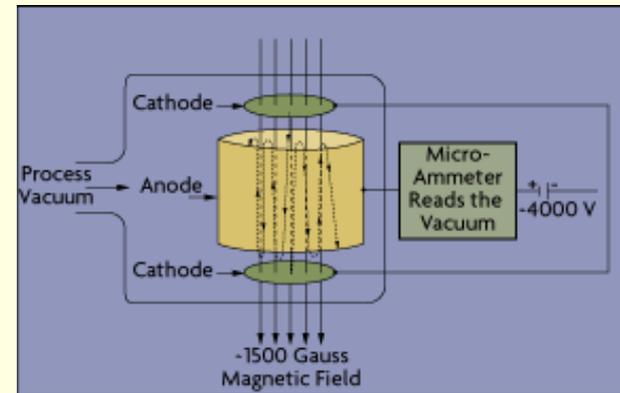
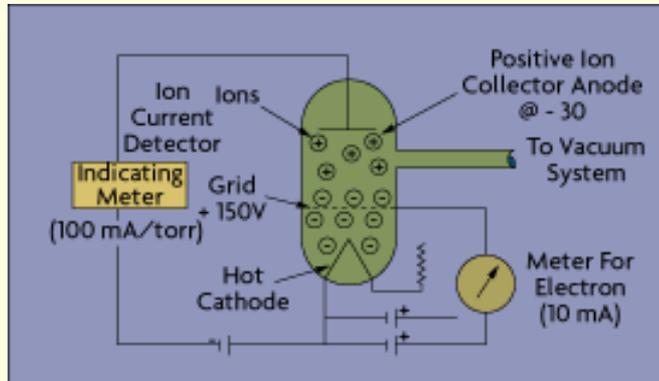
# Manômetros de termo-condutividade

Termopar, Pirani e thermistor

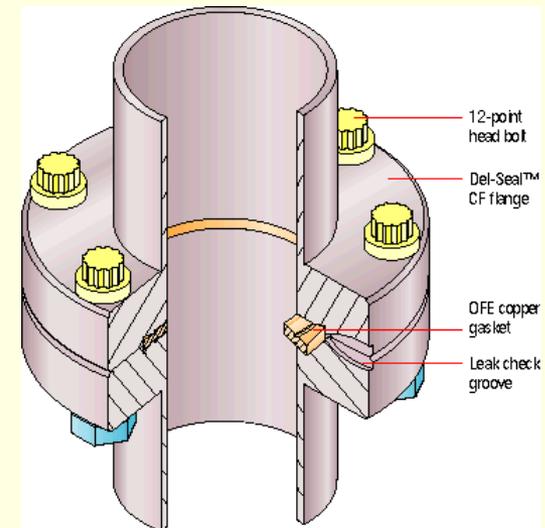
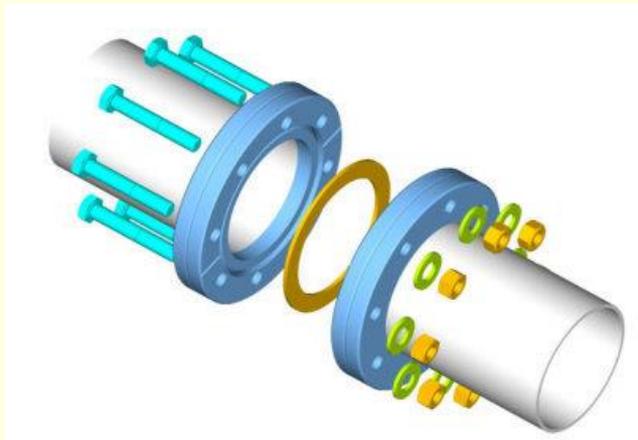


# Manômetros de ionização

Triodo, Bayard-Alpert e Penning

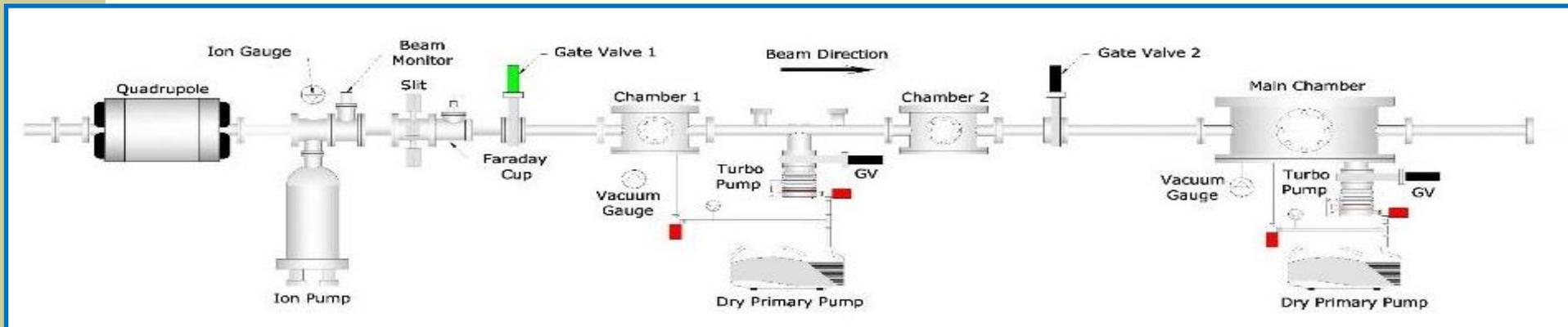


# Selagem com o-rings, gasket ou conflat



Escolha do material para a construção das câmaras:  
Alumínio, inox, latão, nylon, teflon, cobre, etc.

# Sistema de vácuo SAFIIRA



### 919 HOT CATHODE CONTROLLER

FILAMENT DEGAS

ON-OFF-REMOTE

POWER OFF ON

SET POINTS

ON-OFF-ADJUST

SPI SP2

PROTECTION SENSITIVITY

ADJUST

DISPLAY FUNCTION

PRESSURE SP1 SP2 PROTECT SENSITIVITY

TORR X 10

HPS Division

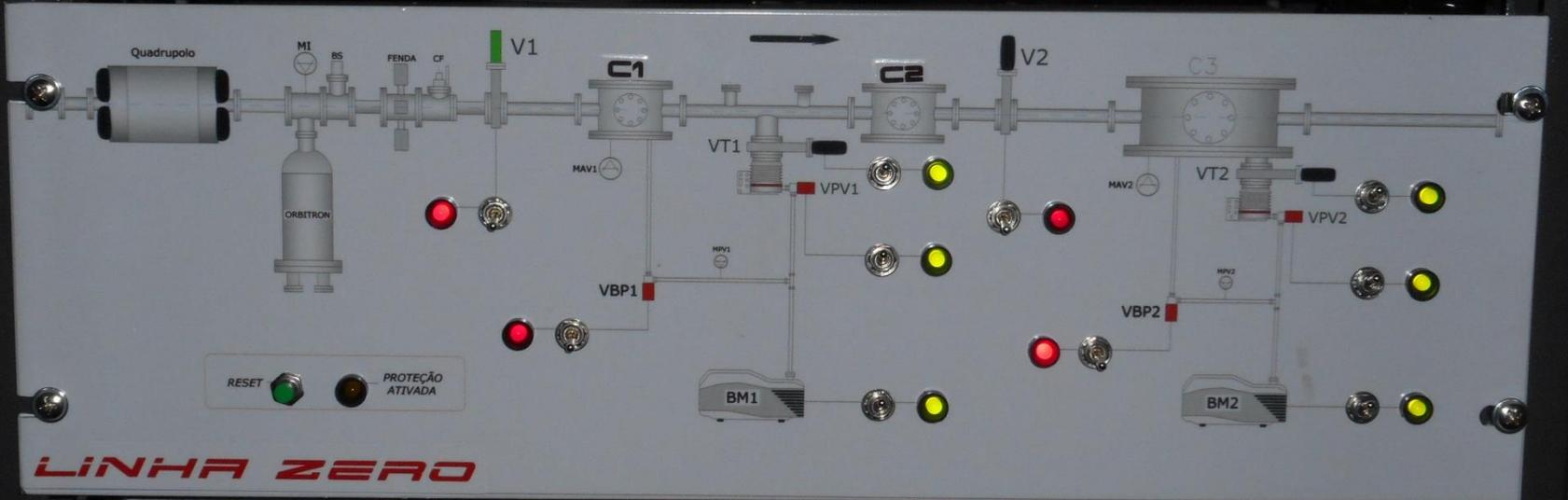
### PFEIFFER VACUUM

MaxiGauge™

1) MPV1  
2) MPV2  
3) MAV1  
4) MAV2

OUTGASING	2.4E-02 Torr	
CH	1.7E-02 Torr	
OUTGASING	no sensor	
CH	no sensor	
OUTGASING	1.2E-03 Torr	
CH	1.4E-06 Torr	

Sensor Single Mode

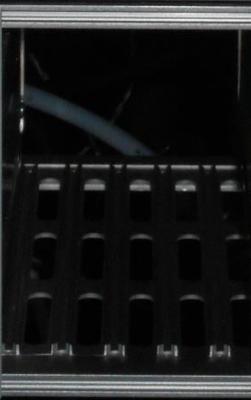


### DCU PFEIFFER VACUUM

TURBO 1

S10: Drucurrent 0.18 A

DCU



### DCU PFEIFFER VACUUM

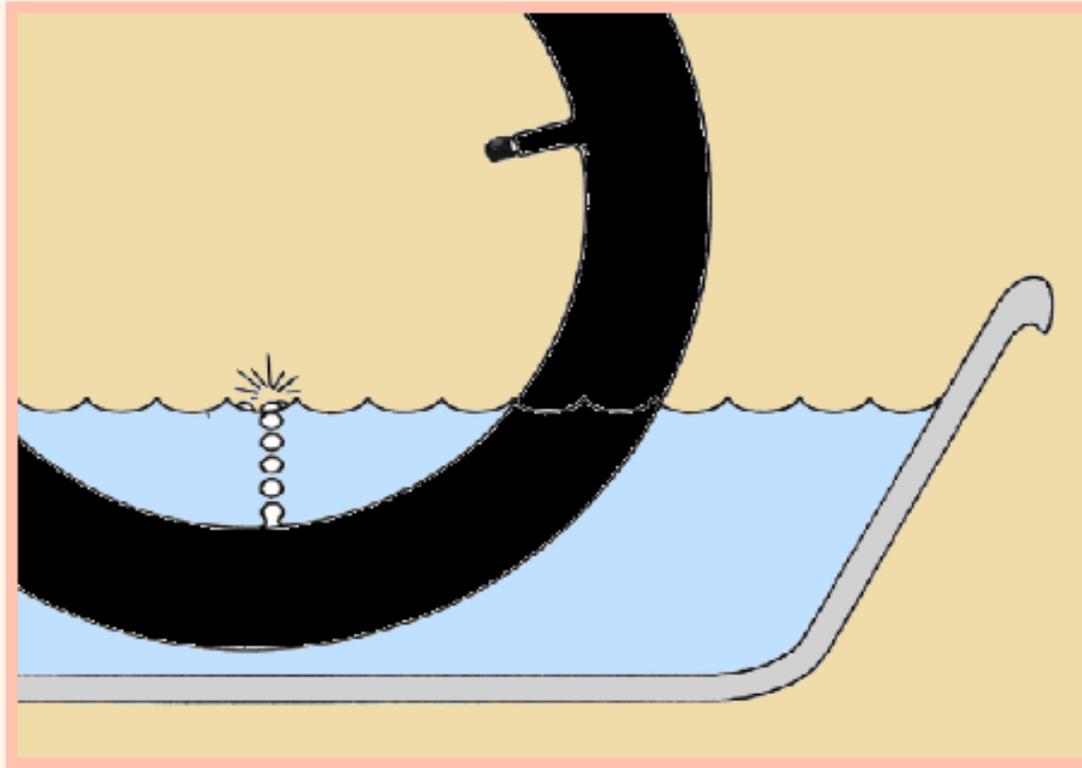
TURBO 2

S10: Drucurrent 0.59 A

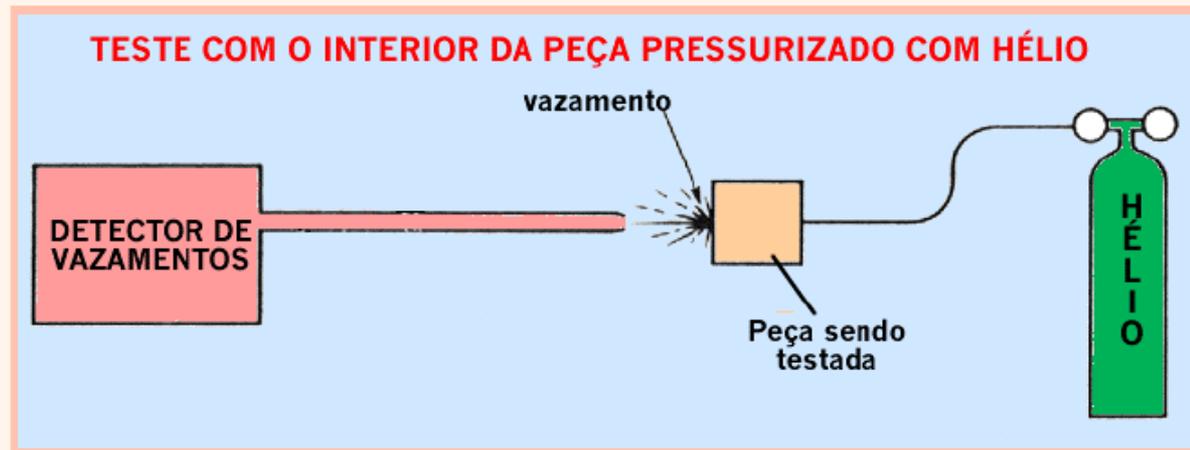
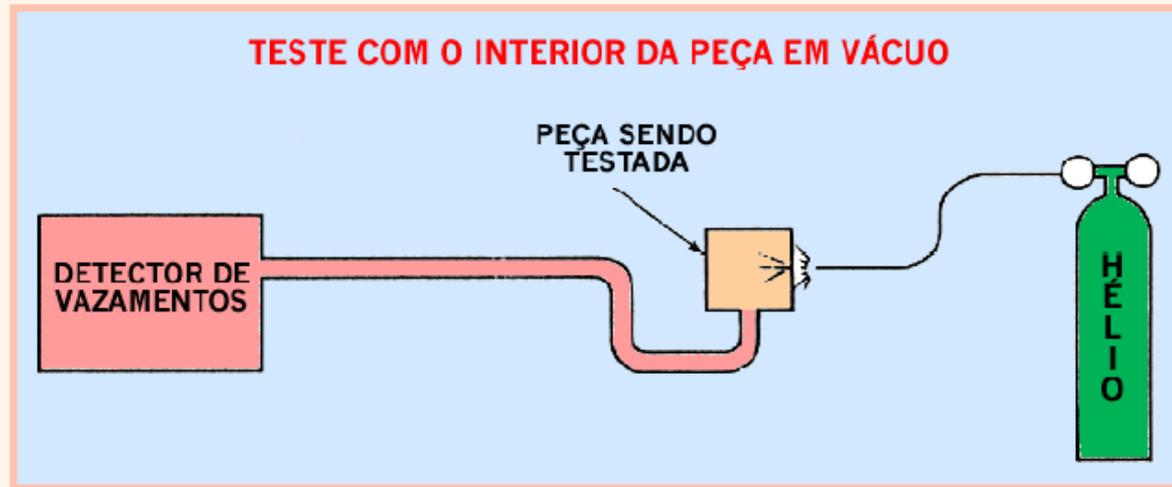
DCU



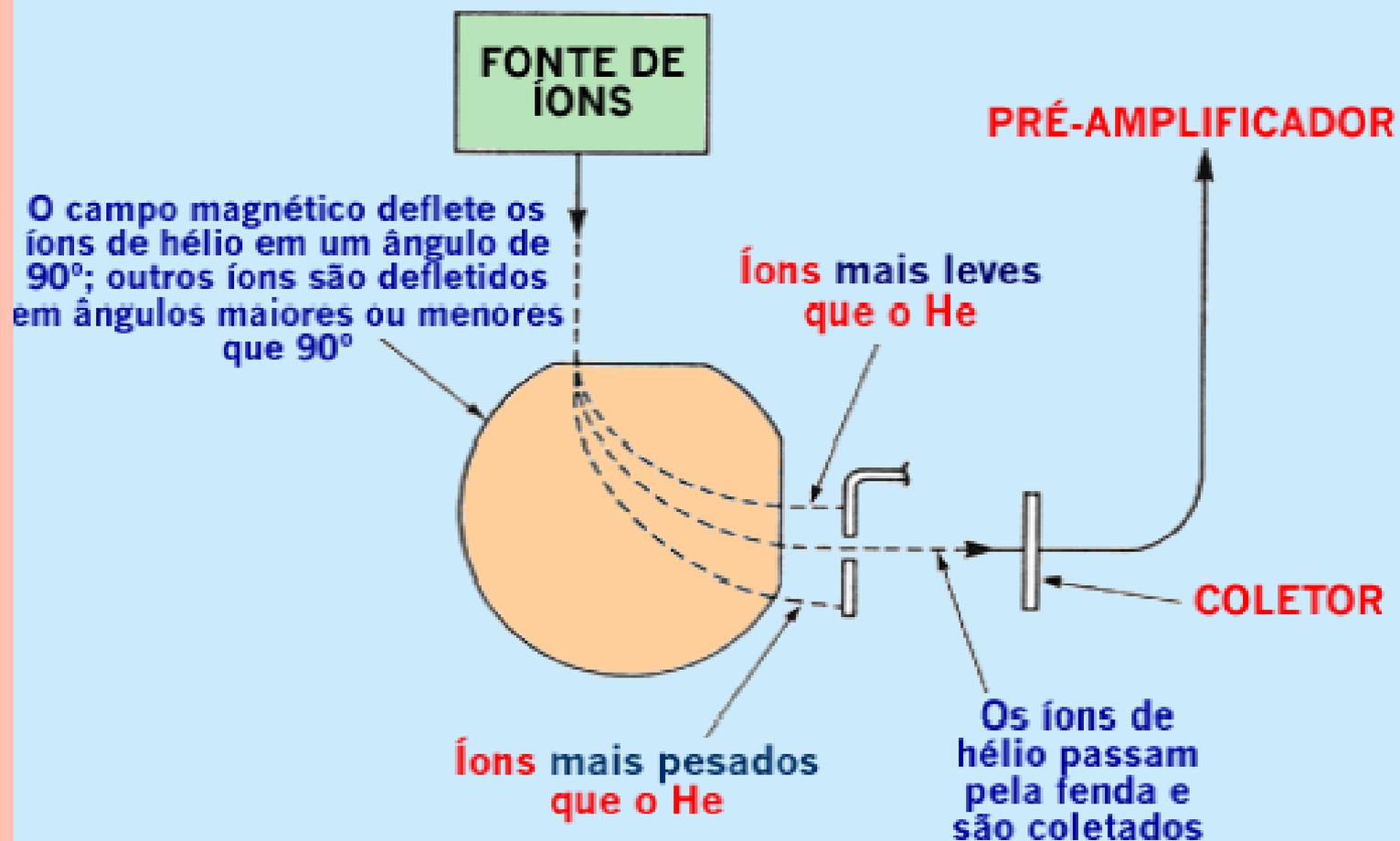
# Detecção de Vazamentos



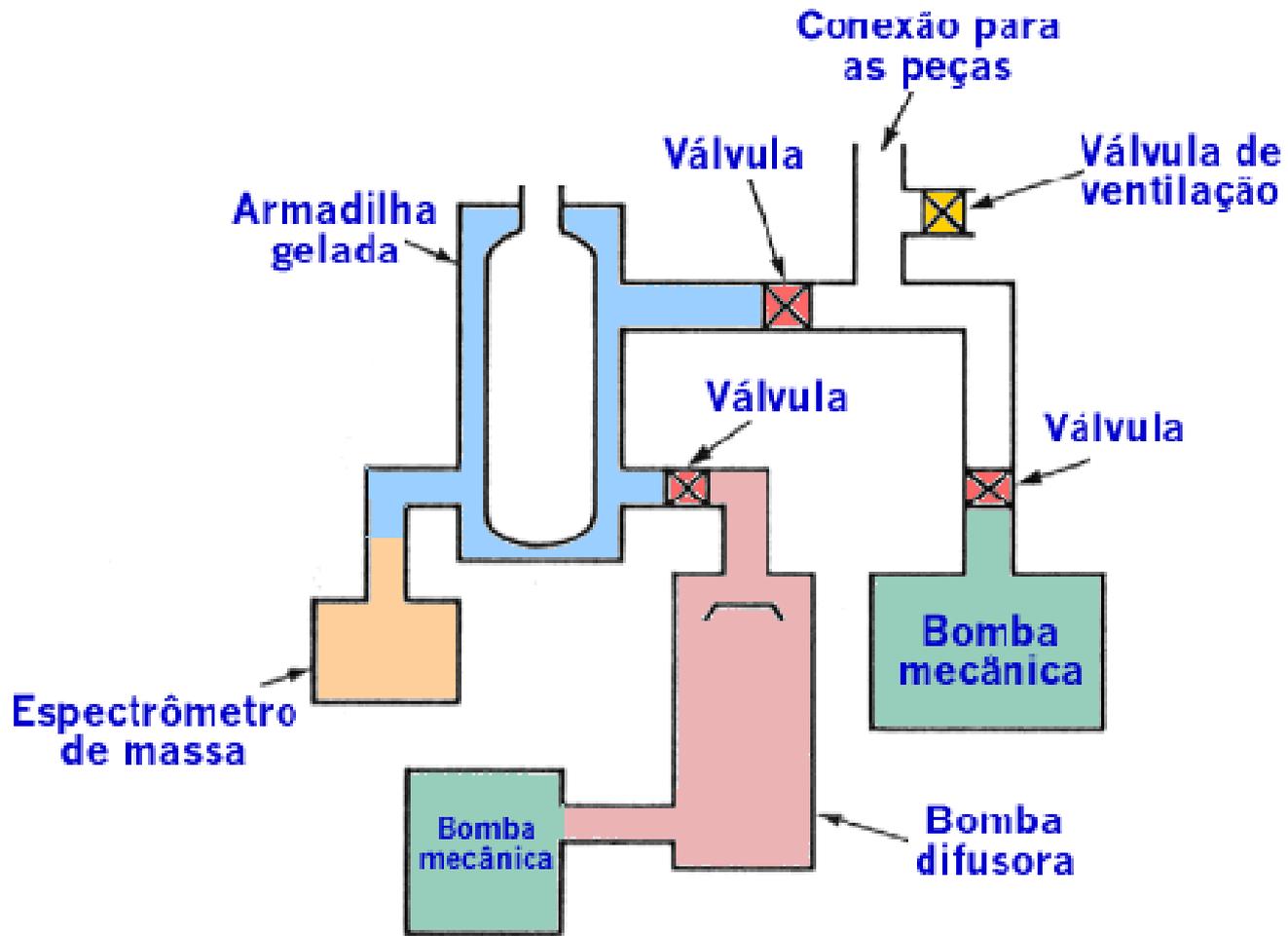
# Sistemas para detecção de vazamentos



## PRINCÍPIO DA SEPARAÇÃO DE ÍONS POR CAMPO MAGNÉTICO



# Detector de Vazamentos



**DETECTOR DE VAZAMENTOS CONVENCIONAL**

Válvulas em teste

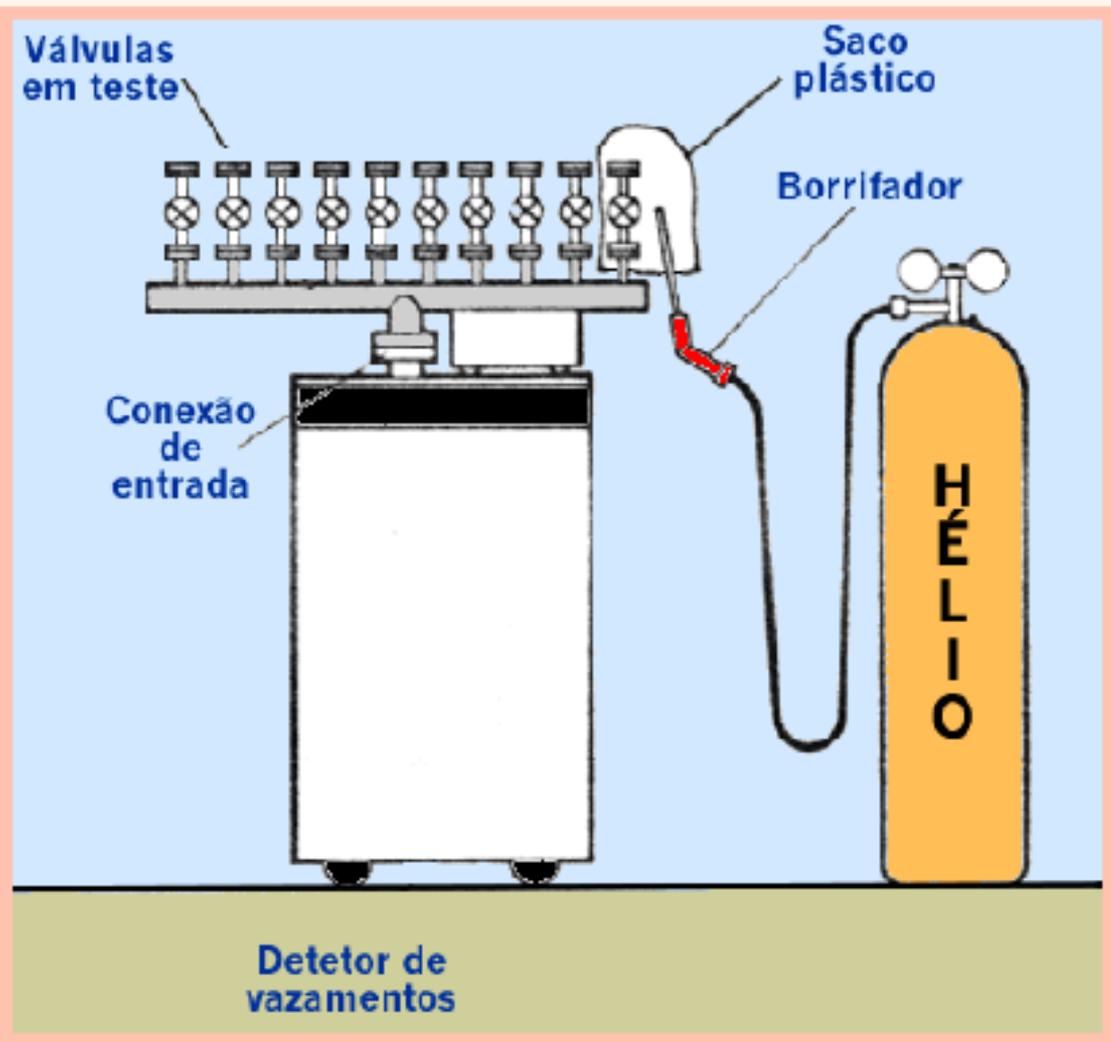
Saco plástico

Borrifador

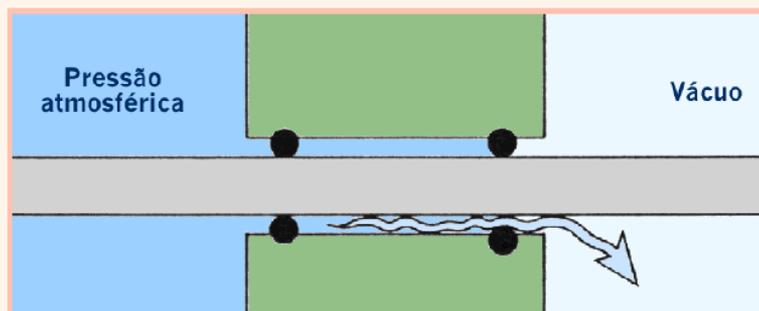
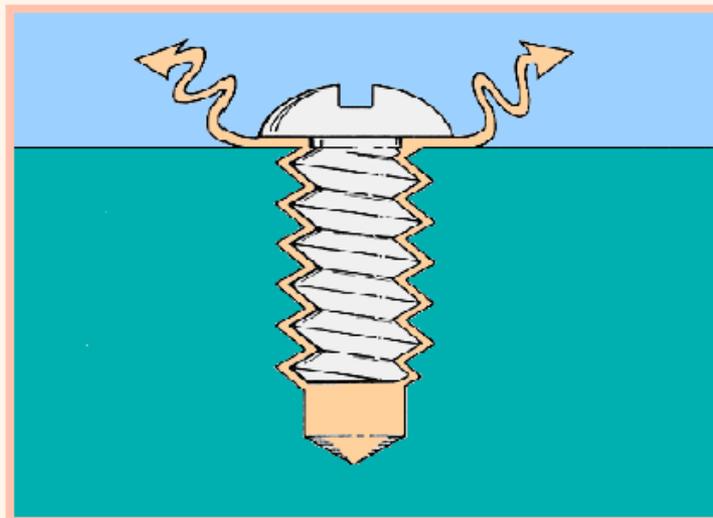
Conexão de entrada



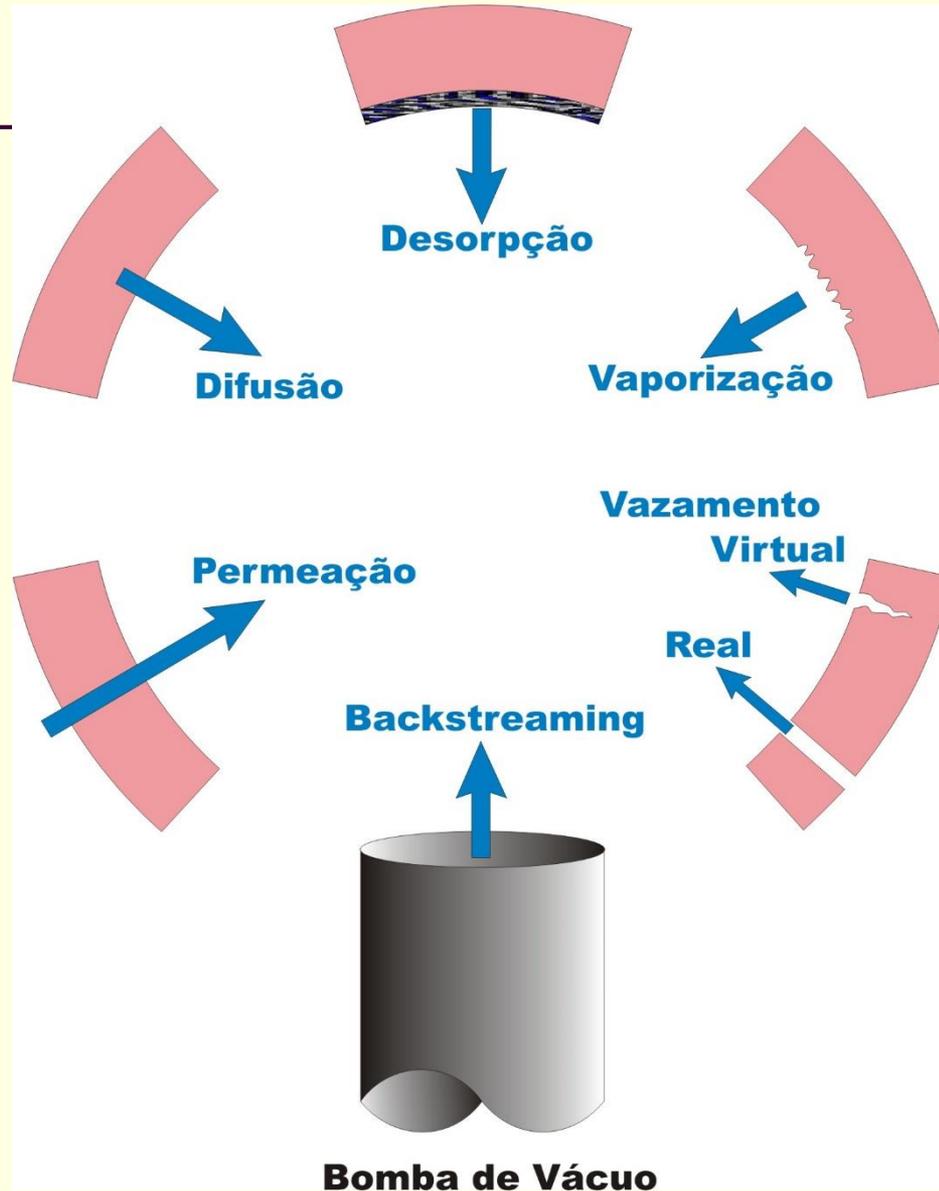
Detetor de vazamentos



# Vazamento Virtual



# Principais fontes de gases e vapores em um sistema de vácuo



# Modelos de Fontes de gases

Fonte de gás	Característica	Comentário
Volume	$P = P_o e^{\frac{-S}{v}t}$	Pressão cai exponencialmente dependendo de S e V
Vazamento Real	$P_{res} = \frac{Q_{Vr}}{S}; Q_{Vr} \approx C_{Vr} P_{atm}$	Fluxo constante. Utilizar detector de vazamentos. Deve ser eliminado
Vazamento Virtual	$Q_{vv} = C_v P_o' e^{\frac{-C_v}{V_c}t}$	$C_v \ll S_b$ Queda da pressão depende de $C_v$ e $V_c$ . Evitar no projeto
Difusão	$Q(t) = c_o \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{\pi t}}$	Q(t) é proporcional a $\frac{1}{\sqrt{t}}$
Permeação	$Q = \frac{K(P_e^n - P_i^n)}{d}$	N=1 para não metais; n=1/2 para moléculas diatômicas em metais. Constante de permeação K(T) é proporcional a $10^3/T$
Evaporação	$W = 0.058 P_v \sqrt{\frac{M}{T}} \frac{g}{cm^2 s}$ $Q = WA \text{ (g/s)}$ $Q = \frac{\Delta N}{\Delta t} kT \frac{\text{Torrl}}{s}$	Crescimento de $P_v$ em função da temperatura é exponencial e por isso mais rápido do que $\frac{1}{\sqrt{T}}$
Desorção Térmica (desgaseificação)	Primeira ordem: $\frac{dc}{dt} = c_o k_1 e^{-\frac{t}{\tau_{res}}}$ $\frac{1}{k_1} = \tau_{res} = \tau_o e^{\frac{E_d}{N_s kT}}$	Rápido $\tau_{res} = 10^{-12} s$
Temperatura (cozimento)	Segunda ordem: $\frac{dc}{dt} = \frac{-k_2 C_o^2}{(1 + C_o K_2 t)^2}$	Cai lentamente A molécula de $H_{2s}$ se dissocia na adsorção e recombina na desorção
Superfícies Reais	$q_n = \frac{q}{t^\alpha}$ $0.7 \leq \alpha \leq 2$	Fórmula geral $q_n = qt^{-1}$ Adsorção química Adsorção física

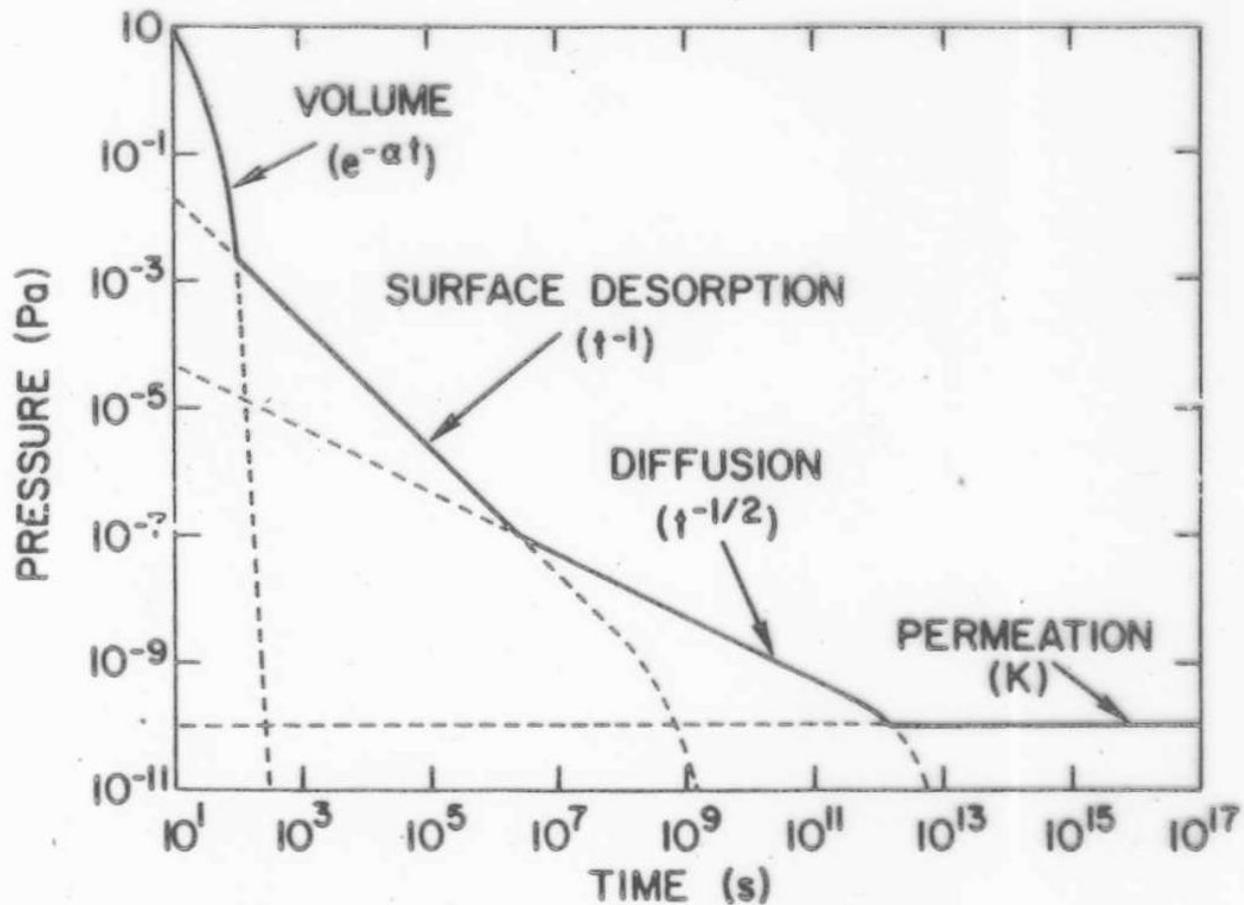


Fig. 4.6 Rate limiting steps during the pumping of a vacuum chamber.

# Bibliografia

---

- A. Roth – Vacuum Technology – North-Holland – 1990
- J.F. O’Hanlon – A User’s Guide to Vacuum Technology, John Wiley & Sons, 2003
- Nagamitsu Yoshimura, *Vacuum technology : practice for scientific instruments*, Springer, 2008
- D.M. Hata, Introduction to Vacuum Technology, Prentice Hall, 2007
- M.H. Hablanian, High-Vacuum Technology, A Practical Guide, CRC Press 1997.
- N.S. Harris – Modern Vacuum Practice – McGraw-Hill, 1989
- S. Dushman & J. M. Lafferty – Scientific Foundations of Vacuum Techniques - John Wiley & Sons – 1966
- A. Guthrie – Vacuum Technology – John Wiley & Sons – 1965
- G. Lewin – Fundamentals of Vacuum Science and Tecnology – McGraw-Hill, 1965

# AVALIAÇÃO

---

**Teoria:** Serão realizadas duas Provas Gerais (P) e mais uma Substitutiva. A prova substitutiva é uma prova optativa, única, versando sobre toda a matéria do semestre. Sua nota pode substituir a  $P_1$  ou  $P_2$ . Não haverá prova individual, em separado, por qualquer motivo.

**Laboratório:** Serão cobrados 3 relatórios referentes às 8 atividades experimentais.

Não se aceitam relatórios fora do prazo de entrega estipulado.

# REGIME DE APROVAÇÃO

Será aprovado o aluno que obtiver uma Média Final (MF) maior ou igual a 5 (cinco), calculada da seguinte forma:

$$M_p = (P_1 + P_2) / 2$$

média das provas.

$$M_R = (2R_1 + 2R_2 + R_3) / 5$$

média dos relatórios.

R1 = Relatório I (peso 2,0);

R2 = Relatório II (peso 3,0);

R3 = Relatório III (peso 1,0)

É obrigatória a entrega dos 3 relatórios dentro dos prazos estabelecidos.

Cálculo da média final:  $M_f = (M_p + M_R) / 2$ , onde  $M_p$  é a média das provas e  $M_R$  a média dos relatórios.

Se  $M_f \geq 5,0$  o estudante está **APROVADO**



Se  $3 \leq M_p < 5$  ou  $3 \leq M_R < 5$  a média final será a menor das duas notas e o estudante deverá fazer a segunda avaliação, que consiste em uma entrevista (se  $3 \leq M_R < 5$ ) ou uma prova escrita (se  $3 \leq M_p < 5$ ). Neste caso a nota da segunda avaliação será dada por:  $N_f = ((M_f + 2R) / 3)$

Se  $M_p < 3$  ou  $M_R < 3$  o estudante estará **reprovado**.



# Calendário

## **CALENDÁRIO DE PROVAS E FERIADOS**

26 a 30/03 Semana Santa – não haverá aulas

01/05 – Dia do Trabalho – não haverá aulas

01/06 – Recesso escolar – não haverá aulas

## **Data das Provas**

04/05 - 1ª Prova,  $P_1$ , sexta-feira

12/06 – 2ª Prova,  $P_2$ , terça-feira

22/06 – Prova substitutiva,  $P_s$  sexta-feira

## **Local das Provas: Sala 210 Ala Central**

## **Data de Entrega dos Relatórios até às 12h00min**

Relatório 1 - 10/04

Relatório 2 - 15/05

Relatório 3 - 05/06

## Seminários

---

13/03 – Medidores de pressão

10/04 – Bombas de vácuo I

24/04 – Bombas de vácuo II

08/05 – Materiais e componentes.

Local: Sala 210 – Ala Central

Horário 19:00 às 20:50

Palestrante: Prof. Luiz Marcos Fagundes

# Cronograma do Laboratório

DATA	ATIVIDADE
09/03/18	Aula Introdutória
12/03/18	1º Ciclo de Experimentos – aula 1/3
19/03/18	1º Ciclo de Experimentos – aula 2/3
02/04/18	1º Ciclo de Experimentos – aula 3/3
10/04/18	ENTREGA DO RELATÓRIO 1
16/04/18	2º Ciclo de Experimentos – aula 1/3
23/04/18	2º Ciclo de Experimentos – aula 2/3
07/05/18	2º Ciclo de Experimentos – aula 3/3
15/05/18	ENTREGA DO RELATÓRIO 2
21/05/18	Aula de Componentes, Materiais e Vazamentos – Pelletron
28/05/18	Laboratório de Filmes Finos do Acelerador Pelletron
05/06/18	ENTREGA DO RELATÓRIO 3

# Cronograma 2018

<p><b>1 26/02- 02/03</b> (aulas 1-2)</p> <p>Aula 1 Introdução Teoria Importância da Tecnologia do Vácuo</p> <p>Aula 2 histórico da tecnologia do vácuo Conceitos e definições básicas (Q,S,C) <b>Lista 1</b></p>	<p><b>2 05 a 09/03</b> (aulas 3-4)</p> <p>Aula 3 Teoria Cinética dos gases</p> <p>Aula 4 Aula Introdutória Laboratório sala 111 – Ala 2</p>	<p><b>3 12/03 a 16/03</b> (aulas 5-6)</p> <p>12/03 Laboratório 1</p> <p>Aula 5 <b>Seminário Medidores</b></p> <p>Aula 6 Viscosidade, regimes de escoamento, número de Reynolds e exercícios</p>	<p><b>4 19 a 23/03</b> (aulas 7-8)</p> <p>19/03 Laboratório 2</p> <p>Aula 7 Cálculo de condutâncias: orifício, diafragma e dutos no regime molecular.</p> <p>Aula 8 Cálculo de condutâncias de dutos e armadilhas. <b>Lista 2</b></p>
<p><b>5 26 a 30/03</b></p> <p style="text-align: center;"><b>Semana Santa</b></p> <p style="text-align: center;"><b>não haverá aula</b></p>	<p><b>6 02 a 06/04</b> (aulas 9 e 10)</p> <p>Laboratório 3</p> <p>Aula 9: Condutância de uma abertura (viscoso), duto cilíndrico, condutância dependendo do gás.</p> <p>Aula 10 – Cálculo de sistemas de vácuo. P(t) bombeamento regimes viscoso e molecular. Fator de serviço.</p>	<p><b>7 09 a 13/04</b> (aulas 11 e 12)</p> <p>Aula 11 – Seminário Bombas I</p> <p>Aula 12: perfil da pressão ao longo do tubo. Vazamento real e virtual. Exercício P(t). <b>Lista 3</b></p>	<p><b>8 16 a 20/4</b> (aulas 13 - 14)</p> <p>16/04 Laboratório 4</p> <p>Aula 13: Detecção de vazamentos, método da pipeta (S e C)</p> <p style="background-color: cyan;"><b>Aula 14 - Revisão do Laboratório</b></p>
<p><b>9 23 a 27/04</b> (aulas 15 - 16)</p> <p>23/04 Laboratório 5</p> <p>Aula 15: <b>Seminário Bombas II</b></p> <p>Aula 16: - Revisão dos conceitos. Método da pipeta e outros métodos para medida de S e C.</p>	<p><b>10 30/04 a 04/05</b> (aula 17)</p> <p>01/05 Feriado – Não haverá aula</p> <p>Aula 17: <b>Prova P1 04/05</b></p>	<p><b>11 07 a 11/05</b> (aula 18 - 19)</p> <p>07/05 Laboratório 6</p> <p>Aula 18: <b>Seminário: Materiais e Componentes</b></p> <p>Aula 19: <b>Correção da prova</b></p>	<p><b>12 14 a 18/05</b> (aulas 20 - 21)</p> <p>Aula 20: cálculo de condutância. Cálculo de armadilhas. Estimativas de pressões <b>Lista 4</b></p> <p>Aula 21: Fontes de gases. Permeação de gases</p>
<p><b>13 21 a 25/05</b> (aula 22 – 23)</p> <p>21/05 Laboratório 7</p> <p>Aula 22: revisão: permeação, difusão de gases</p> <p>Aula 23: Revisão: permeação, difusão de gases (parede semi-infinita, parede finita) evaporação/vaporização. Exemplos: gota de óleo e gota de água.</p>	<p><b>14 28/05 a 01/06</b> (aula 24)</p> <p>28/05 Laboratório 8</p> <p>Aula 24 – Desorção térmica. Primeira e segunda ordem. Superfícies reais</p> <p>01/06 – Não haverá aula</p>	<p><b>15 04 a 08/06</b> (aulas 25 - 26)</p> <p>Aula 25 Cálculo de sistemas de vácuo Aplicações: exemplo I</p> <p>Aula 26 – Cálculo de sistemas de vácuo Aplicações: exemplo II</p>	<p><b>16 11/06 a 15/06</b> (aula 27)</p> <p>Aula 27 - <b>Prova P2</b></p> <p>15/06 <b>Visita ao INPE</b></p>
<p><b>17 18 a 22/06</b> (aula 28)</p> <p style="background-color: cyan;"><b>19/06 – Pelletour</b></p> <p><b>Aula 28 - Prova substitutiva 22/06</b></p>	<p><b>18 25 a 29/06</b></p> <p>26/06 – Entrevistas</p> <p>29/06 - Entrevistas</p>	<p><b>19</b></p>	<p><b>20</b></p>

# Visita ao INPE 2005



# 2007



# 2009



# Visita ao INPE em 2016





**Nilberto H. Medina**  
**Universidade de São Paulo**  
**Instituto de Física**

