



INTRODUÇÃO AO LABORATÓRIO

4300323 – CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO VÁCUO

1º semestre de 2020

Nilberto Heder Medina

medina@if.usp.br

Vitor Angelo Paulino de Aguiar

vitor_ap_aguiar@hotmail.com

Saulo Gabriel Alberton

alberton@if.usp.br

SUMÁRIO

- Resumo histórico
- Medidores de Vácuo
- Bombas de Vácuo
- Informações da disciplina
 - Professores e contato
 - Seminários
 - Cronograma
- Atividades
 - Ciclo 1
 - Experimentos
 - Ciclo 2
 - Ciclo 3

RESUMO HISTÓRICO

RESUMO HISTÓRICO

❑ O QUE É VÁCUO?

Dicionário:

vá.cu.o

“Que não está ocupado por coisa alguma; que nada contém; oco, vazio”

FÍS “Espaço vazio, não ocupado por qualquer matéria; vacuidade, vazio”

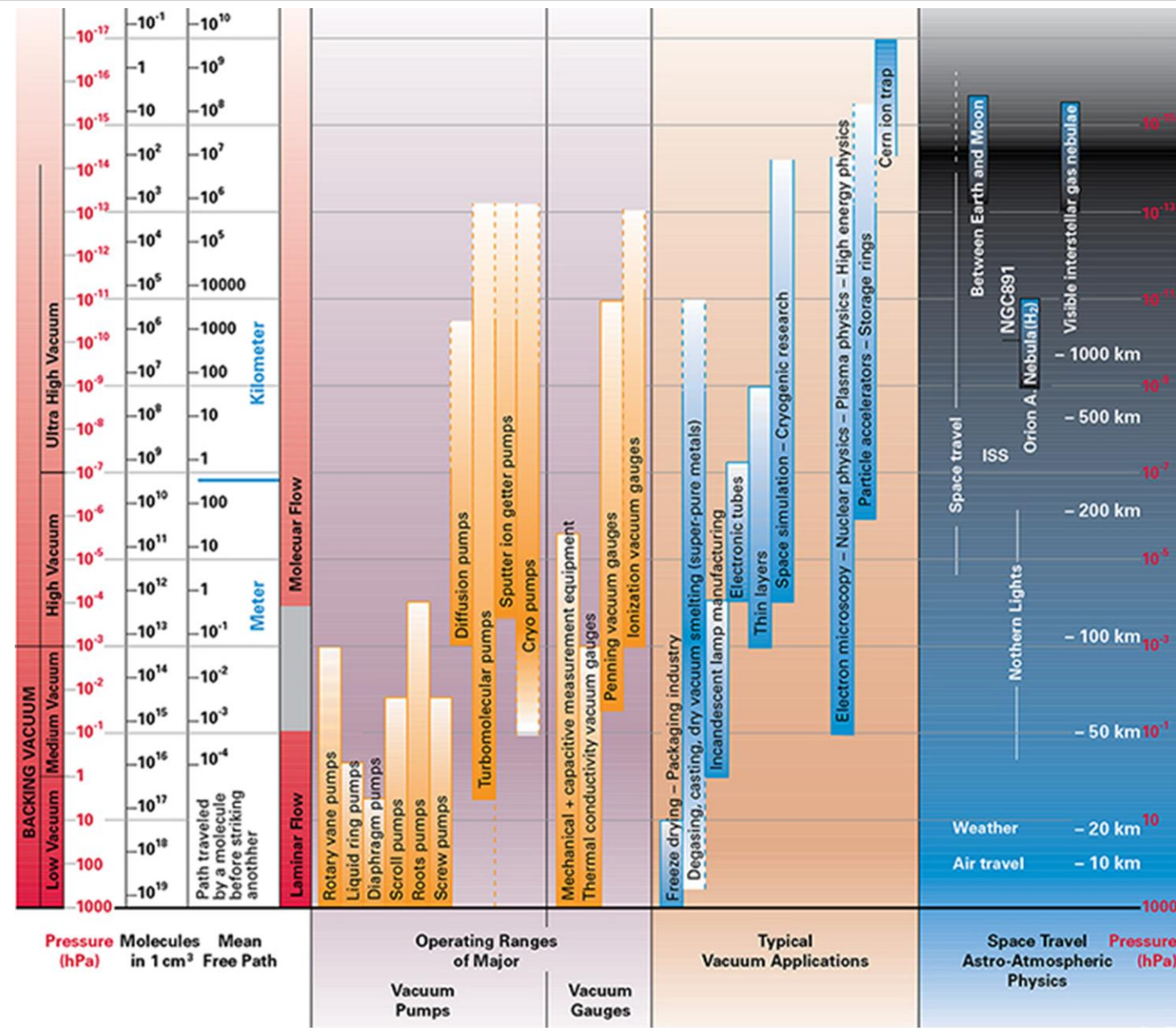
Intuitivamente:

“Um espaço que que contém absolutamente nada, desprovido de matéria”

Inclusive, vocês já têm “manipulado” o vácuo em diversas disciplinas da física clássica...

1) É possível criar um espaço de ausência total de matéria?

Na prática, não é possível atingir o “vácuo perfeito” (mesmo nos melhores sistemas de vácuo)



Mesmo nas melhores condições experimentais atuais, uma câmara pode conter centenas de milhares de moléculas de gás por centímetro cúbico

Hectopascal:
 1 hPa ~ 0,75 Torr

RESUMO HISTÓRICO

❑ O QUE É VÁCUO?

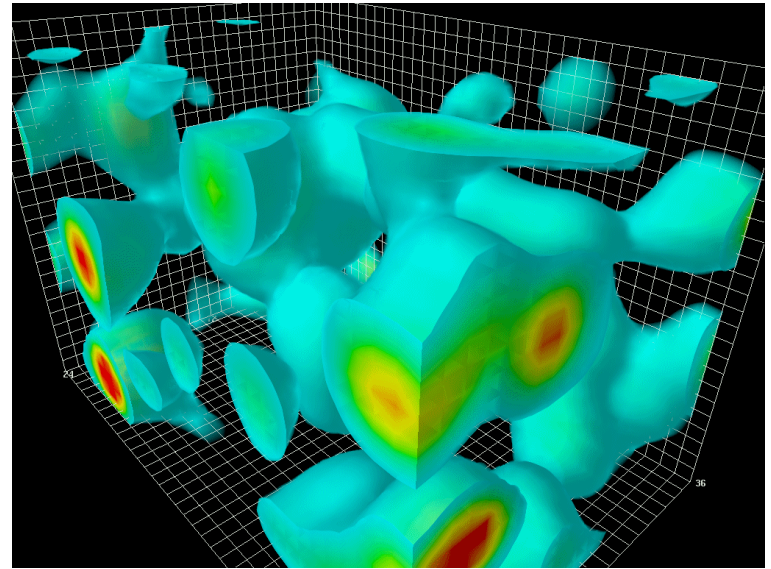
2) Existe o vazio absoluto?

Aparentemente, não...

“O vácuo absoluto realmente custa uma enorme quantidade de energia para criá-lo.

Mesmo que você fosse capaz de criá-lo, você descobriria que ele é realmente instável e que qualquer tipo de perturbação levaria esse vácuo absoluto para o estado em que ele é cheio de flutuações quânticas de campo.”

Prof. Derek Leinweber



Simulação computacional de flutuações quânticas de campo do vácuo.

Dimensões características: $2,4 \text{ fm} \times 3,5 \text{ fm}$

Leinweber, Derek B. "Visualizations of the QCD Vacuum." *arXiv preprint hep-lat/0004025* (2000).

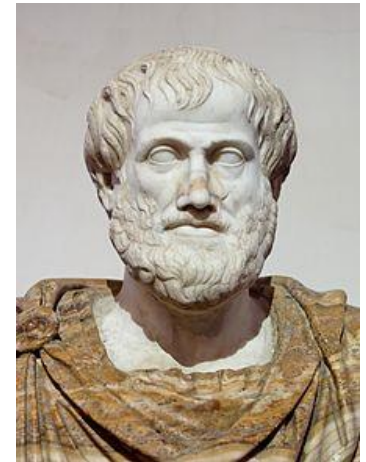
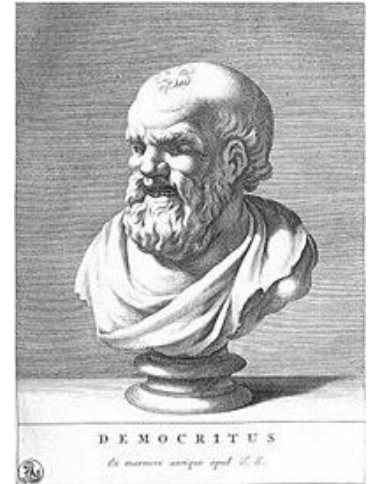
RESUMO HISTÓRICO

☐ CRONOLOGIA

- **Demócrito** (~460 – 375 a.C.) propôs que objetos eram formados por partículas indivisíveis (átomos) permeadas pelo espaço vazio (vácuo)
- **Aristóteles** (~384 – 322 a.C.) negava a idéia de vácuo. Aperfeiçoou a teoria dos quatro elementos de Empédocles (água, fogo, terra e ar), incluindo as propriedades de movimento (cima, baixo, circular) e qualidades (quente, seco, húmido, frio).

“A Natureza abomina o espaço vazio”

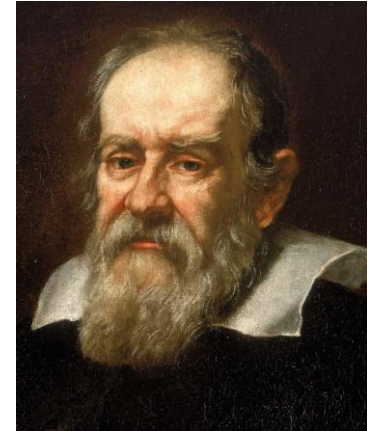
O pensamento aristotélico dominou a comunidade científica até o século XVI.



RESUMO HISTÓRICO

☐ CRONOLOGIA

- **Galileu Galilei** (1564 – 1642) propôs e provou que o ar possuía peso e densidade. O ar passou a ser considerado uma substância.



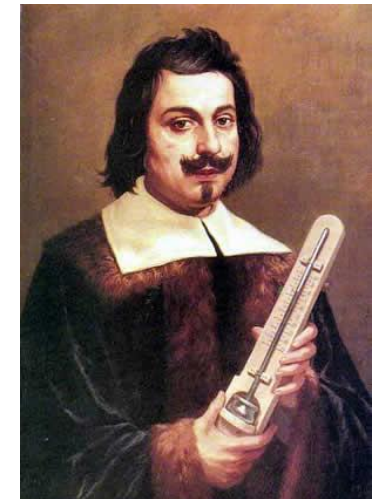
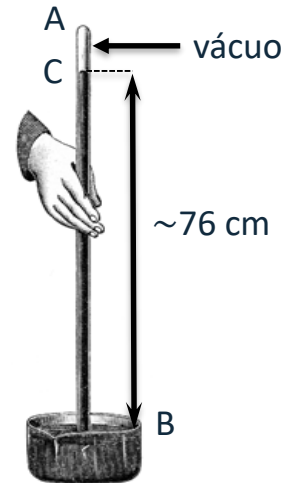
- **Evangelista Torricelli** (1608 – 1647) inventou o barômetro de mercúrio (Hg) em 1643.

Ao nível do mar, em relação à superfície de Hg, a altura da coluna dentro do tubo mede ~760 mm

$$760 \text{ mmHg} \sim 1 \text{ atm}$$

$$1 \text{ mmHg} \sim 1 \text{ Torr}$$

$$1 \text{ mmHg} = 1,000000142 \text{ Torr}$$



RESUMO HISTÓRICO

☐ CRONOLOGIA

- **Blaise Pascal** (1623 – 1662) repetiu o experimento de Torricelli com outras substâncias líquidas.

$$h_{max} \propto \frac{1}{\rho}$$

- **Christiaan Huygens** (1629 – 1695) provou que, em vácuo, a velocidade de queda livre de uma pena é igual à de uma peça de chumbo.
- **Robert Boyle** (1627 – 1691) verificou experimentalmente que, em gases,

$$PV = k \equiv cte$$

Realizou medidas experimentais em baixa pressão (~6 Torr)

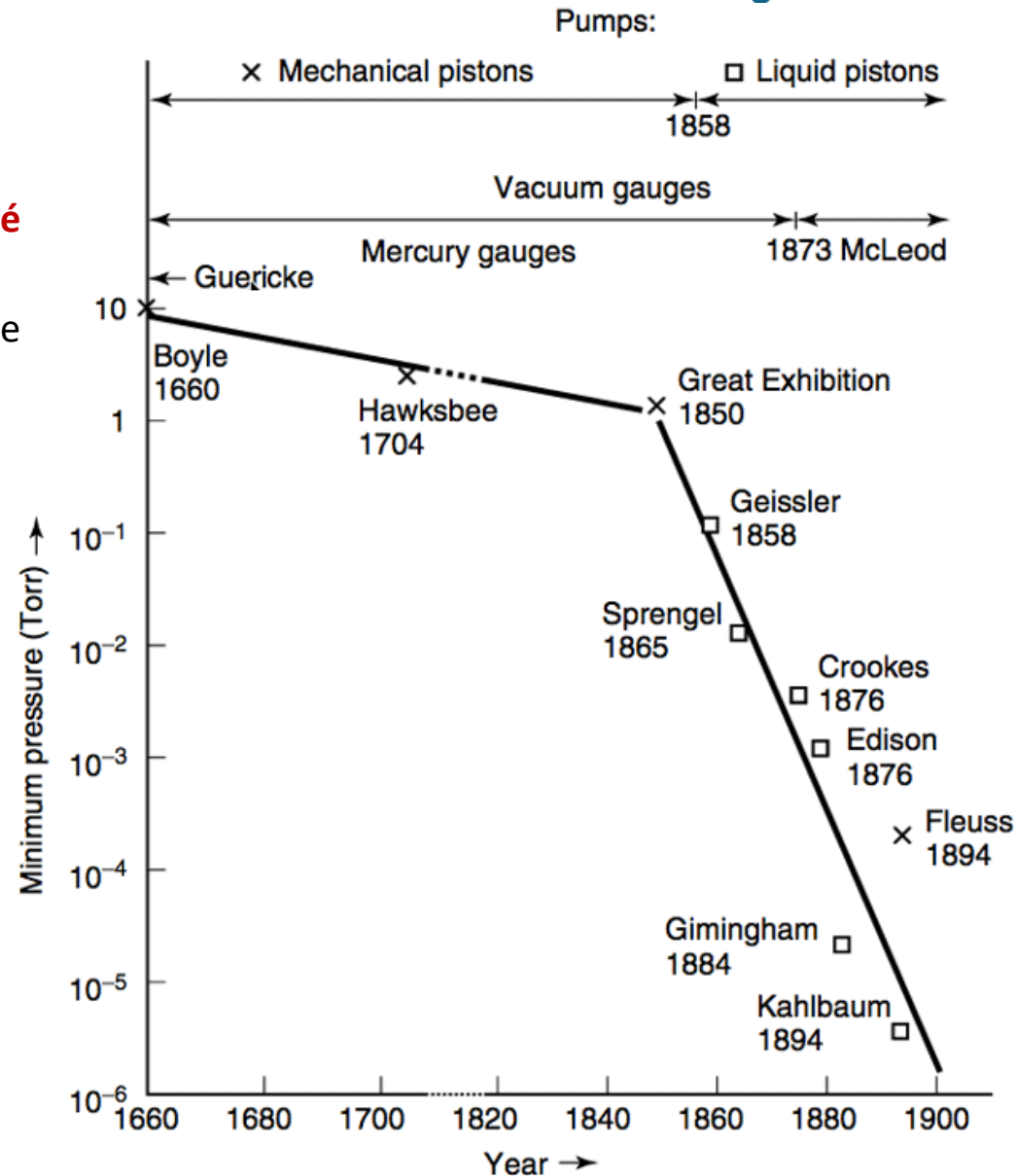
Até 1874, o tubo de Torricelli foi o único instrumento disponível para medidas de vácuo, limitado a 0,5 Torr.



RESUMO HISTÓRICO

□ CRONOLOGIA

- **Evolução da tecnologia do vácuo até 1900**
- Evolução da tecnologia do vácuo de 1900-2000

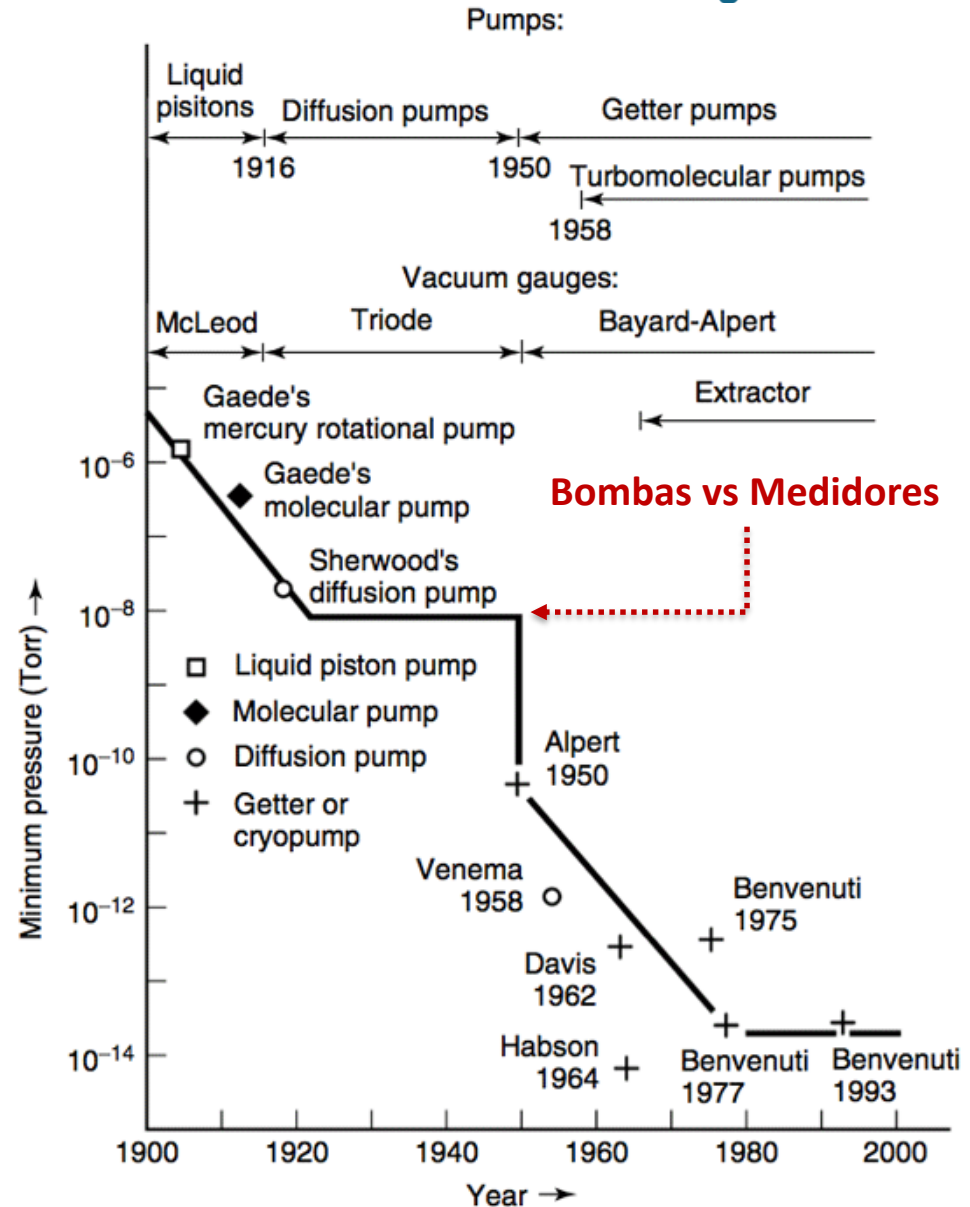


RESUMO HISTÓRICO

☐ CRONOLOGIA

- Evolução da tecnologia do vácuo até 1900
- **Evolução da tecnologia do vácuo de 1900-2000**
 - **Era dos grandes aceleradores**

O medidor Bayard-Alpert é muito utilizado no intervalo de alto vácuo a ultra-alto vácuo (10^{-4} – 10^{-11} Torr)

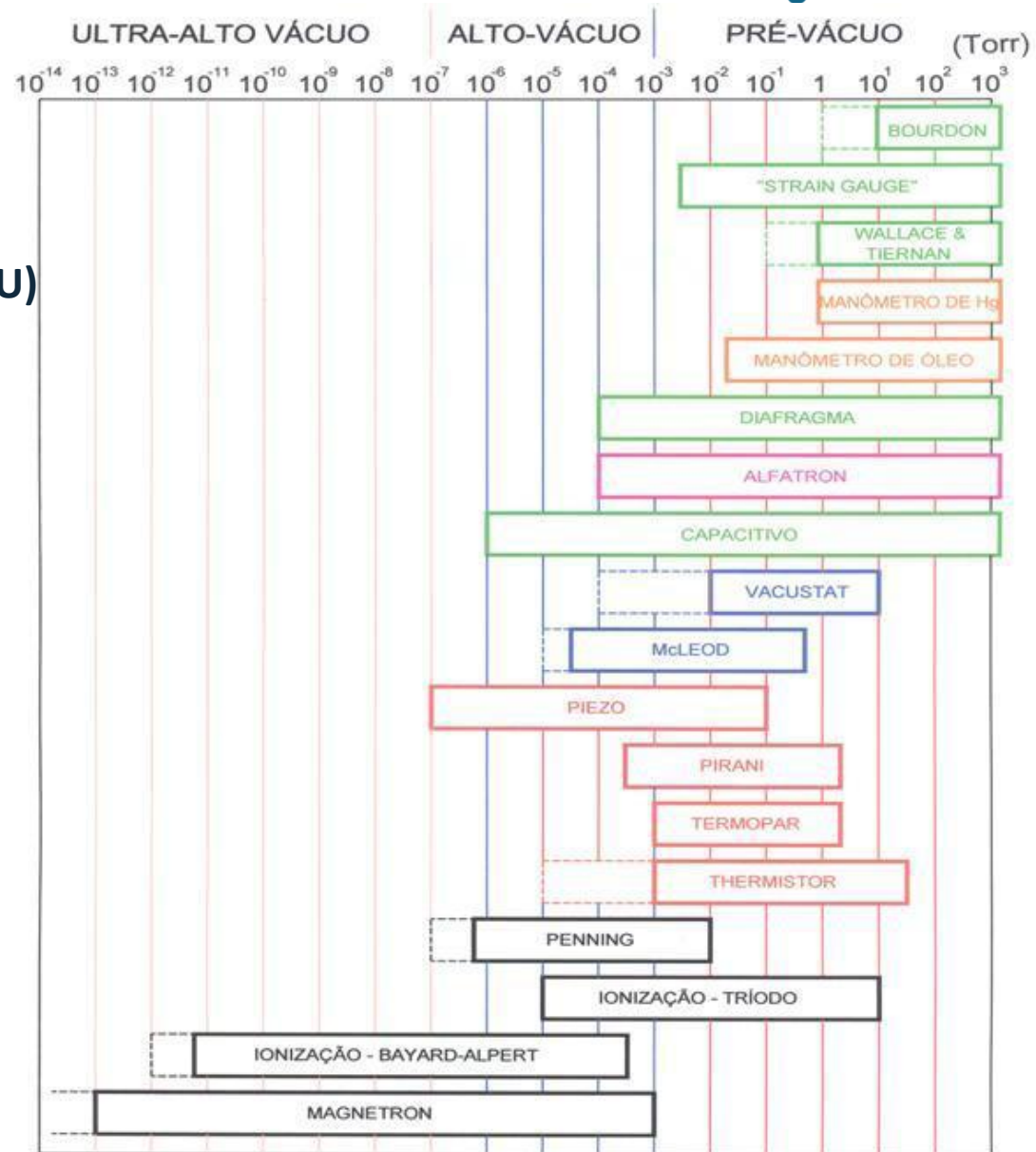


MEDIDORES DE VÁCUO

MEDIDORES DE VÁCUO

☐ VACUÔMETROS

- Kammerer (Mc Leod + Tubo em U)
- Vacustat
- Wallace & Tiernan
- Strain Gauge
- Pirani
- Termopar
- Thermistor
- Penning
- Bayard-Alpert

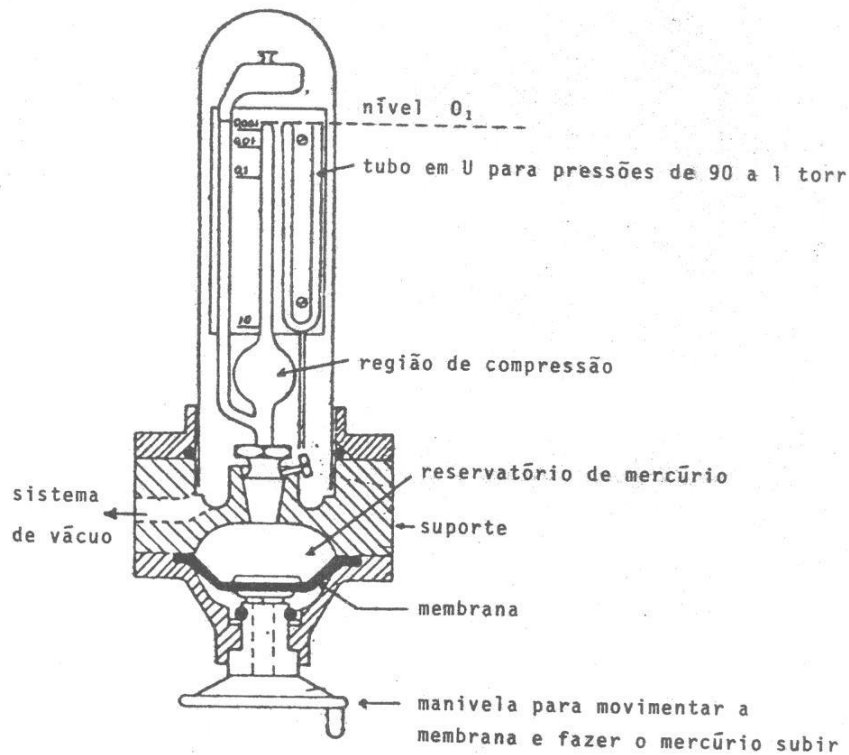


MEDIDORES DE VÁCUO

☐ KAMMERER

Tubo em U + McLeod

- **Tubo em U: 90 a 1 Torr**
- **McLeod: 1 a 10^{-2} Torr**



MEDIDORES DE VÁCUO

❑ KAMMERER

Tubo em U + McLeod

- **Tubo em U: 90 a 1 Torr**

O Tubo em U é o medidor direto mais simples

- Mercúrio ou óleo de bombas difusoras são líquidos geralmente utilizados

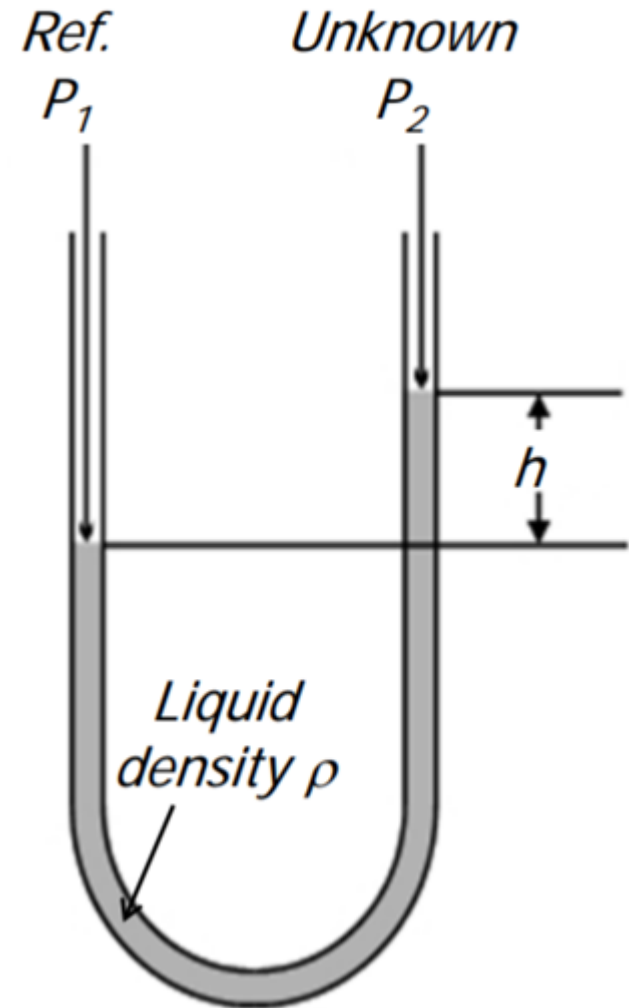
$$P_{\text{vapor}}(\text{Hg}) = 0,16 \text{ Pa} \approx 1,2 \times 10^{-3} \text{ Torr}$$

$$P_{\text{vapor}}(\text{Óleo}_{\text{diff}}) = 10^{-6} \text{ Pa} \approx 7,5 \times 10^{-9} \text{ Torr}$$

- A principal fonte de erro está na medida de h

$$P_1 - P_2 = h\rho g$$

Curiosidade: Métodos elaborados para medir h utilizam interferômetros ópticos ou ultra-sônicos, permitindo acurácia de 1,4 mPa ($\sim 1 \times 10^{-5}$ Torr) no intervalo de 1 Pa ($\sim 7,5 \times 10^{-3}$ Torr) a 100 kPa (~ 750 Torr) no *National Institute of Standards and Technology* (NIST).



MEDIDORES DE VÁCUO

☐ KAMMERER

Tubo em U + McLeod

- **McLeod: 1 a 10^{-2} Torr**

O McLeod estende o intervalo do manômetro Tubo em U através da Lei de Boyle

Antes e após o corte: $PV = P_f V_f = (P + h\rho g) \times Ah$

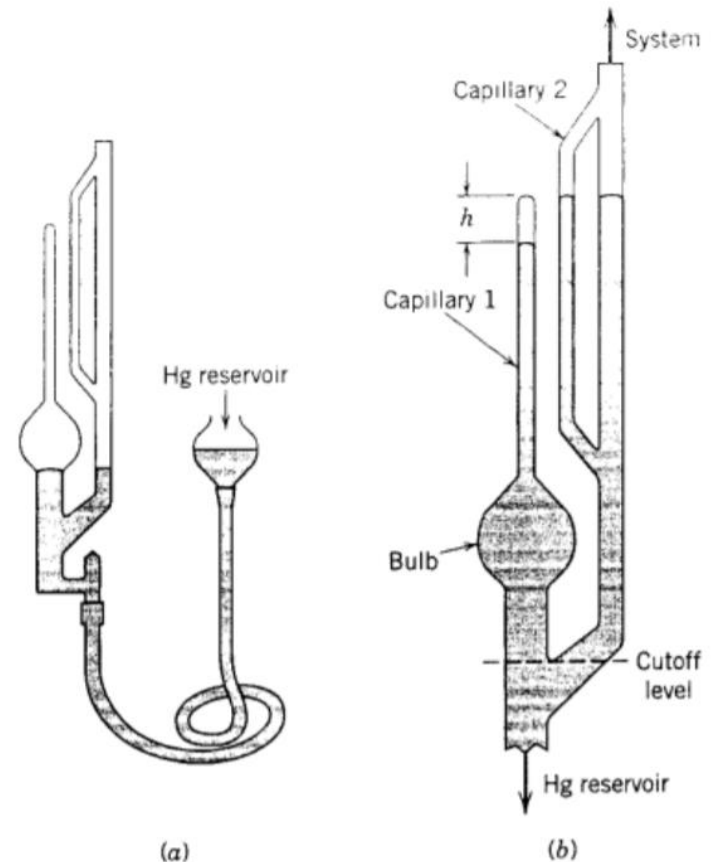
“Modo quadrático”

$$P = \frac{A\rho gh^2}{V - Ah} \approx \frac{A\rho gh^2}{V}$$

Observação: o uso do McLeod assume que os gases obedecem à Lei de Boyle. Gases condensáveis e vapores não obedecem à Lei de Boyle.

Curiosidade: ao manter fixa a distância d entre a superfície de Hg no capilar (1) e sua extremidade fechada, enquanto a altura do capilar (2) é permitida variar, o McLeod opera no “modo linear”

$$P = \frac{Ad\rho gh}{V - Ah} \approx \frac{Ad\rho gh}{V}$$



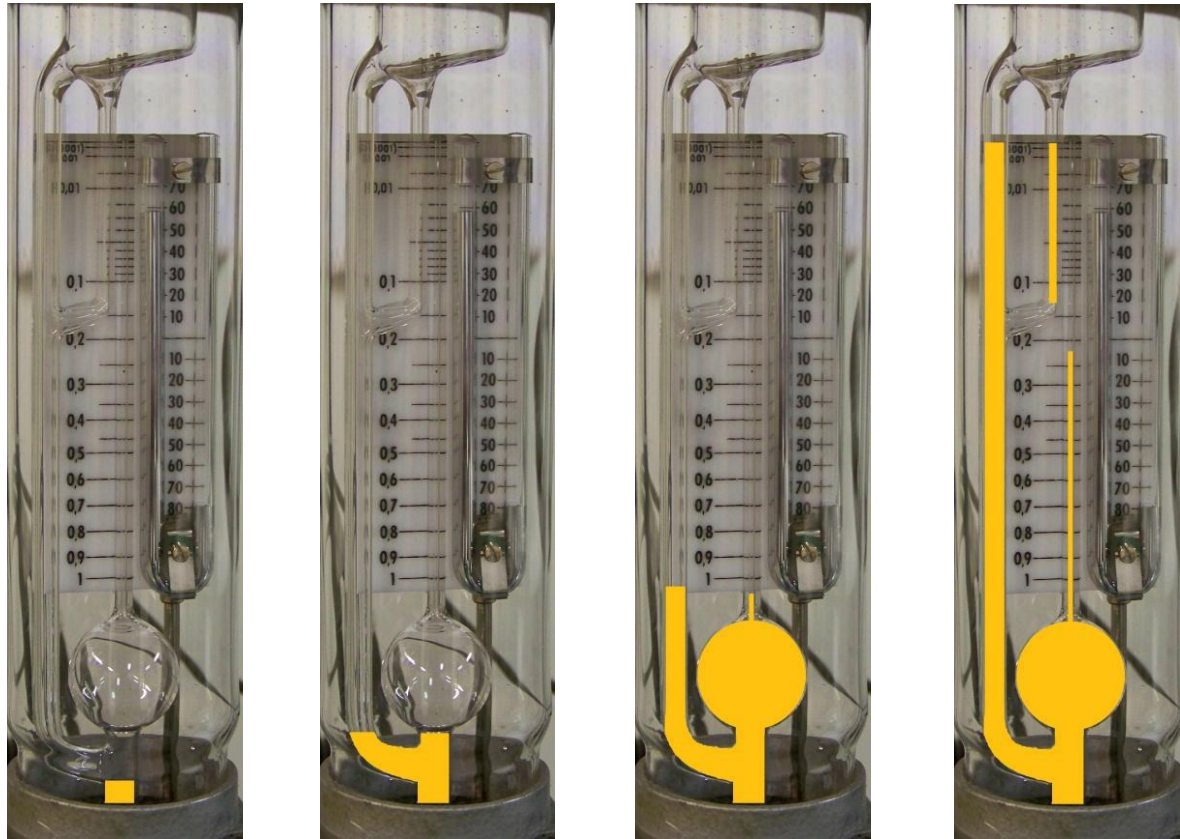
$V \equiv$ volume conhecido acima do corte
 $A \equiv$ área transversal dos capilares 1 e 2

MEDIDORES DE VÁCUO

☐ KAMMERER

Tubo em U + McLeod

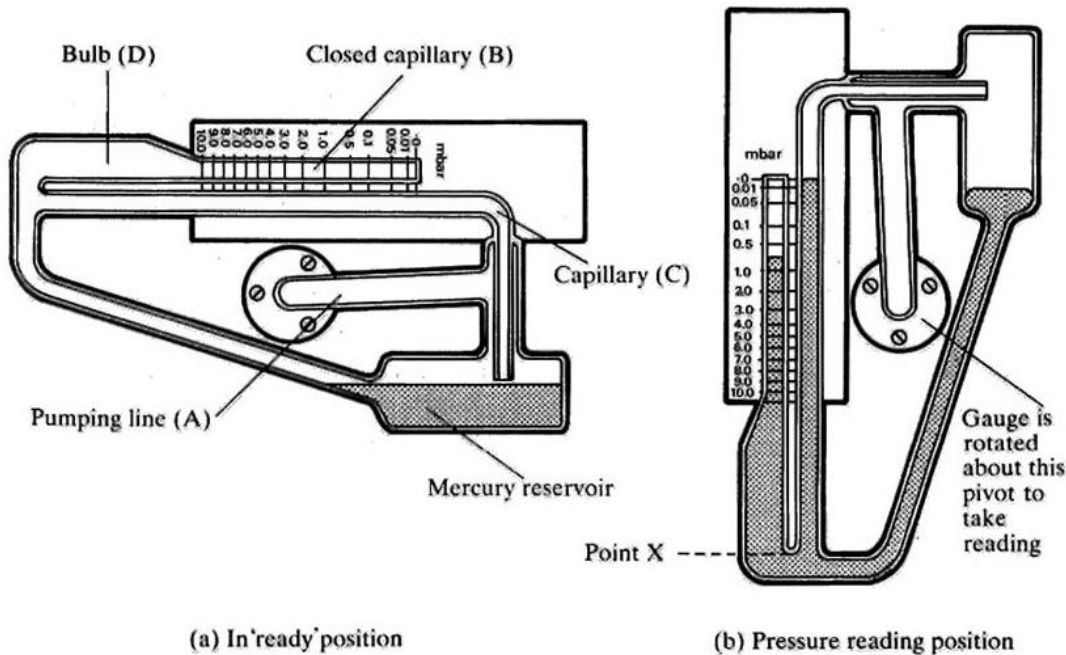
- **McLeod: 1 a 10^{-2} Torr**



MEDIDORES DE VÁCUO

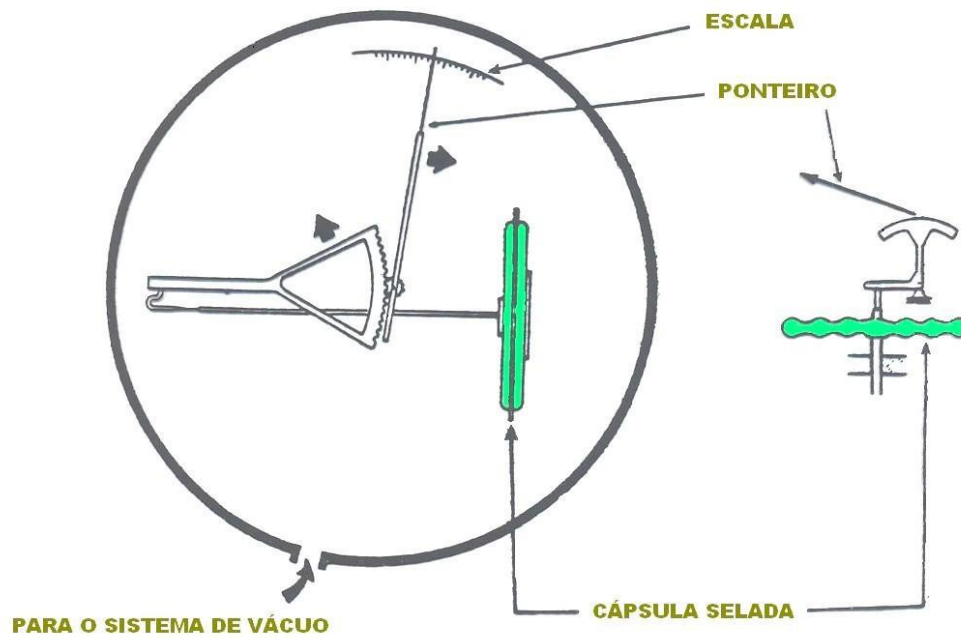
❑ VACUSTAT

Modo de leitura semelhante ao McLeod, porém mais robusto e resistente



MEDIDORES DE VÁCUO

❑ WALLACE & TIERNAN

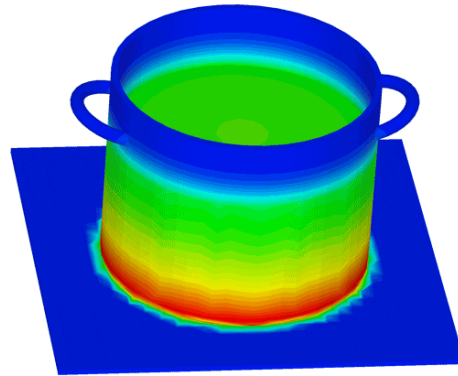


MEDIDORES DE VÁCUO

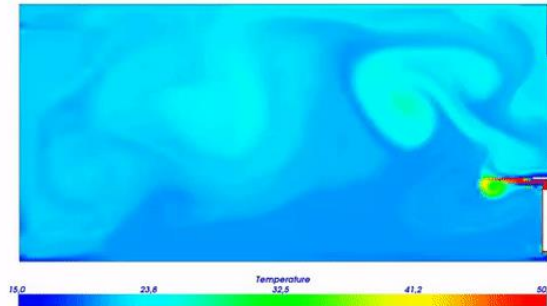
☐ MEDIDORES DE TERMO-CONDUTIVIDADE

Transferência de Energia Térmica

- Condução

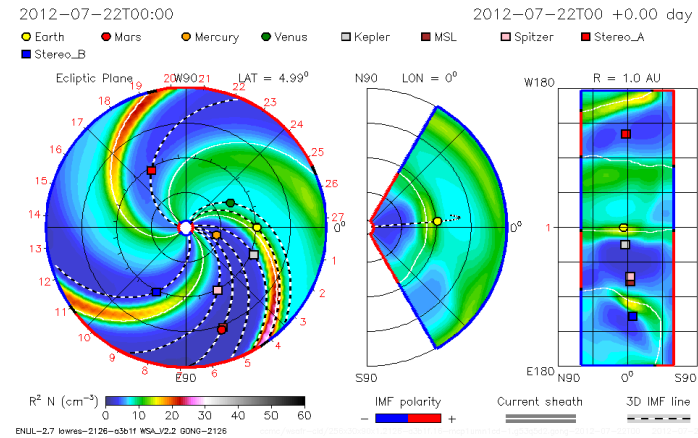
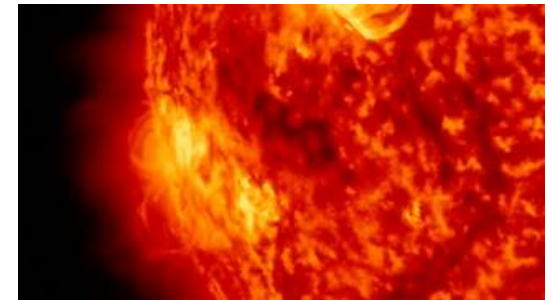


- Convecção



- Radiação

*relevante apenas em pressões $< 10^{-5}$ torr



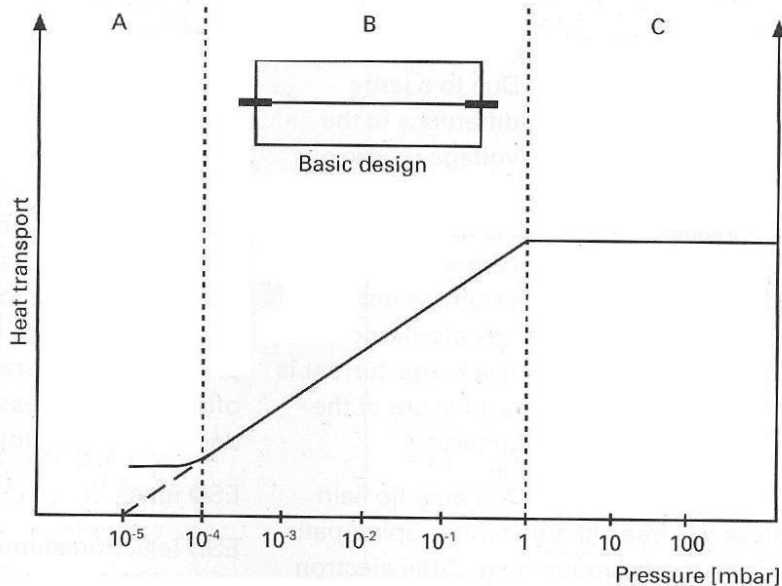
MEDIDORES DE VÁCUO

❑ MEDIDORES DE TERMO-CONDUTIVIDADE

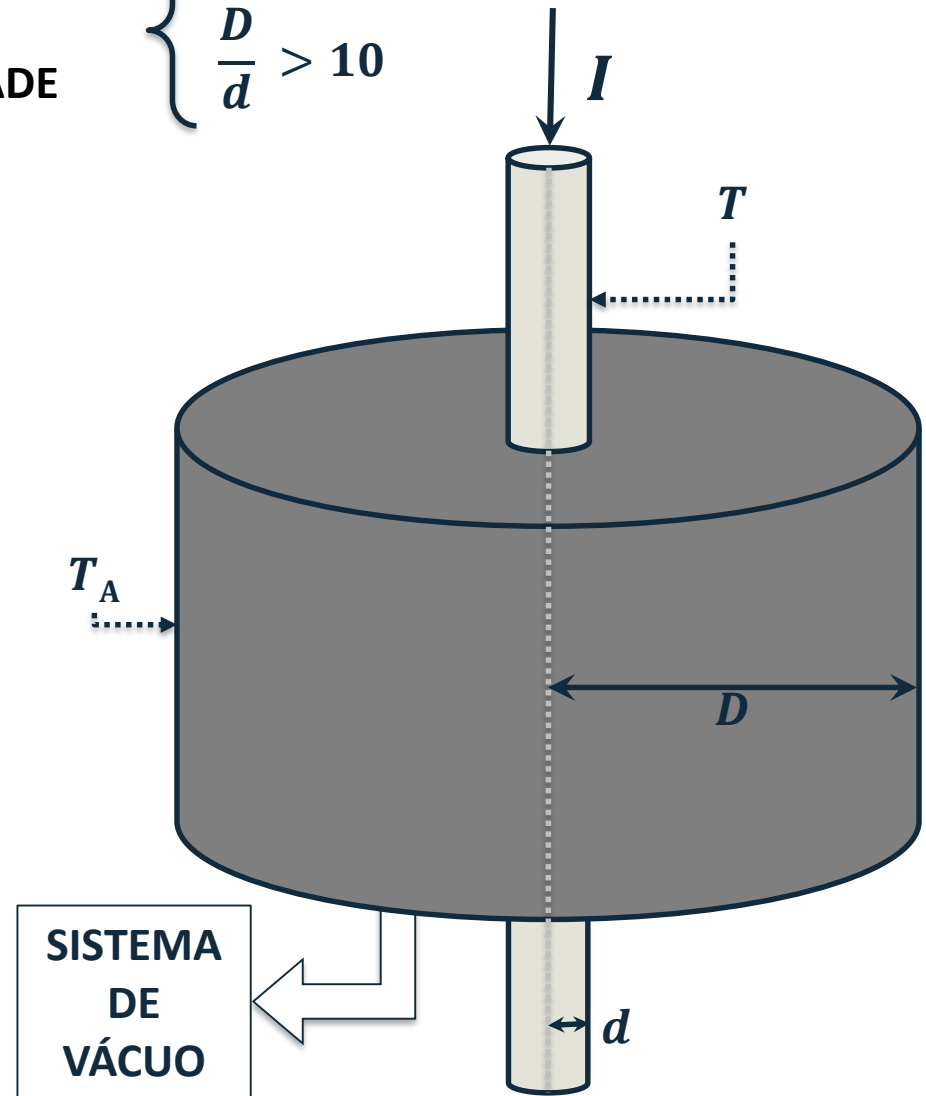
Princípio de Funcionamento

O fio é aquecido por efeito Joule através de uma corrente elétrica.

Em certo intervalo de pressão, a transferência de calor do fio às paredes da câmara diminui com a redução da pressão.



$$\left\{ \begin{array}{l} T > T_A \\ \frac{D}{d} > 10 \end{array} \right.$$



MEDIDORES DE VÁCUO

❑ MEDIDORES DE TERMO-CONDUTIVIDADE

$$\left\{ \begin{array}{l} T > T_A \\ \frac{D}{d} > 10 \end{array} \right.$$

Princípio de Funcionamento

Energia térmica transferida do fio ao gás:

$$E_{\text{gas}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{2k}{\pi m_{\text{molecular}} T_A}} (T - T_A) P$$

$\alpha \equiv$ coeficiente de acomodação do gás

$$\gamma = c_p / c_v$$

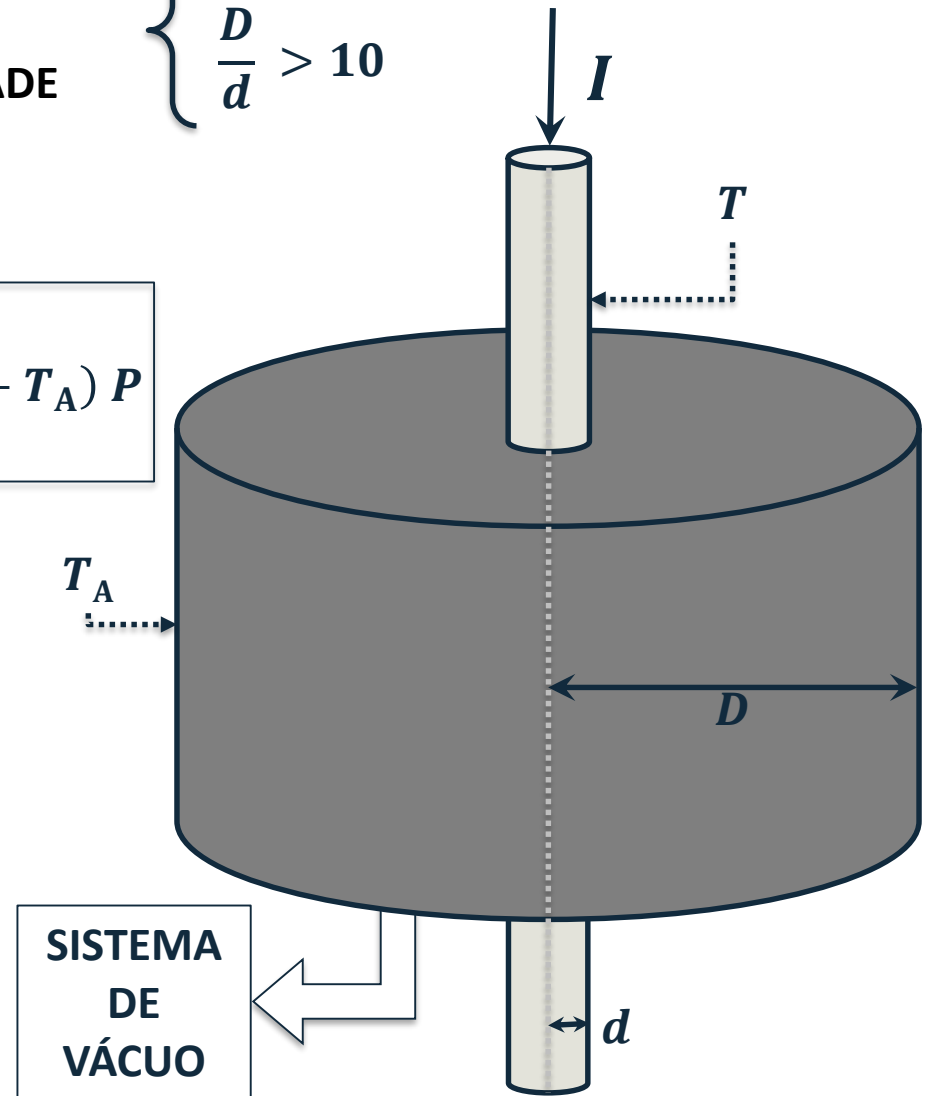
$c_p \equiv$ calor específico a pressão constante

Tipicamente:

$$\gamma = 1,667 \text{ (átomos)}$$

$$\gamma = 1,40 \text{ (diatômicas)}$$

$$\gamma = 1,31 \text{ (triatômicas)}$$



MEDIDORES DE VÁCUO

❑ MEDIDORES DE TERMO-CONDUTIVIDADE

Princípio de Funcionamento

Energia térmica transferida do fio ao gás:

$$E_{\text{gas}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{2k}{\pi m_{\text{molecular}} T_A}} (T - T_A) P$$

$\alpha \equiv$ coeficiente de acomodação do gás

$$\gamma = c_p / c_v$$

$c_p \equiv$ calor específico a pressão constante

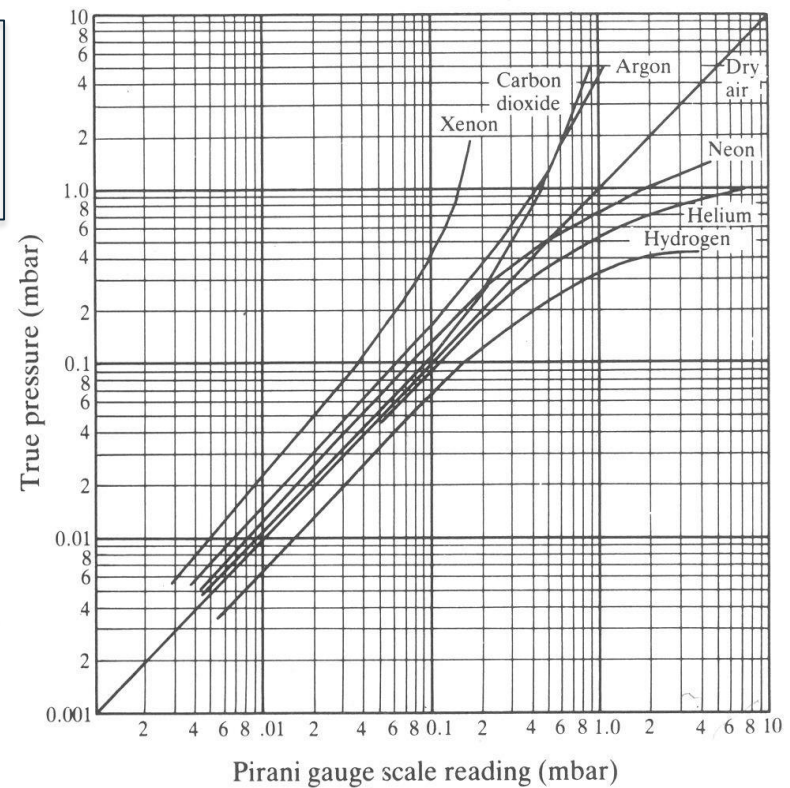
Tipicamente:

$$\gamma = 1,667 \text{ (átomos)}$$

$$\gamma = 1,40 \text{ (diatômicas)}$$

$$\gamma = 1,31 \text{ (triatômicas)}$$

- Dependência com a massa molecular

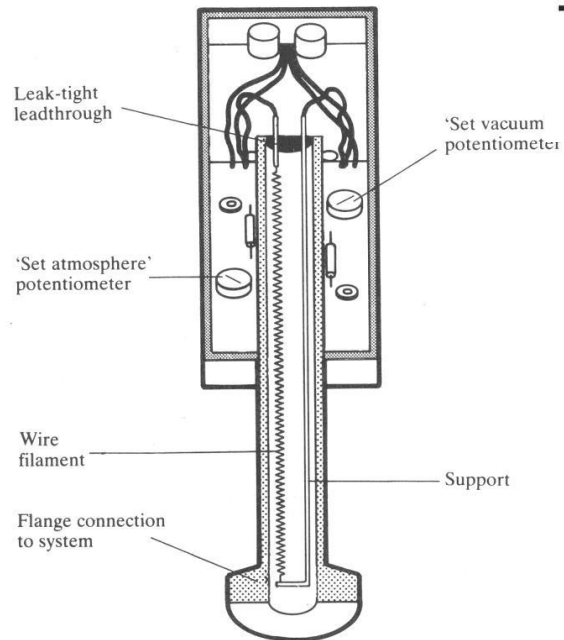


MEDIDORES DE VÁCUO

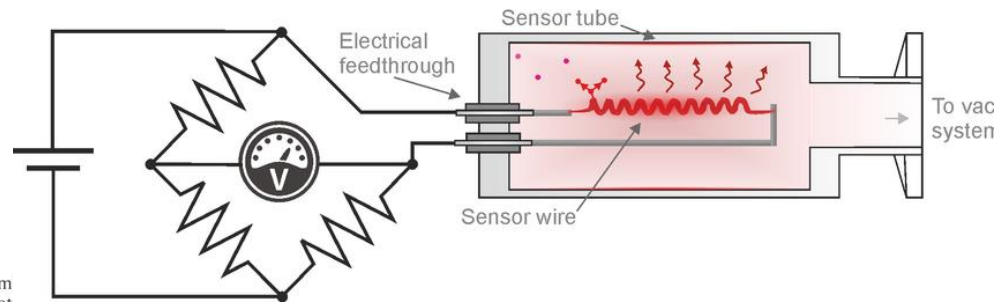
❑ MEDIDORES DE TERMO-CONDUTIVIDADE

• Pirani

Medida de corrente elétrica na configuração Ponte de Wheastone

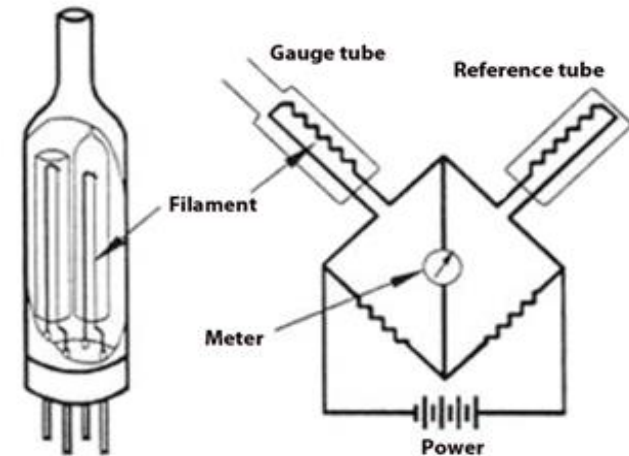


• Circuito clássico



• Circuito compensador

Para minimizar efeitos de ΔT_A

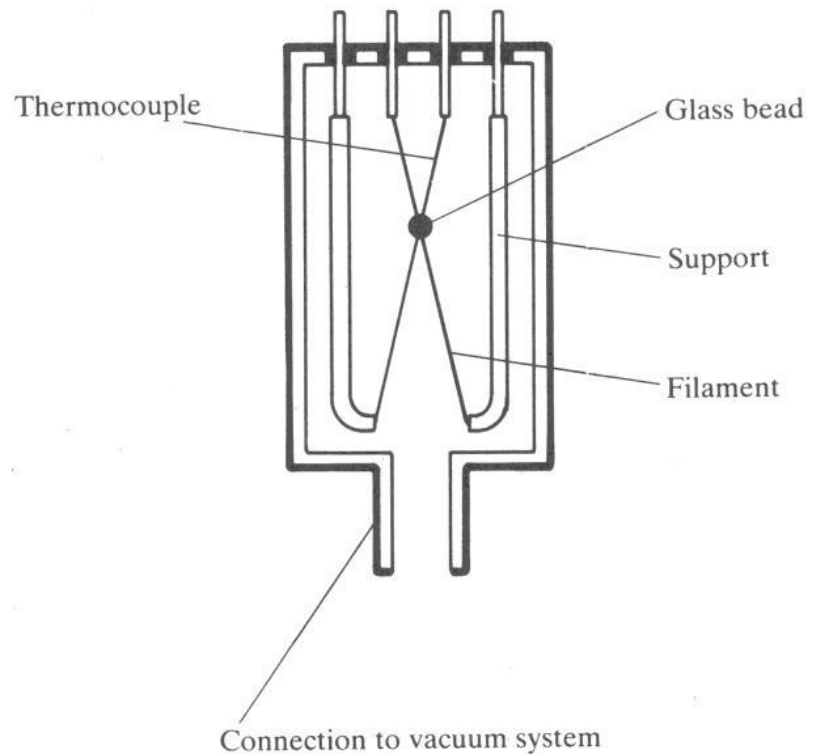
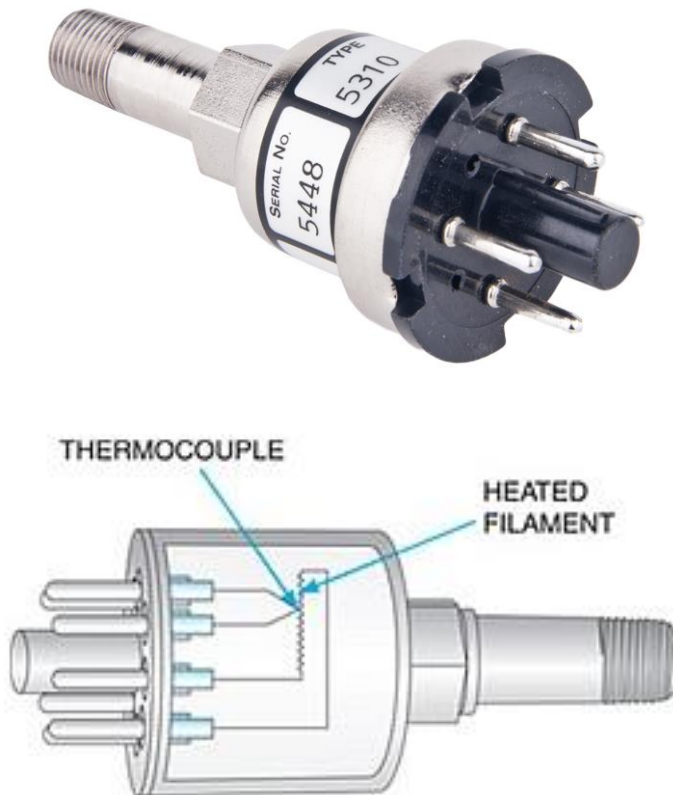


MEDIDORES DE VÁCUO

❑ MEDIDORES DE TERMO-CONDUTIVIDADE

- Termopar

Medida de tensão elétrica na configuração Ponte de Wheastone

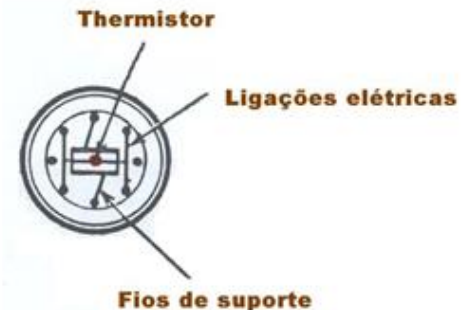
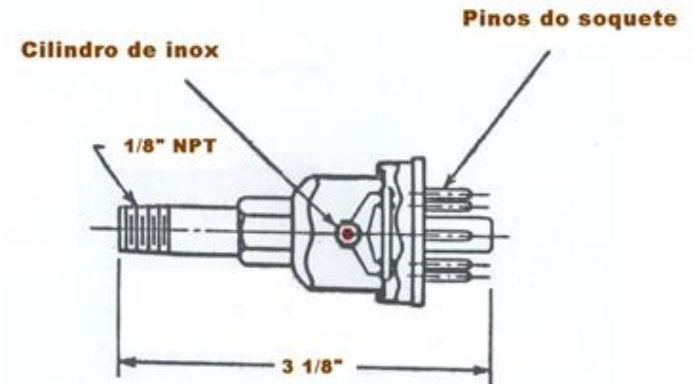


MEDIDORES DE VÁCUO

☐ MEDIDORES DE TERMO-CONDUTIVIDADE

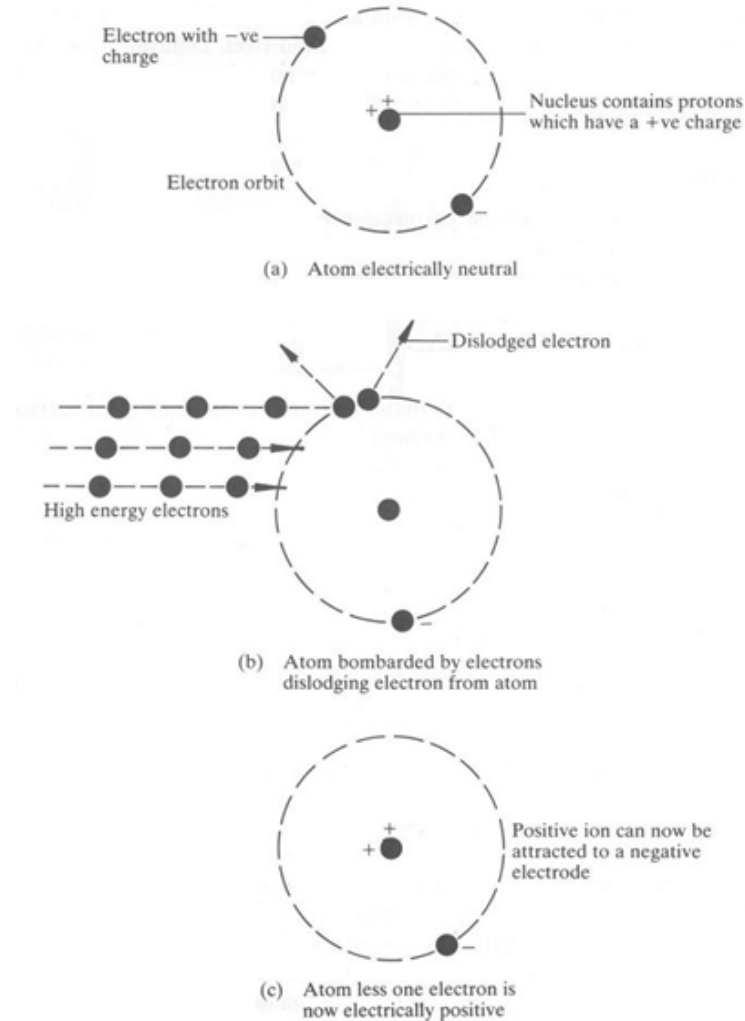
- **Thermistor**

Medida de uma resistência variável dependente da temperatura (thermistor) na configuração Ponte de Wheastone

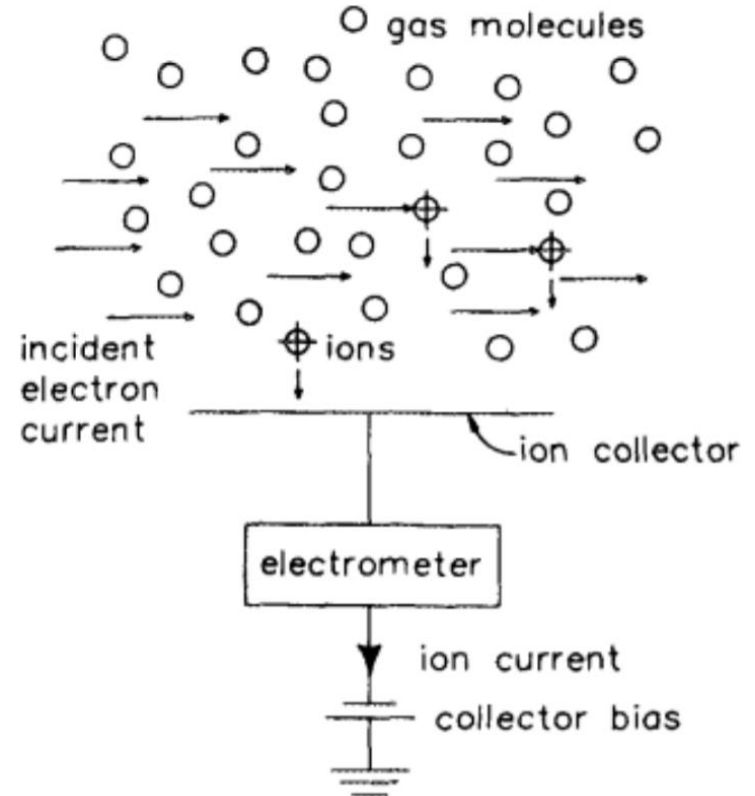


MEDIDORES DE VÁCUO

☐ MEDIDORES DE IONIZAÇÃO

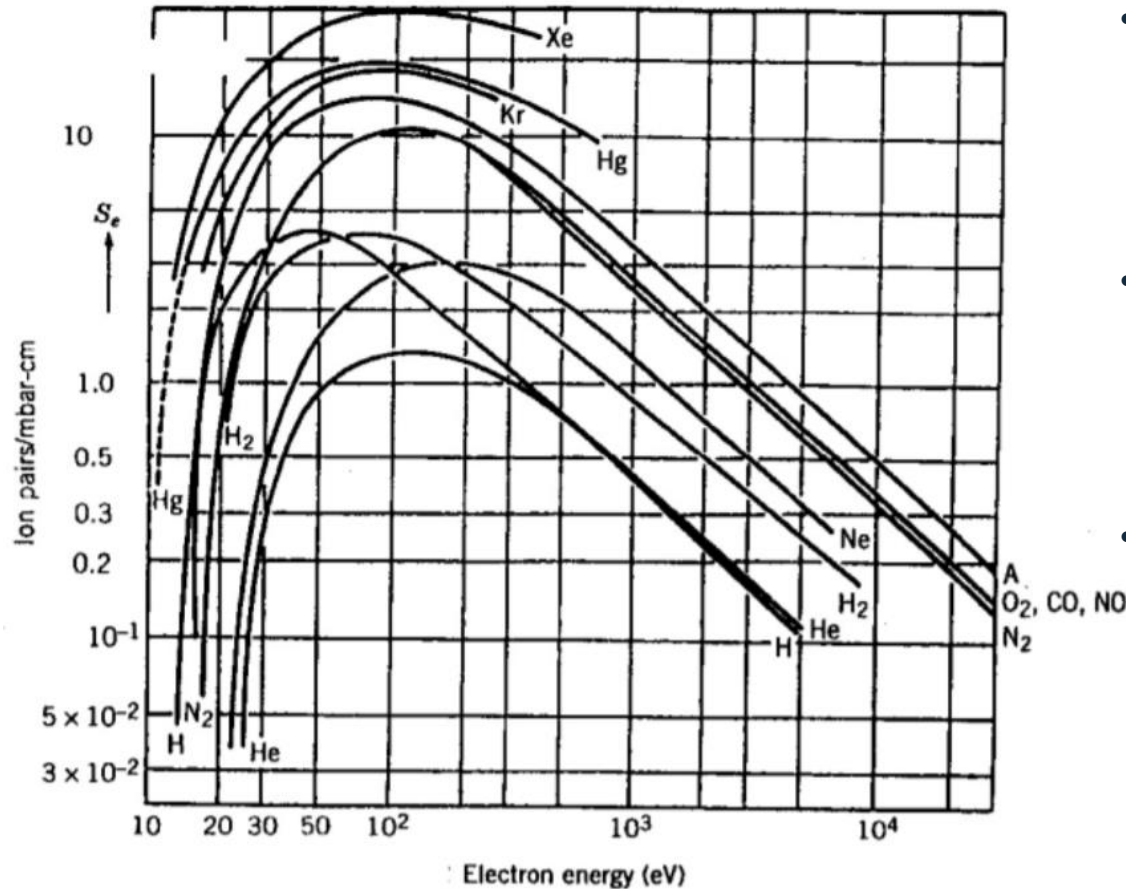


- À baixa pressão, a taxa de ionização é proporcional à concentração molecular ($c_{\text{molecular}}$) do gás
- À temperatura constante, $P \propto c_{\text{molecular}}$



MEDIDORES DE VÁCUO

☐ MEDIDORES DE IONIZAÇÃO



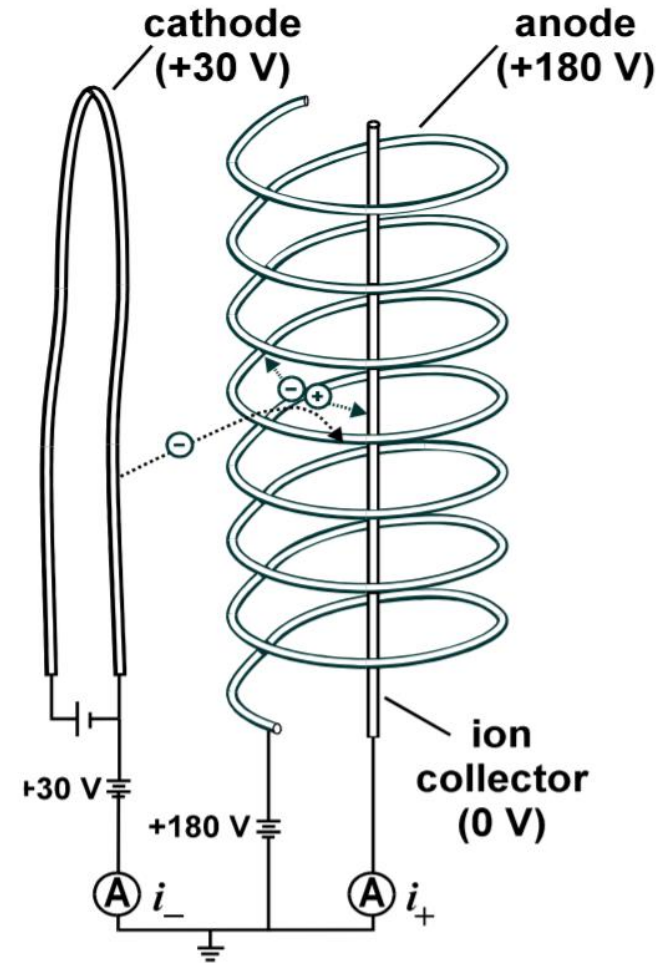
- A taxa de ionização por impacto de elétrons (@ $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) é máxima para energias entre $E = 50 \sim 200 \text{ eV}$ para diversos gases
- **Medidores de Cátodo Quente**
Elétrons são emitidos termoionicamente e acelerados por campo elétrico
- **Medidores de Cátodo Frio**
Elétrons são iniciados por emissão de campo (ou radiação) e armadilhados/amplificados em um campo eletromagnético cruzado

MEDIDORES DE VÁCUO

☐ MEDIDORES DE IONIZAÇÃO

Cátodo Quente

- Bayard-Alpert

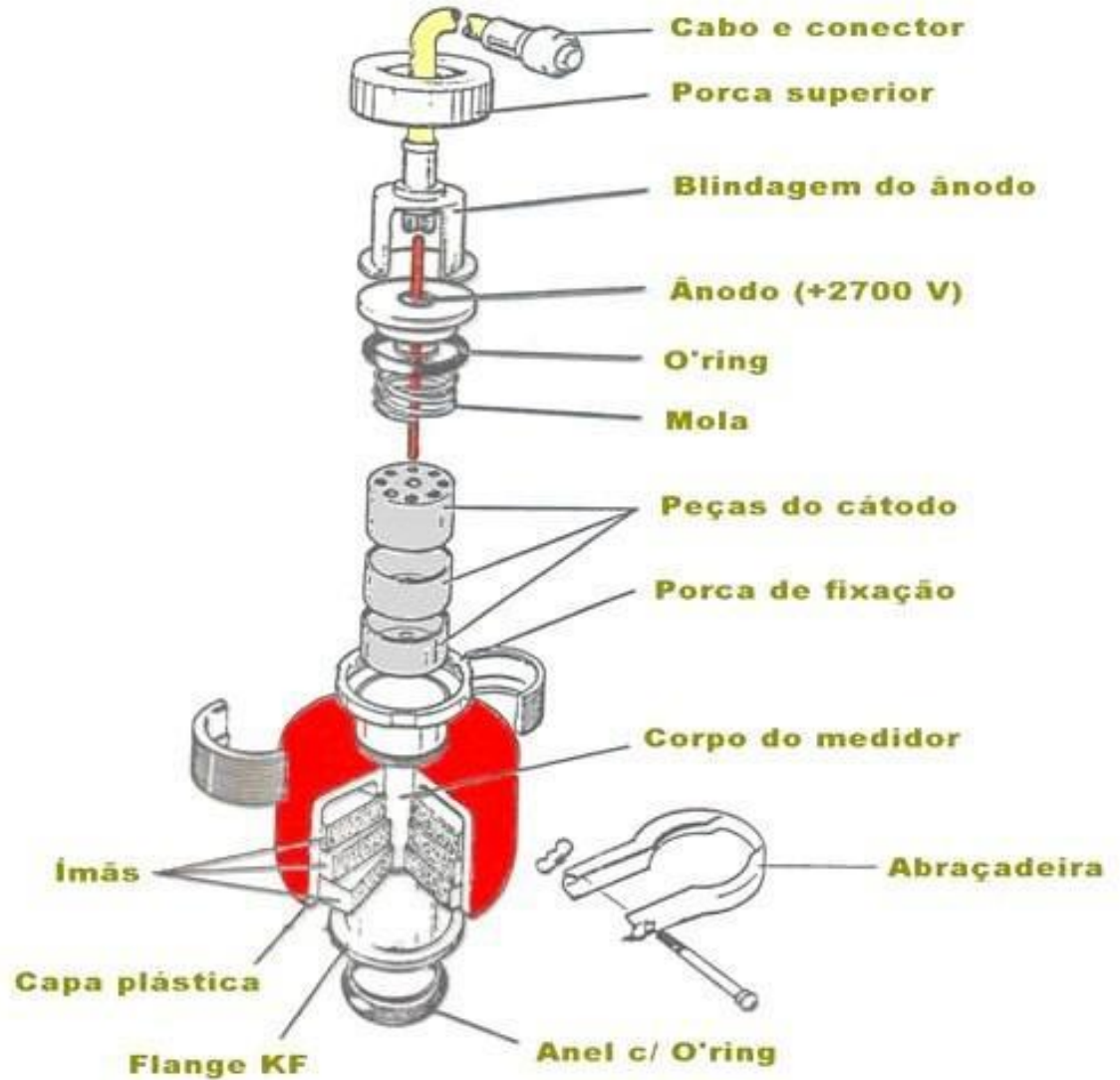
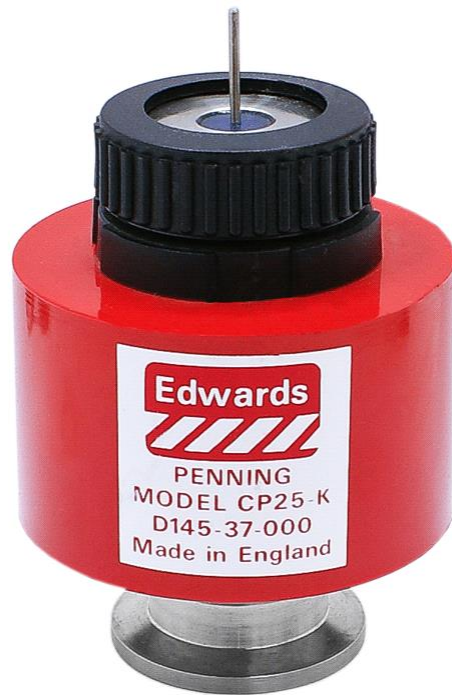


MEDIDORES DE VÁCUO

☐ MEDIDORES DE IONIZAÇÃO

Cátodo Frio

- Penning

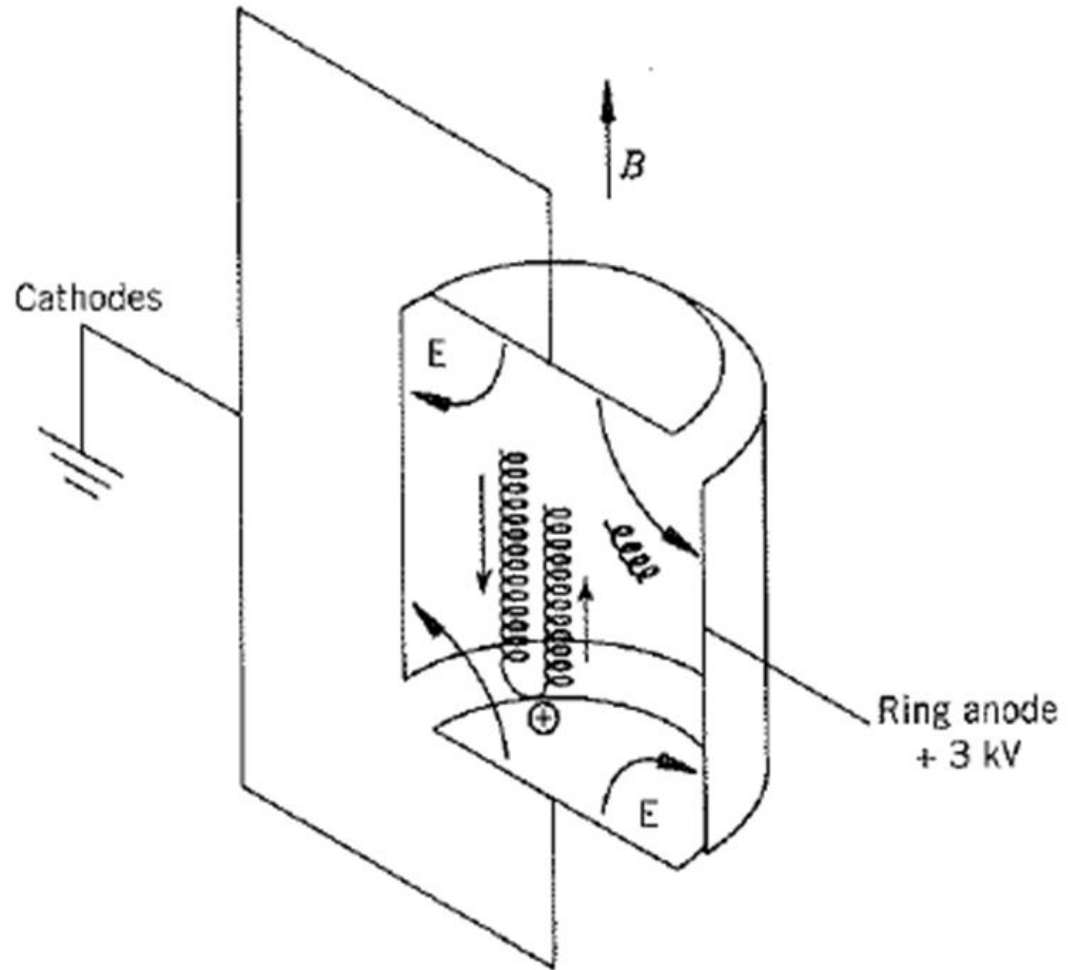
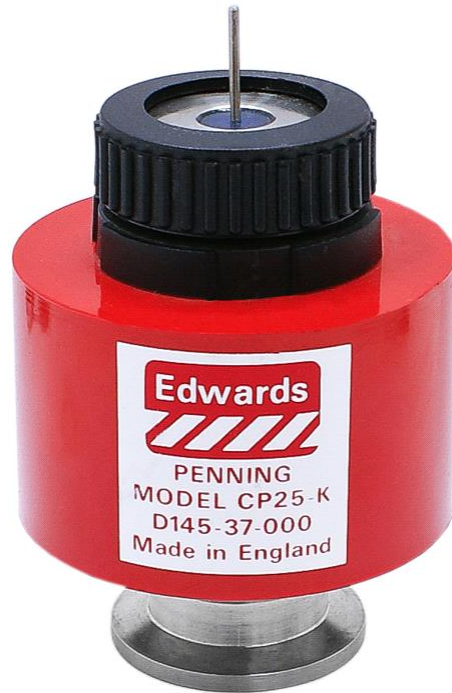


MEDIDORES DE VÁCUO

☐ MEDIDORES DE IONIZAÇÃO

Cátodo Frio

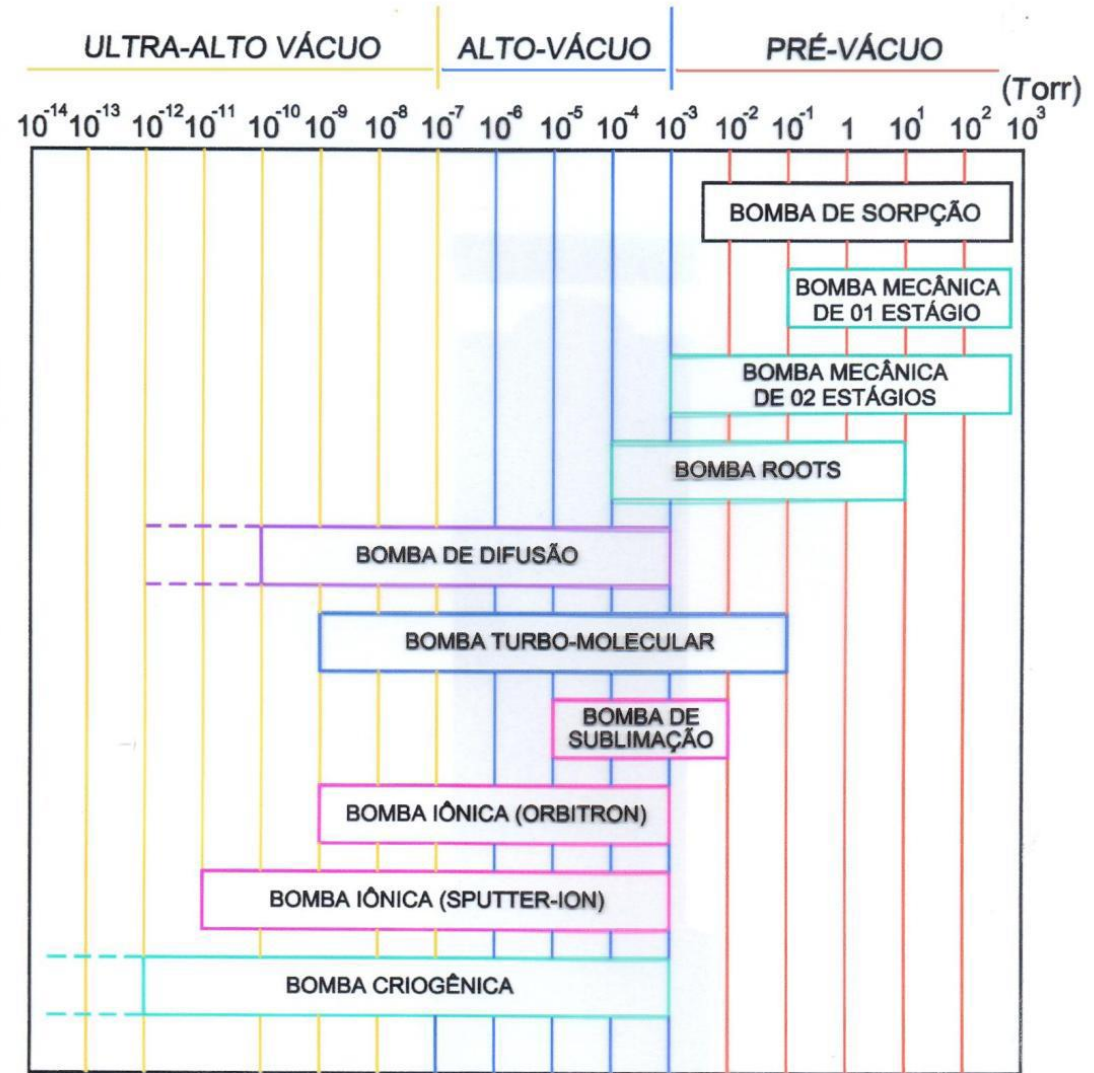
- Penning



BOMBAS DE VÁCUO

BOMBAS DE VÁCUO

- Bomba Mecânica
- Bomba de Difusão



BOMBAS DE VÁCUO

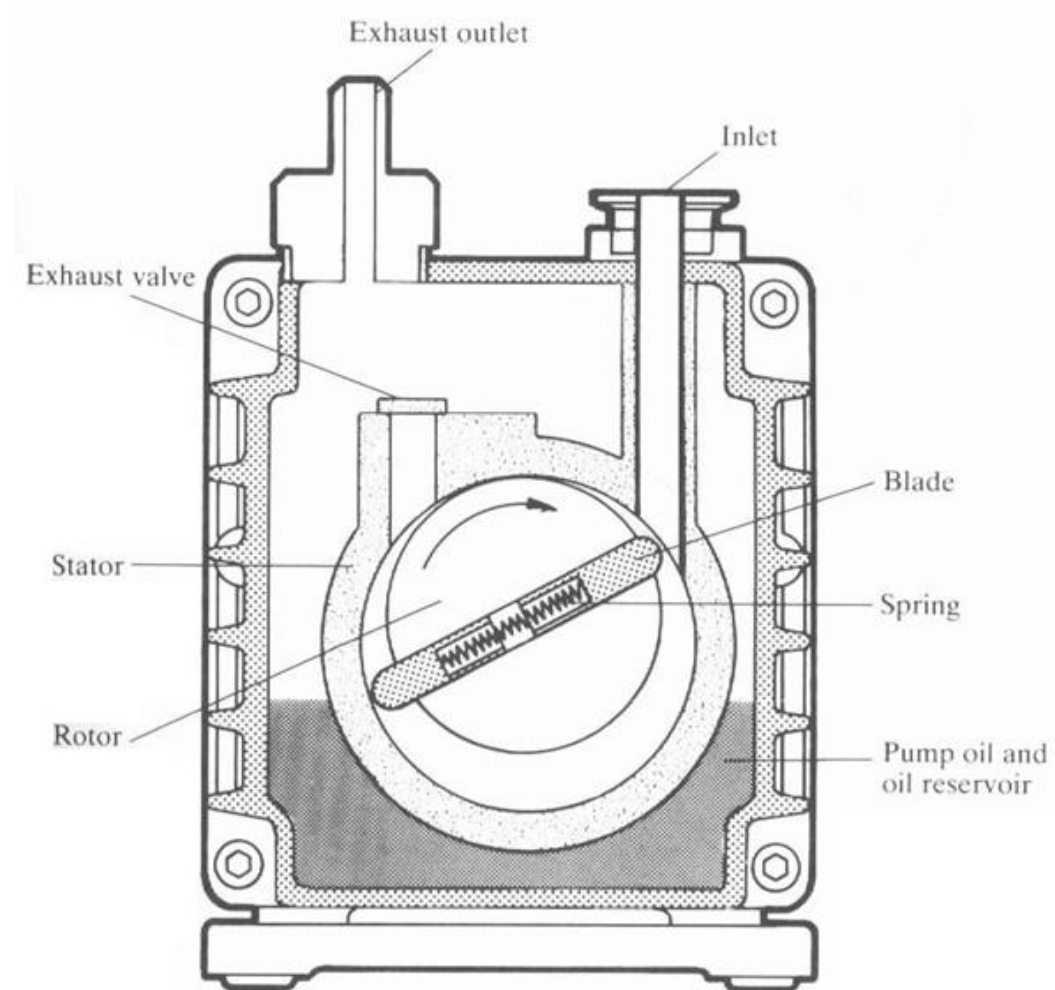
❑ BOMBA MECÂNICA



$$S = 3 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

Funções do óleo:

- Vedação
- Lubrificação
- Ação anti-corrosive
- Refrigeração



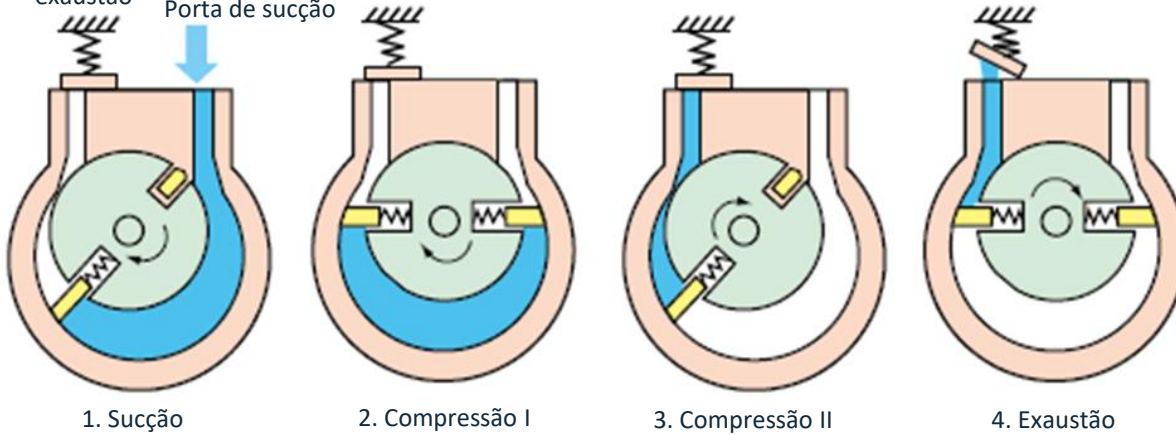
BOMBAS DE VÁCUO

☐ BOMBA MECÂNICA

• 01 estágio

Válvula de
exaustão

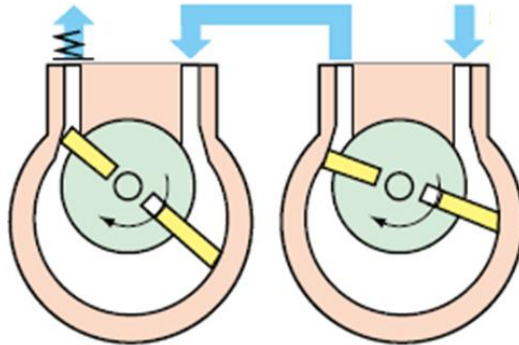
Porta de sucção



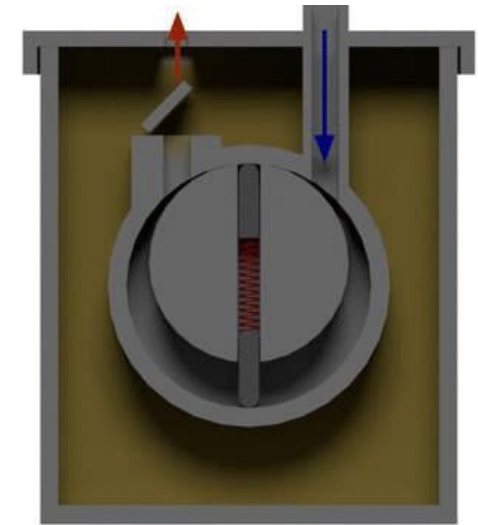
• 02 estágios

Válvula de exaustão

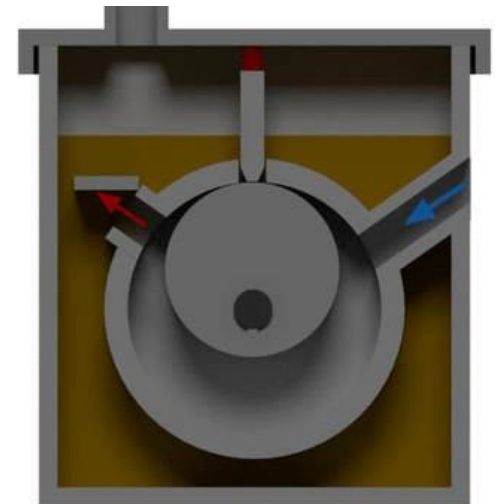
Porta de sucção



• Palheta rotativa

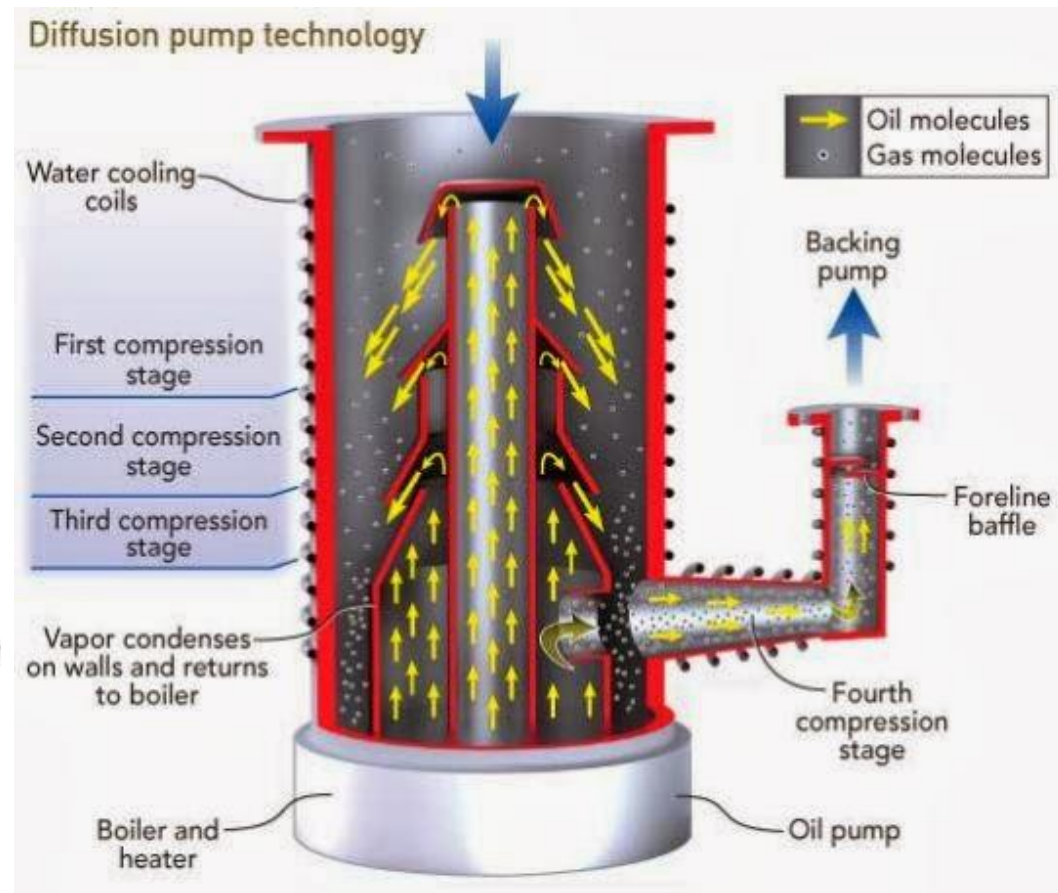


• Palheta estacionária



BOMBAS DE VÁCUO

❑ BOMBA DE DIFUSÃO



BOMBAS DE VÁCUO

☐ MANUTENÇÃO DAS BOMBAS

- Cuidados com a bomba rotativa
 - Verificar o nível de óleo da bomba
 - Verificar a tensão de operação
 - Verificar as condições da correia

- Cuidados com a bomba difusora
 - Verificar a tensão da resistência (220 V)
 - Verificar o fluxo de água ou o ventilador
 - Tomar cuidado para evitar pressões maiores que 10^{-3} torr



INFORMAÇÕES DA DISCIPLINA

INFORMAÇÕES DA DISCIPLINA

Sala de Laboratório: 1008, Ala II – Térreo

Sala de Teoria: 210, Ala II

☐ PROFESSORES

Nilberto Heder Medina (Teoria e Laboratório)

Laboratório Aberto de Física Nuclear (LAFN), sala 206

Tel.: 3091-6763

medina@if.usp.br

Vitor Angelo Paulino de Aguiar (Teoria e Laboratório)

Ed. Oscar Sala, sala 126

Tel.: 2648-6676

vitor_ap_aguiar@hotmail.com

Saulo Gabriel Alberton (Laboratório)

Ed. Oscar Sala, sala 122

Tel.: 2648-6678

alberton@if.usp.br

Luiz Marcos Fagundes (Seminários)



INFORMAÇÕES DA DISCIPLINA

DATA	ATIVIDADE
06/03/20	Aula Introdutória
09/03/20	1º Ciclo de Experimentos – aula 1/3
16/03/20	1º Ciclo de Experimentos – aula 2/3
23/03/20	1º Ciclo de Experimentos – aula 3/3
06/04/20	ENTREGA DO RELATÓRIO 1
13/04/20	2º Ciclo de Experimentos – aula 1/3
20/04/20	2º Ciclo de Experimentos – aula 2/3
04/05/20	2º Ciclo de Experimentos – aula 3/3
18/05/20	ENTREGA DO RELATÓRIO 2
18/05/20	Aula de Componentes, Materiais e Vazamentos – Pelletron
01/06/20	Laboratório de Filmes Finos do Acelerador Pelletron
16/06/20	ENTREGA DO RELATÓRIO 3

INFORMAÇÕES DA DISCIPLINA

☐ SEMINÁRIOS

- **10/03 – Medidores de Pressão**
- **01/04 – Bombas de Vácuo I**
- **05/05 – Bombas de Vácuo II**
- **12/05 – Materiais e Componentes**

Local: sala 210, Ala II

Horário: 19h00 às 20h50

Palestrante: Prof. Luiz Marcos Fagundes



INFORMAÇÕES DA DISCIPLINA

RELATÓRIOS

- **06/04 - Relatório 1**
- **18/05 - Relatório 2**
- **16/06 - Relatório 3**

Local: escaninho do Laboratório de Estrutura da Matéria (Alvimar)

Horário: até às 12h00



INFORMAÇÕES DA DISCIPLINA

☐ RELATÓRIOS

- **Ciclo 1:** Estudo de medidores de pressão (**3 aulas**)
- **Ciclo 2:** Bombas de vácuo e condutâncias (**3 aulas**)
- **Ciclo 3:**
 - Detecção de vazamentos, vedações e componentes (**1 aula**)
Local: Acelerador Pelletron
 - Laboratório de Filmes Finos (**1 aula**)
Local: Acelerador Pelletron

INFORMAÇÕES DA DISCIPLINA

☐ RELATÓRIOS

Folha de dados no final de cada aula.

Relatório 1 (peso 2,0)

Relatório 2 (peso 3,0)

Relatório 3 (peso 1,0)



É obrigatória a entrega dos 3 relatórios dentro dos prazos estabelecidos (até o meio-dia do dia de entrega)

Média final: $M_F = \frac{M_P + M_R}{2}$

$M_P \equiv$ média das provas

$M_R \equiv$ média dos relatórios

Se

- $M_P < 3$ ou $M_R < 3$
- $3 \leq M_P < 5$ ou $3 \leq M_R < 5$

→ o estudante estará reprovado

→ $M_F = \min\{M_P, M_R\}$ e o estudante deverá fazer uma prova de recuperação, R .

Em caso de teoria, será feita uma prova.

Em caso de laboratório, será feita uma entrevista.

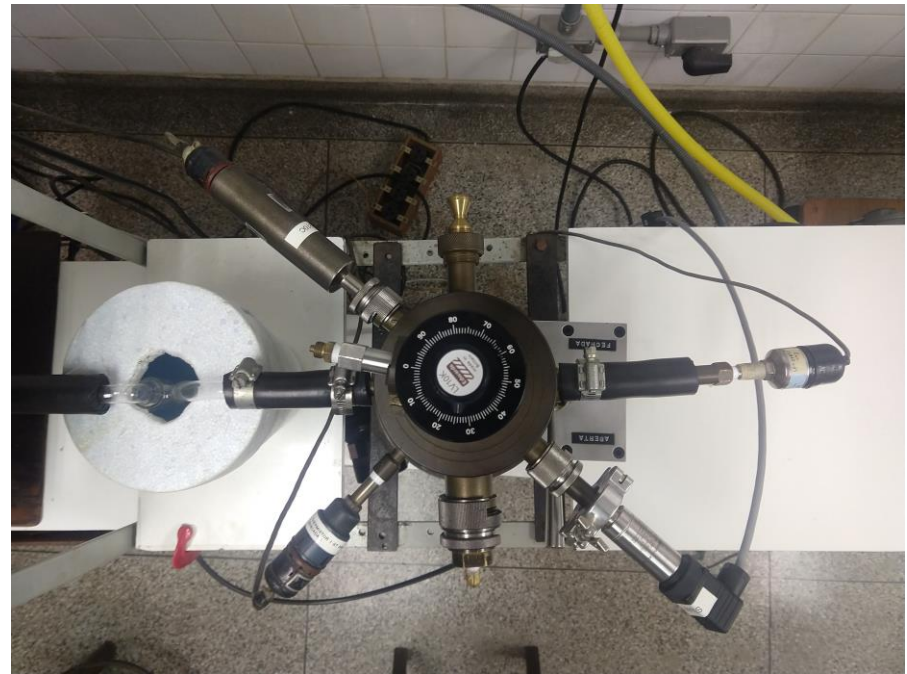
$$N_F = \frac{M_F + 2R}{3}$$

EXPERIMENTOS

EXPERIMENTOS

❑ CICLO 1

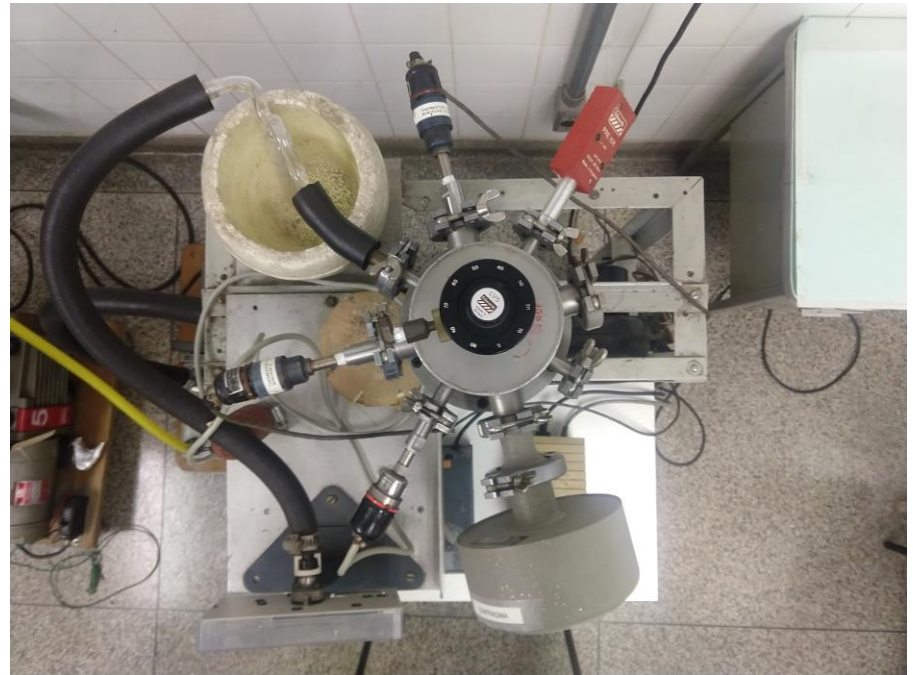
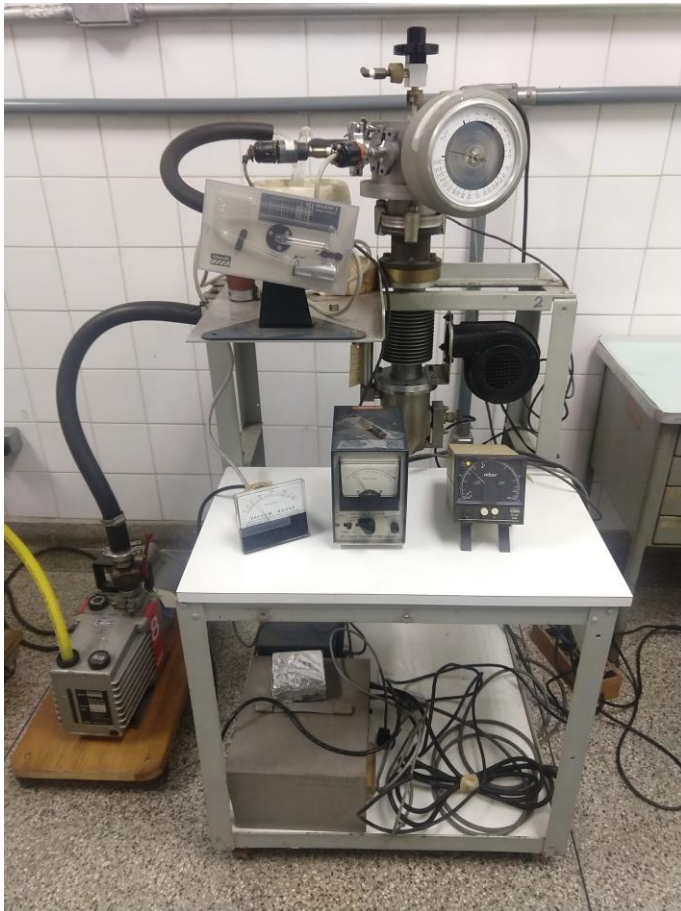
Experimento 1



EXPERIMENTOS

❑ CICLO 1

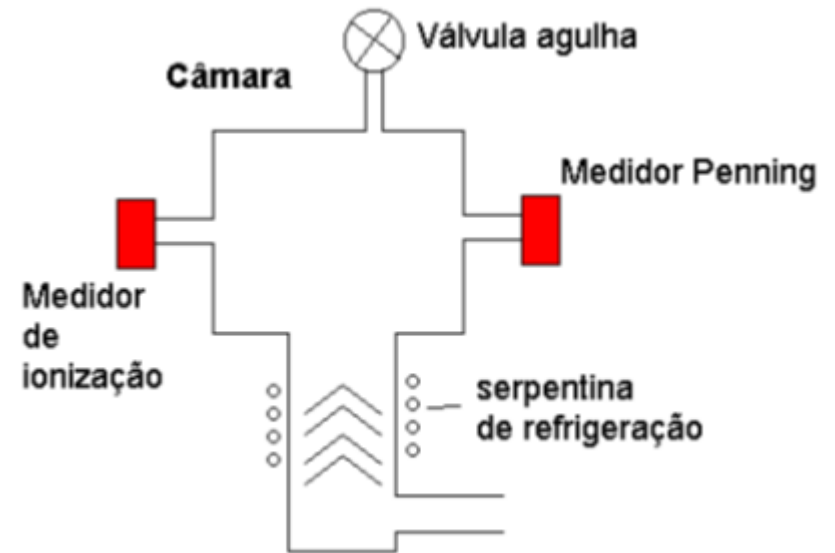
Experimento 2



EXPERIMENTOS

❑ CICLO 1

Experimento 3



EXPERIMENTOS

❑ CICLO 1

Estudos a serem realizados no laboratório

- ✓ Montagem de sistemas de vácuo
- ✓ Verificar as características de todos os medidores de vácuo
- ✓ Calibração com medidor absoluto
- ✓ Estudo das escalas e unidades
- ✓ Utilização de válvulas
- ✓ Armadilhas de N₂L
- ✓ Vedações (o'rings) e componentes
- ✓ Resposta dos medidores com gases diferentes: He, Ar, CO₂



EXPERIMENTOS

❑ PROCEDIMENTO EXPERIMENTAIS

Bancada 1 (Kammerer)

Bancada 2 (Vacustat)

Bancada 3 (Bayard-Alpert)

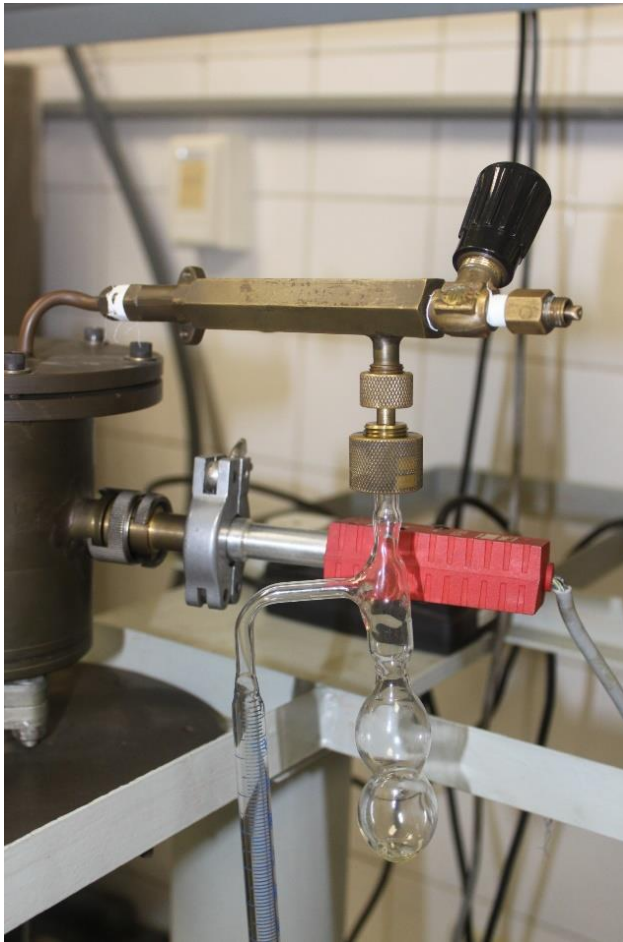
- Identificar todos os componentes do sistema de vácuo
- Fechar todas as válvulas e ligar a bomba mecânica
- Verificar se todos os medidores estão ligados e funcionando
- Verificar possíveis vazamentos
- Verificar as escalas e unidades de todos medidores
- Verificar o funcionamento de todos os medidores
- Iniciar a tomada de dados
- Produzir um vazamento através da válvula agulha
- Anotar as pressões em todos os medidores
- Gases disponíveis: Argônio, Hélio, CO₂

Para caracterizar bem todos os medidores é necessário varrer todas as escalas com um número de medidas suficiente para descrever bem seus comportamentos em vários regimes.

EXPERIMENTOS

❑ CICLO 2

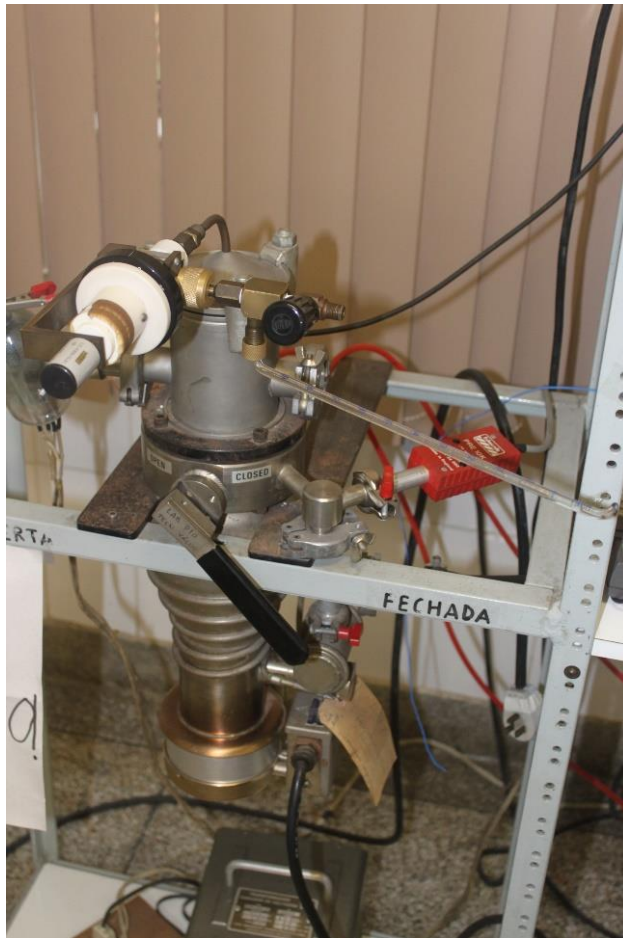
Experimento 4



EXPERIMENTOS

❑ CICLO 2

Experimento 5



EXPERIMENTOS

❑ CICLO 2

Experimento 6



EXPERIMENTOS

❑ CICLO 3

Leak Detector, Vazamentos e Componentes



EXPERIMENTOS

❑ CICLO 3

Laboratório de Filmes Finos do Pelletron

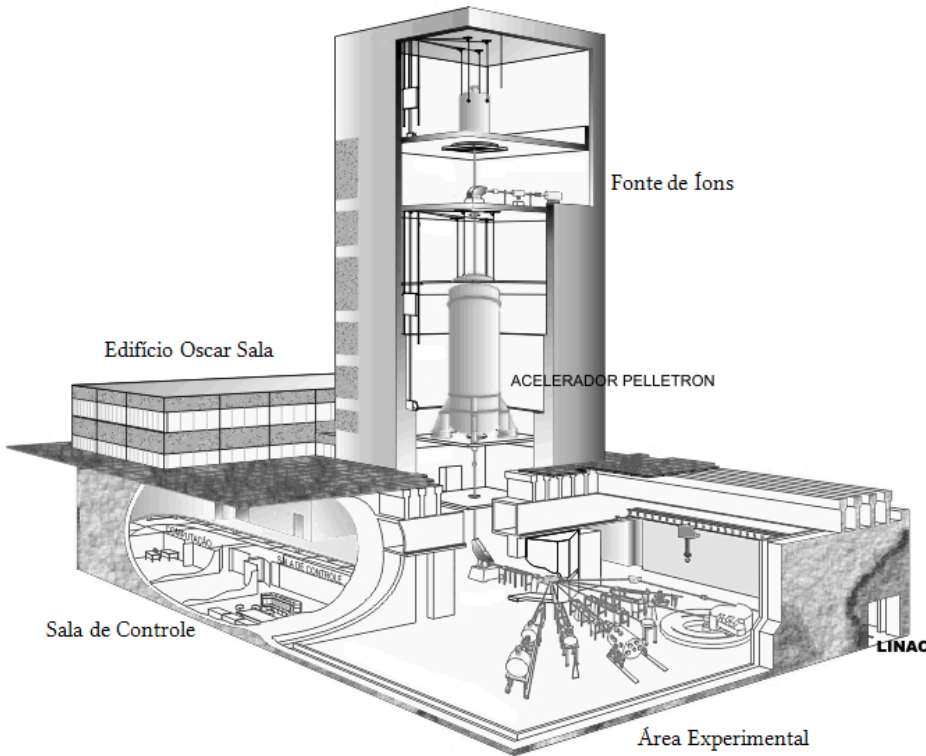


EXPERIMENTOS

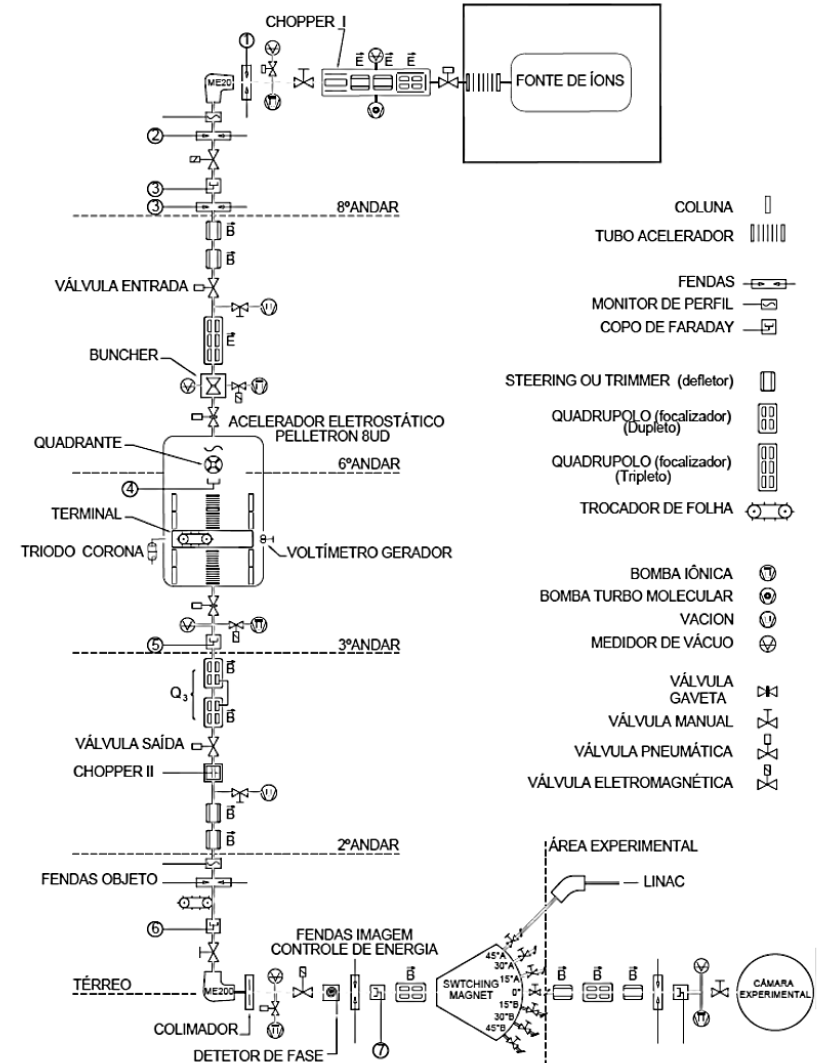
❑ CICLO 3

Acelerador Pelletron 8UD

Laboratório Aberto de Física Nuclear (LAFN-USP)



SISTEMA DE MONTAGEM DO LABORATÓRIO PELLETRON LINHA DE FEIXE

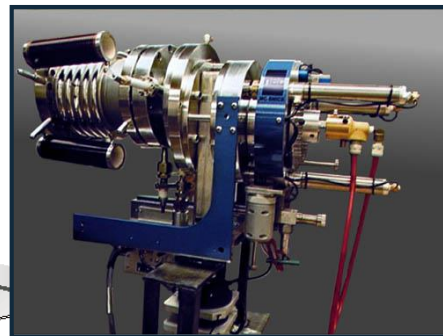


EXPERIMENTOS

☐ CICLO 3

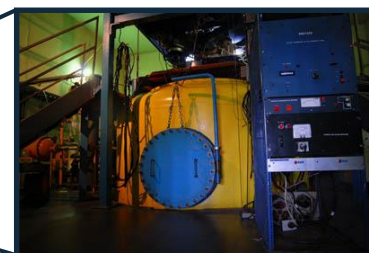
LAFN

Mass
selection
ME20



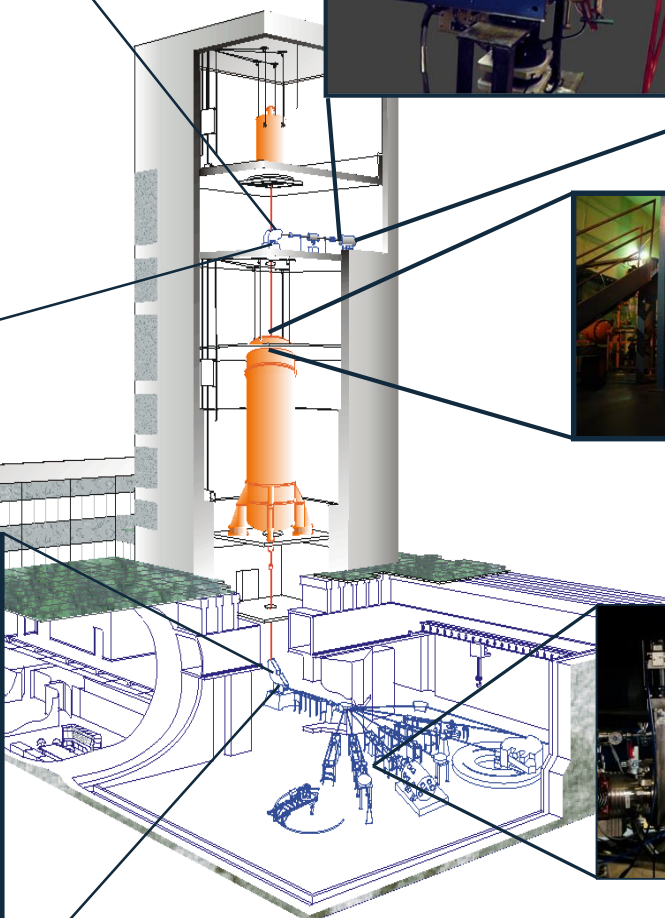
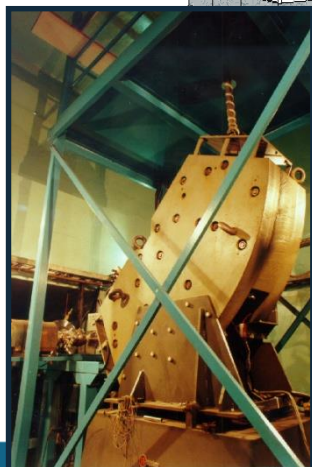
**SNICS Ion
source**

Beams: H, Li, B,
C, O, F, Si, Cl, Ti,
Cu, and Ag.



TANK

Energy
Selection
ME200



Dedicated beam line

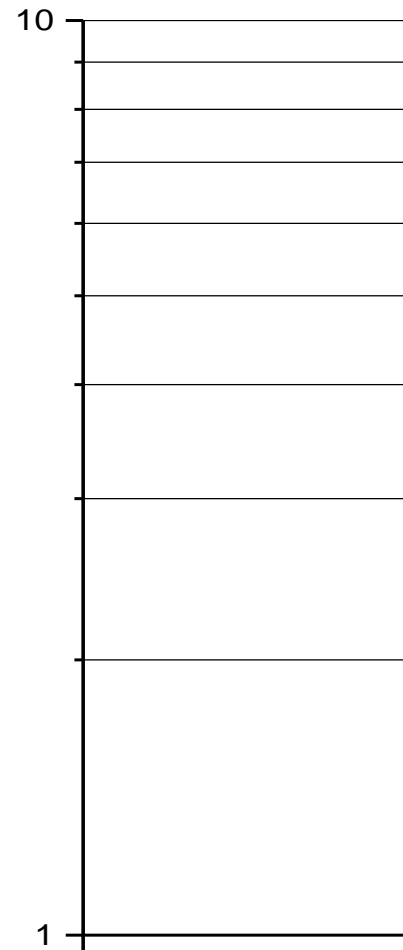
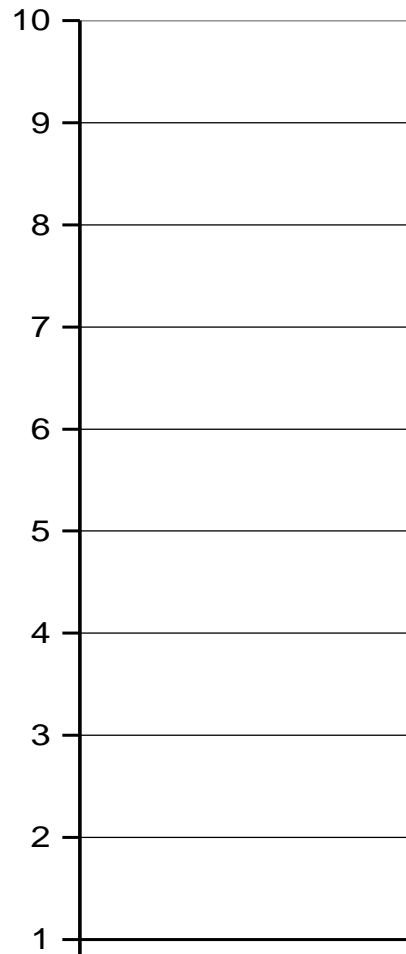
EXPERIMENTOS

☐ TABELA DE CONVERSÃO

	bar (dina/cm ²)	mbar	Pa (N/m ²)	atm	torr
bar	1	10³	10⁵	0,986923	750,062
mbar	10⁻³	1	10²	0,9869x10⁻³	0,750062
Pa	10⁻⁵	10⁻²	1		0,75x10⁻²
atm	1,0132	1,0132x10³	1,0132x10⁵	1	760
torr	1,3332x10⁻³	1,33322	1,33322x10²	1,3158x10⁻³	1

EXPERIMENTOS

☐ ESCALA LINEAR E ESCALA LOG



EXPERIMENTOS

❑ INSTRUÇÕES PARA UM BOM RELATÓRIO

- As medidas têm incerteza!
- Procure tirar as dúvidas em sala;
- Se possível, analise os dados de um experimento antes do próximo para poder discutir as dúvidas em sala;
- Organização é fundamental. Ajuda a fazer melhor e mais rápido;
- Pesquisa bibliográfica pode ajudar bastante na confecção do relatório;
- Cuidado com as unidades e as ordens de grandeza (potências de 10). Elas mudam de um medidor para outro. Se você não estiver atento, tomará dados errados – o que diminui a nota;
- Um relatório tem começo, meio e fim.

EXPERIMENTOS

INSTRUÇÕES PARA UM BOM RELATÓRIO

Bancada 2 - Calibração com Vacustat

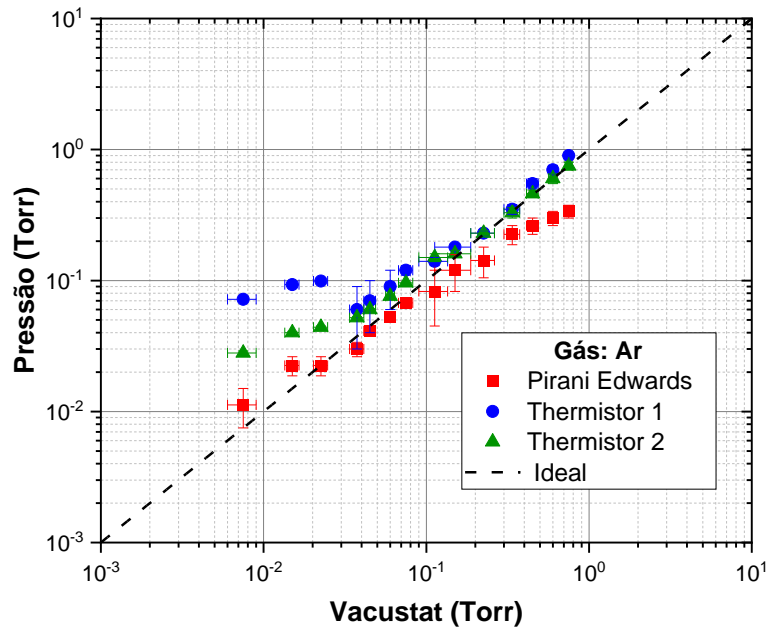


Gráfico bom

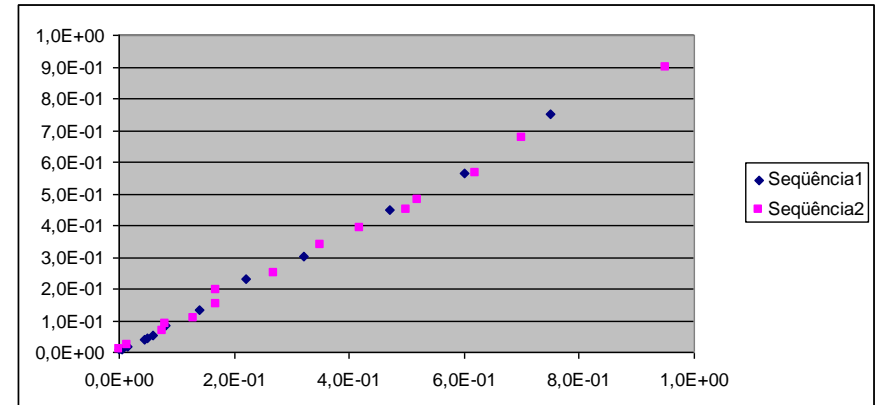


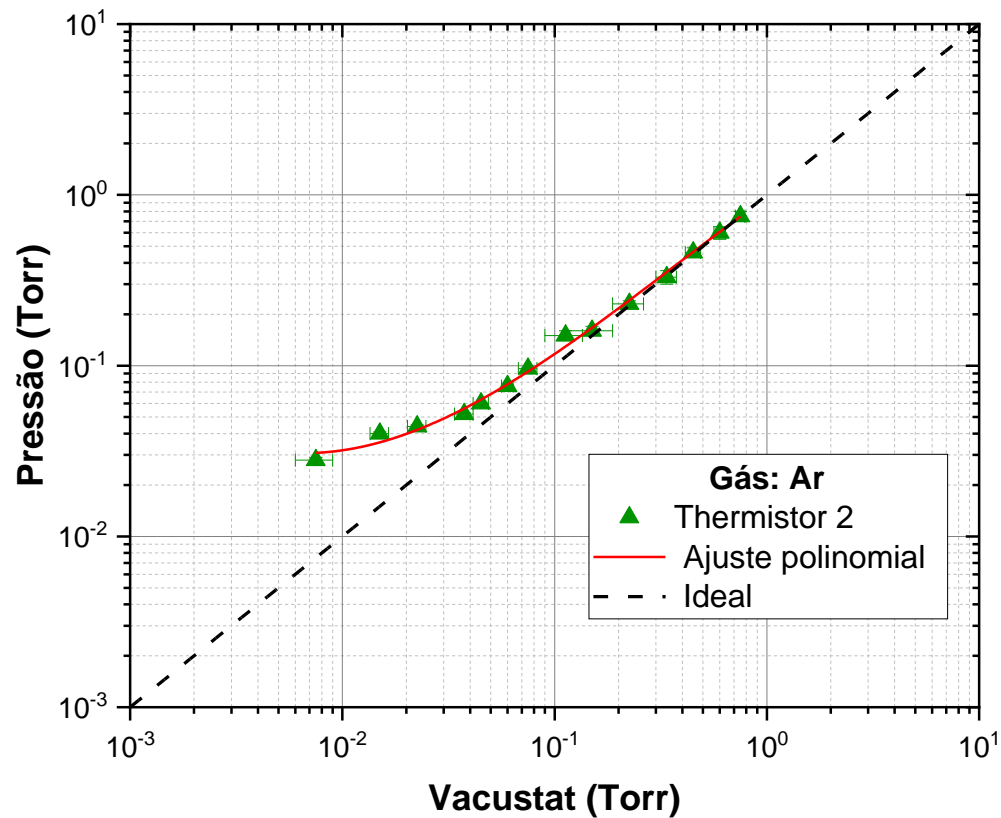
Gráfico (muito) ruim

Alguns gráficos podem ficar melhores em escala logarítmica

EXPERIMENTOS

☐ INSTRUÇÕES PARA UM BOM RELATÓRIO

Bancada 2 - Calibração com Vacustat



EXPERIMENTOS

SEGURANÇA

- Cuidado com as correias das bombas mecânicas, temperatura da bomba difusora, alta tensão no medidor Penning, temperatura do nitrogênio líquido;
- Cuidados com os equipamentos: medidores sensíveis e/ou vidro, evitar a entrada de óleo na câmara, atentar para o resfriamento da bomba difusora;
- Independência por parte do aluno é fundamental

**BOAS MEDIDAS
E
BOA SORTE**

