



IV Escola do CBPF

# Introdução a Sistemas de Medidas

**Professor:**

Geraldo Cernicchiaro

**Objetivos:**

Apresentar do ponto de vista da instrumentação científica (e a partir de exemplos): as ferramentas, inovações tecnológicas e o vocabulário básico que permitem começar a entender as questões e equipamentos presentes em laboratórios de física experimental.

# Textos de Referência:

*Experimental Principles and Methods Below 1K.*

Lounasmaa, O.V.

(Academic Press: London and New York)

*The Art of Electronics.*

P. Horowitz, W. Hill.

(Cambridge University Press.)

*Basic Electronics for Scientists.*

J. J. Brophy.

(McGraw-Hill Kogakusha Ltda.)

*Numerical Recipes on C.*

W.P.Press, S.A.Teukolky., W.T.Vetterling, B.P. Flannery.

(Cambridge University Press)

*Experimental Pulse NMR A Nuts and Bolts Approach*

E. Fukushima, S. B.W. Roeder.

(Addison-Wesley Publishing Company)

# Algumas Definições:

## **Medir**

Expressar o valor de uma grandeza em relação a um padrão (p.e. comprimento) ou a uma escala de referência (p.e. temperatura)

## **Sinal elétrico**

Uma quantidade elétrica detectável tal como tensão, carga ou corrente, ou sua variação, no qual uma informação pode ser codificada.

## **Codificar**

Transferir informação de um sistema de para outro.

## **Digital**

Representação por meio de uma sequência de números ou sinais discretos (p.e. bits e bytes)

## **Analógico**

Uma grandeza que pode assumir valores contínuos.

## **Conversores**

Dispositivo que permite codificar sinais analógicos em digitais e vice-versa (DAC e ADC)

## Algumas Técnicas Experimentais:

- Espectrômetro de Ressonância Magnética Nuclear (RMN);
- Magnetômetros:
  - Magnetômetro de Amostra Vibrante (MAV);
  - Magnetômetro de Extração;
  - Magnetômetro Magneto-ótico (Kerr e Faraday);
  - Magnetômetro SQUID
- Sistema de Medidas de Suscetibilidade Magnética;
- Sistema de Medidas de Resistividade Elétrica;
- Espectrômetro Mössbauer;
- Raio X;
- Refrigerador à Diluição He<sup>3</sup>-He<sup>4</sup>

# Selecionar a técnica de medida:

- O que queremos medir?
- Quais os métodos disponíveis?
- Qual a tolerância de erro aceitável?
- Como a medida afeta o sinal?
- Como a forma de onda do sinal afeta a medida?
- Qual a banda passante do método de medida?
- Quais as fontes de ruído?
- Quais as fontes de interferência?
- Qual o protocolo de medida?

# Estratégias de Implementação:

- Adquirir sistemas comerciais
  - Oxford Instruments
  - Quantum Design
  - Bruker
  - National Instruments
  - Hewlett Packard
- Desenvolver sistemas de medidas
  - projetar
  - montar eletrônica
  - comprar módulos
  - calibrar
  - automatizar

# Adquirir:

- Vantagens:
  - Qualidade
  - Padronização
  - Confiança
  - Interface amigável
  - Engenharia de Produto
  - Tempo (importação)
- Desvantagens:
  - Alto custo
  - Obsolescência
  - Caixa preta
  - Superestimar
  - Limitações
  - Distância
  - Manutenção

# Desenvolver:

- Vantagens:
  - Custo menor  
(salário)
  - Diferencial  
(concorrência)
  - Up-grade  
permanente
  - Manutenção
  - Adaptabilidade
  - Capacitação
  - Produto
- Desvantagens:
  - Tempo maior
  - Acabamento
  - Documentação
  - Desconfiança  
(usuário)
  - Continuidade  
(rotatividade)
  - Definição do  
projeto



## Observação:

- Tendências de corte de verbas para pesquisa
- Reavaliação dos grupos de pesquisa básica
- Falsa dicotomia: pesquisa Básica x Aplicada
- Mentalidade mais aberta para questões aplicadas
- Capacidade de avaliação de novas tecnologias
- Busca de alternativas de financiamento
- Retorno mais imediato dos investimentos

# Interdisciplinaridade:

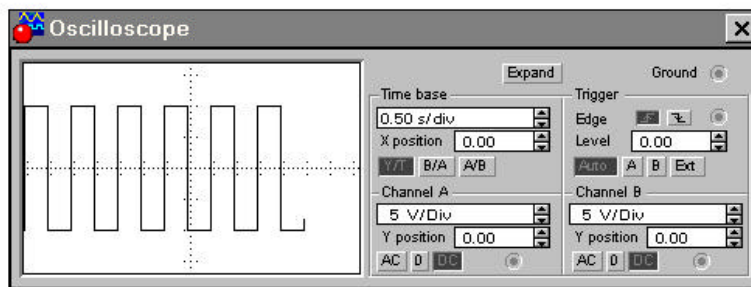
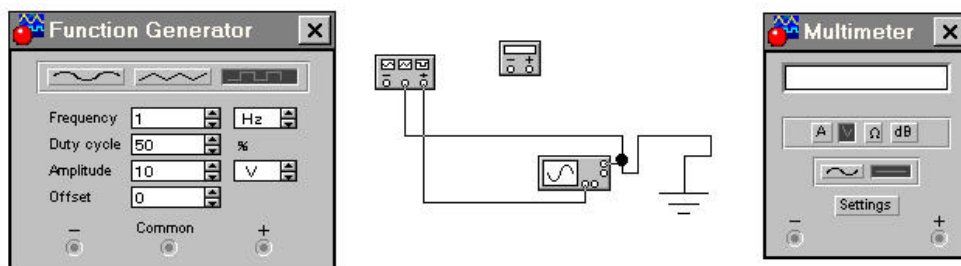
- *Física*: definição do problema
- *Eletrônica Digital*: interfaces, ADC, DAC, etc.
- *Eletrônica Analógica*: amplificadores, detecção, etc.
- *Informática*: controle, aquisição, tratamento de dados, etc.
- *Mecânica*: peças, porta-amostras, blindagens, etc.
- *Criogenia*: vácuo, baixas temperaturas, hélio líquido, etc.
- *Novos materiais*: síntese de amostras
- *Gerenciamento de recursos*: humanos e materiais

## Ferramentas:

- *Microcomputadores*: PCs, MACs, DSPs, microcontroladores, etc.
- *Modularidade*: amplificadores, multímetros, osciloscópios, lock-ins, etc.
- *Placas de aquisição*: ADC, DAC, contadores, multicanais, etc
- *Interfaces Padrões*: GPIB, CAMAC, VME, etc.
- *Programação*: Pascal, Fortran, C, etc.
- *Linguagens dedicadas*: LabVIEW, Visual Basic, etc.
- *Bibliotecas e drivers*: FFT, PID, filtros digitais, etc.

# Instrumentos básicos:

## *Gerador de funções*



## *Multímetro*

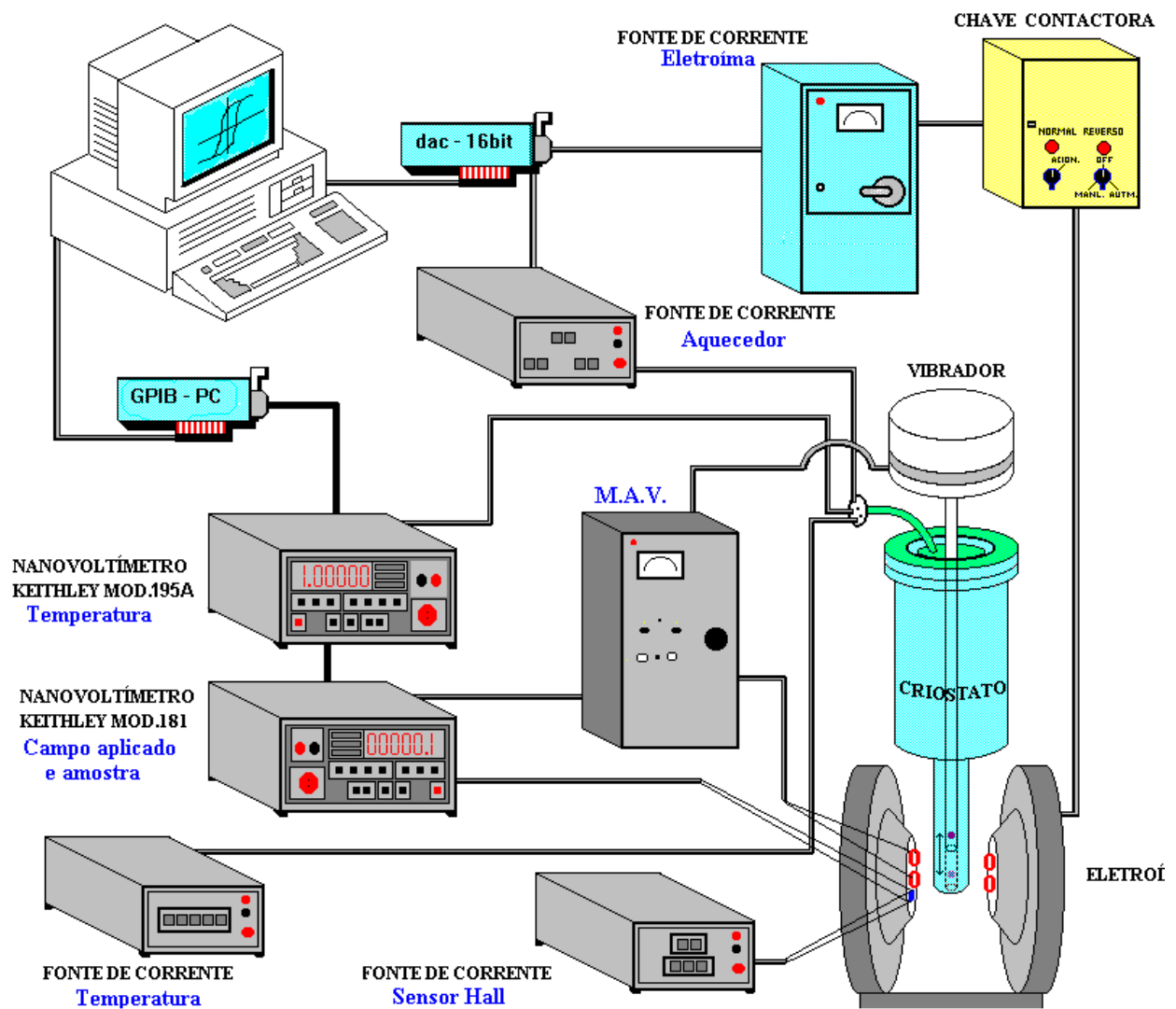
## *Osciloscópio*

- Fonte de tensão
- Fonte de corrente
- Amplificador síncrono (Lock-in Amplifier)
- Analisador de Espectros
- Analisador Lógico
- ...

## Tópicos:

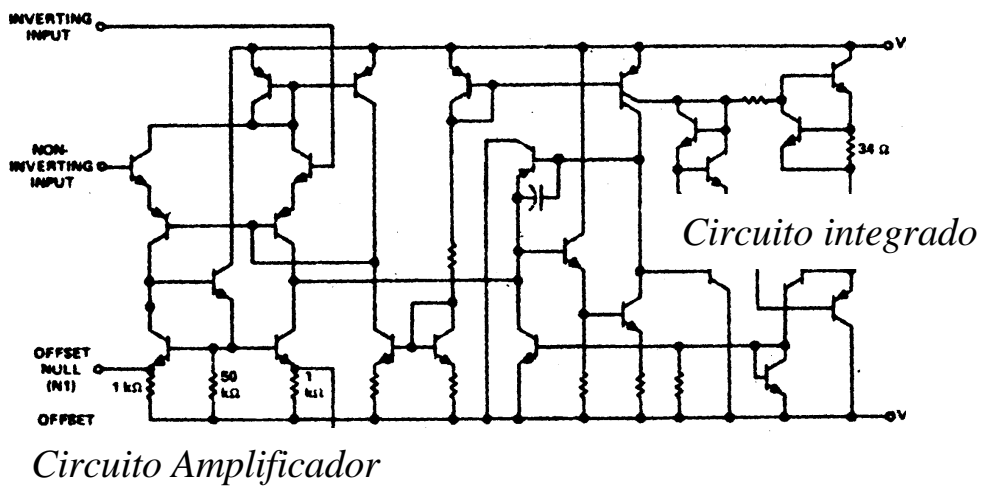
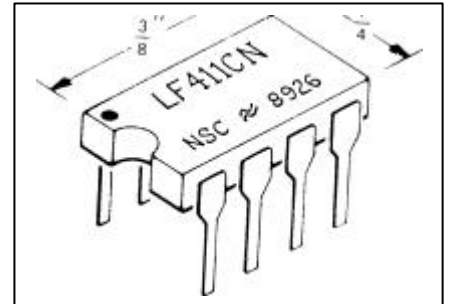
- Exemplo: Medida de resistência a 2 fios e a 4 fios.
- Medidas AC e DC.
- Análise de espectro (Análise de Fourier).
- Banda passante: Filtros Passa Baixa, P. Alta, P. Banda.
- Distorção, Ruído (branco,  $1/f$ , etc.) e interferência.
- Pré-amplificadores, amplificadores, multímetros.
- Circuitos analógicos e digitais.
- Bits, Bytes, Álgebra de Boole e digitalização.
- Conversores analógico/digitais (ADC) e digitais/analógicos (DAC)
- Osciloscópios, Lock-ins e analisadores de espectro.
- Feedback: Controle Proporcional, Integral e Diferencial (PID).

# Sistema de magnetometria:

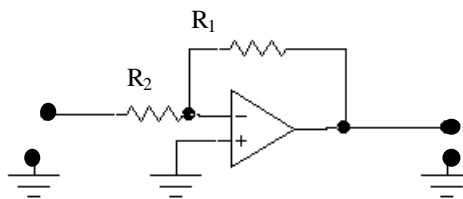


# Circuitos analógicos:

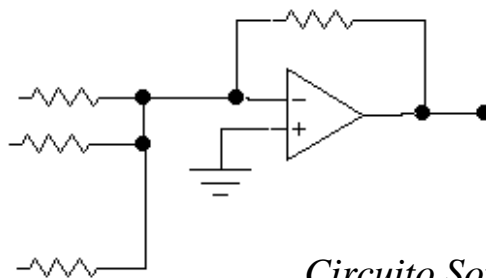
chip



*Circuito Amplificador*

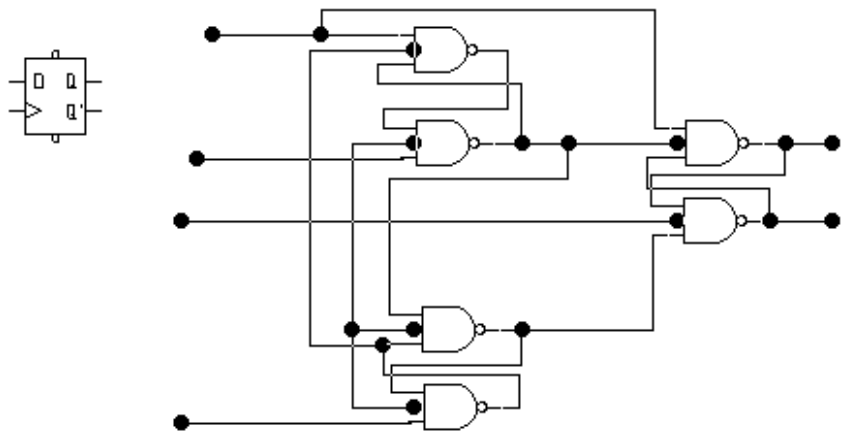


$$\text{ganho} = - R1/R2$$

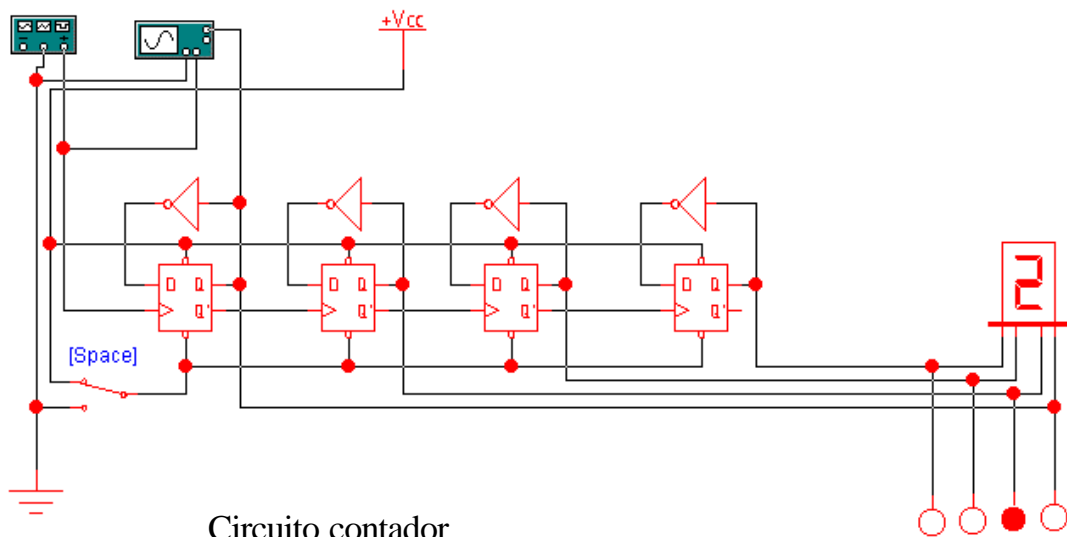


*Circuito Somador*

# Circuitos digitais:



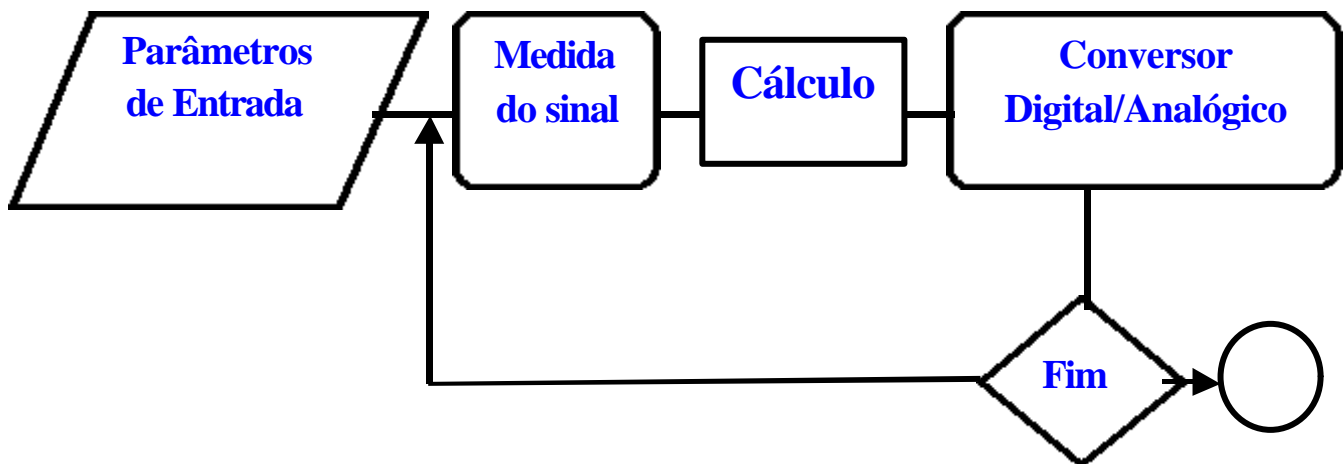
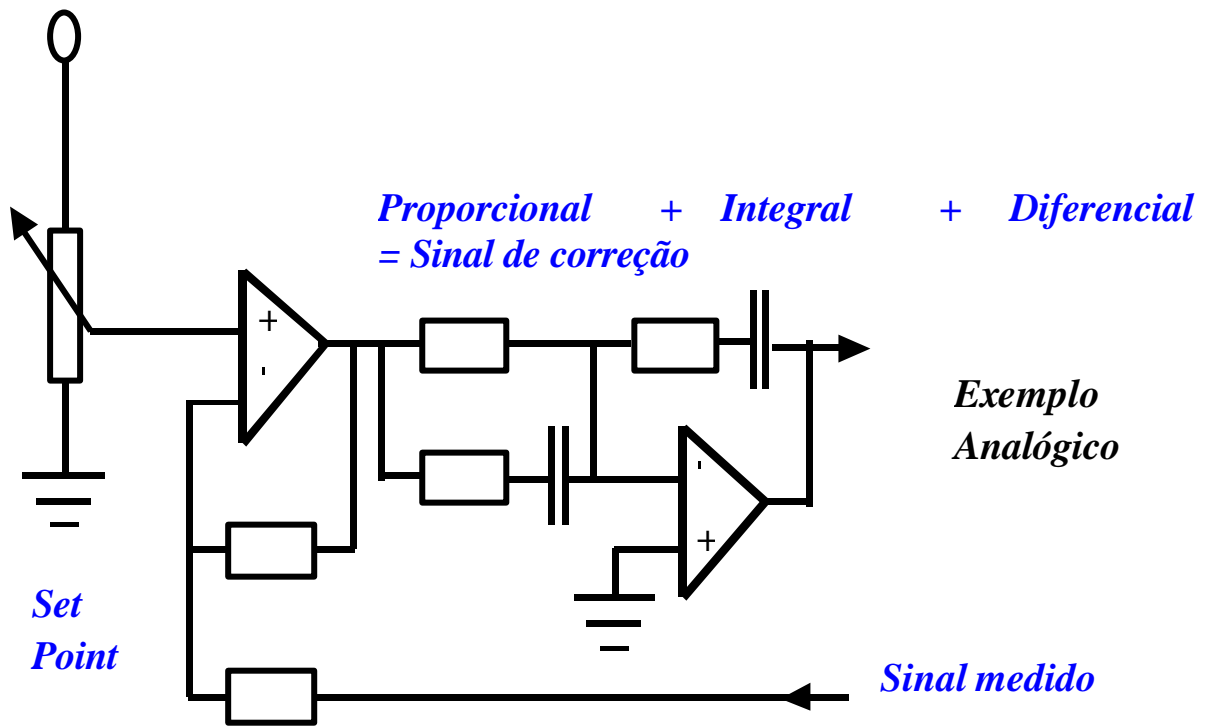
FLIP-FLOP tipo D com preset e clear



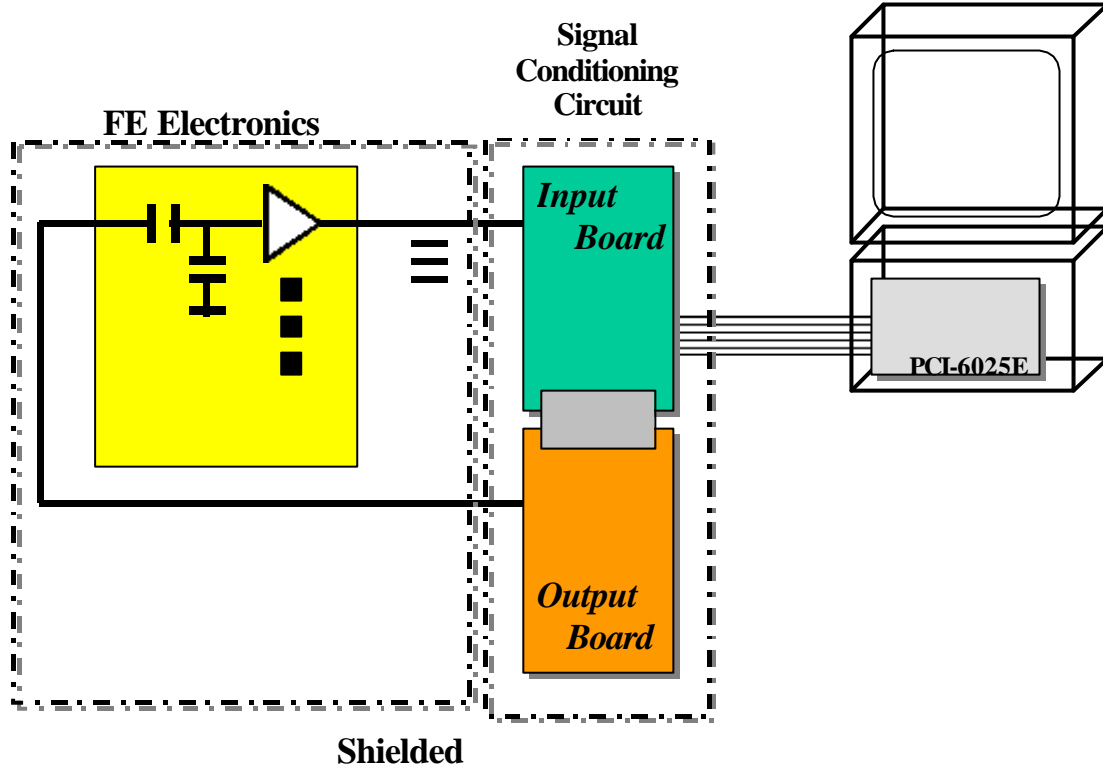
Circuito contador



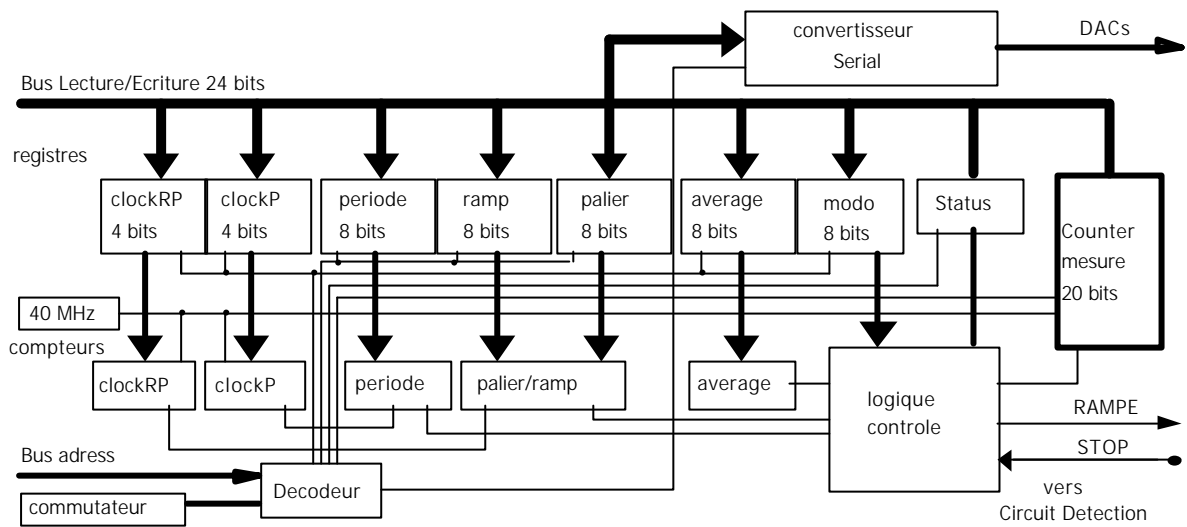
# Controle digital:



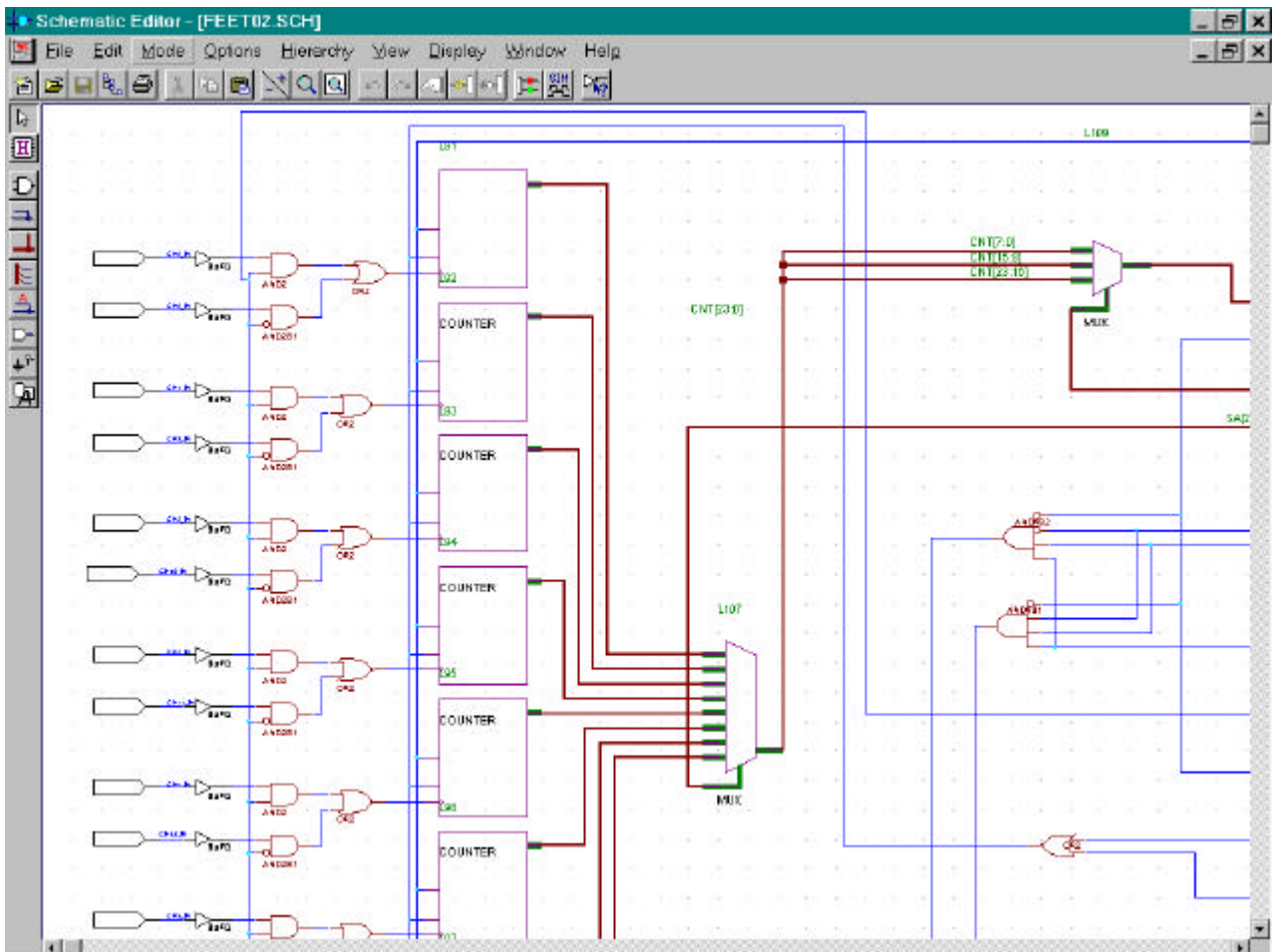
# Exemplo de projeto:



# Concepção lógica:



# Programmable Logic Devices: (PLD, FPGA, etc)

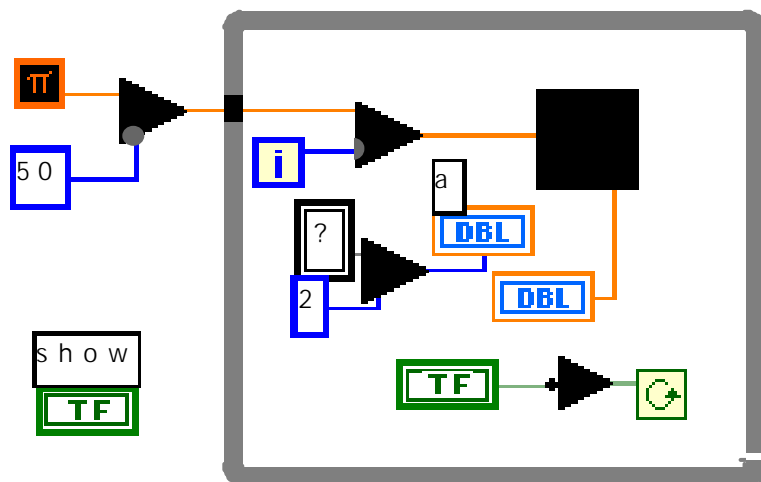
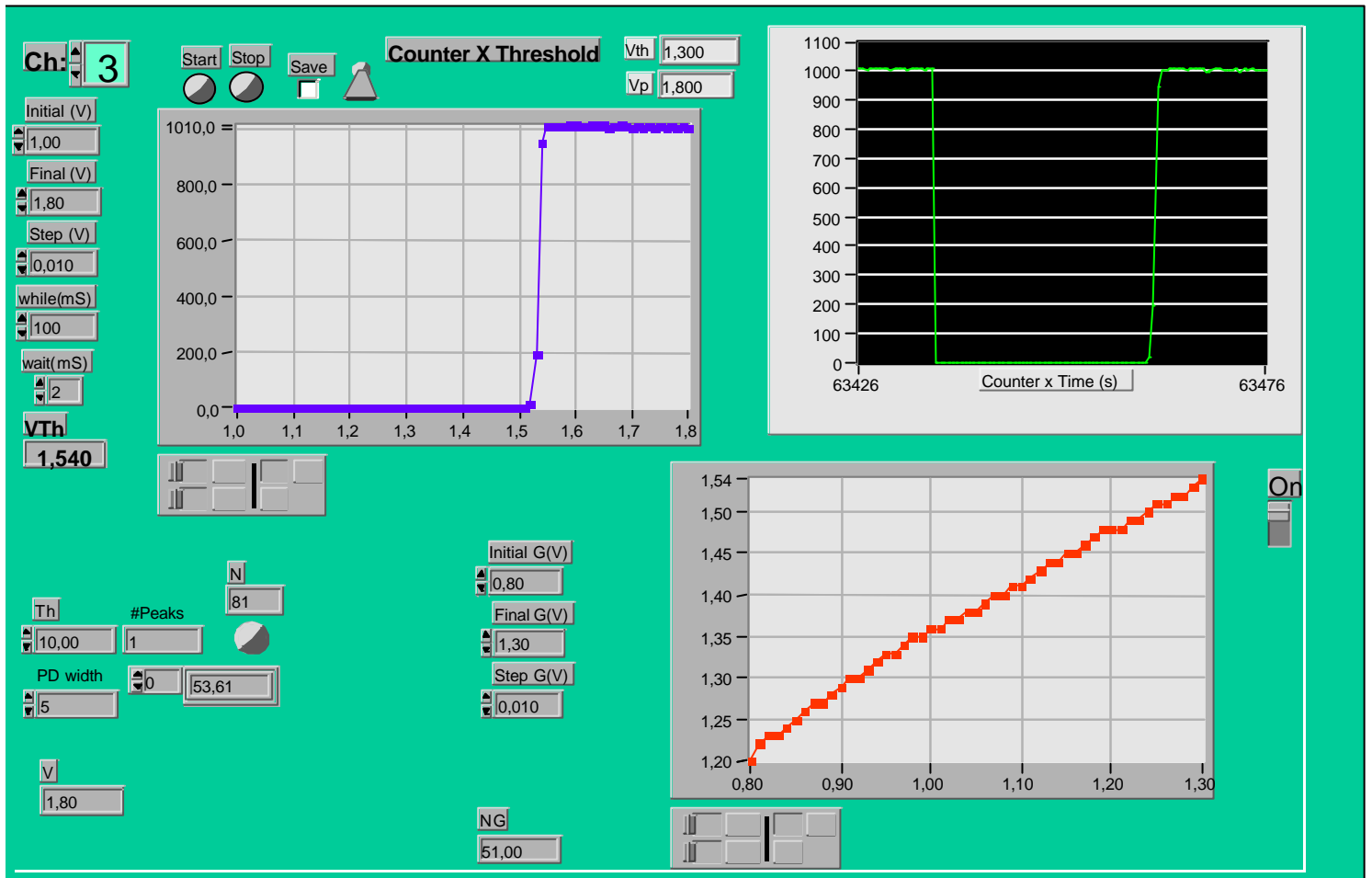


# Programmable Logic Device:

```
TITLE "Squid";
SUBDESIGN mesure
(
    clk_mes,enable,clr_mes           :INPUT;
    mA[7..0],mB[7..0],mC[3..0]
:OUTPUT;
)
VARIABLE
    mes[19..0]                       :DFF;
BEGIN
mes[].clk=clk_mes;
IF (clr_mes) THEN mes[]=0
ELSE
    IF(enable_mes) THEN mes[]=mes[]+1;
    ELSE
        mes[]=mes[];
    END IF;
END IF;
mA[7..0]=mes[7..0];
mB[7..0]=mês[15..8];
mC[3..0]=mês[19..16];

END;
```

# LabView:



## Série de Fourier

### Enunciado da Série Trigonométrica de Fourier:

*"Uma função periódica  $f(t)$  pode ser decomposta em um somatória de senos e cossenos equivalentes à função dada".*

$$f(t) = \frac{a_o}{2} \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos(n\omega_o t) + b_n \cdot \text{sen}(n\omega_o t))$$

onde:

$f(t)$  é a função;

$\frac{a_o}{2}$  é o valor médio de  $f(t)$ ;

$a_n$  e  $b_n$  são os coeficientes da série de Fourier;

$\omega_o$  é a velocidade angular da função  $f(t)$

### Cálculo dos coeficientes de Série de Fourier:

$$a_o = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad \Rightarrow \text{valor médio de } f(t)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_o t) dt$$

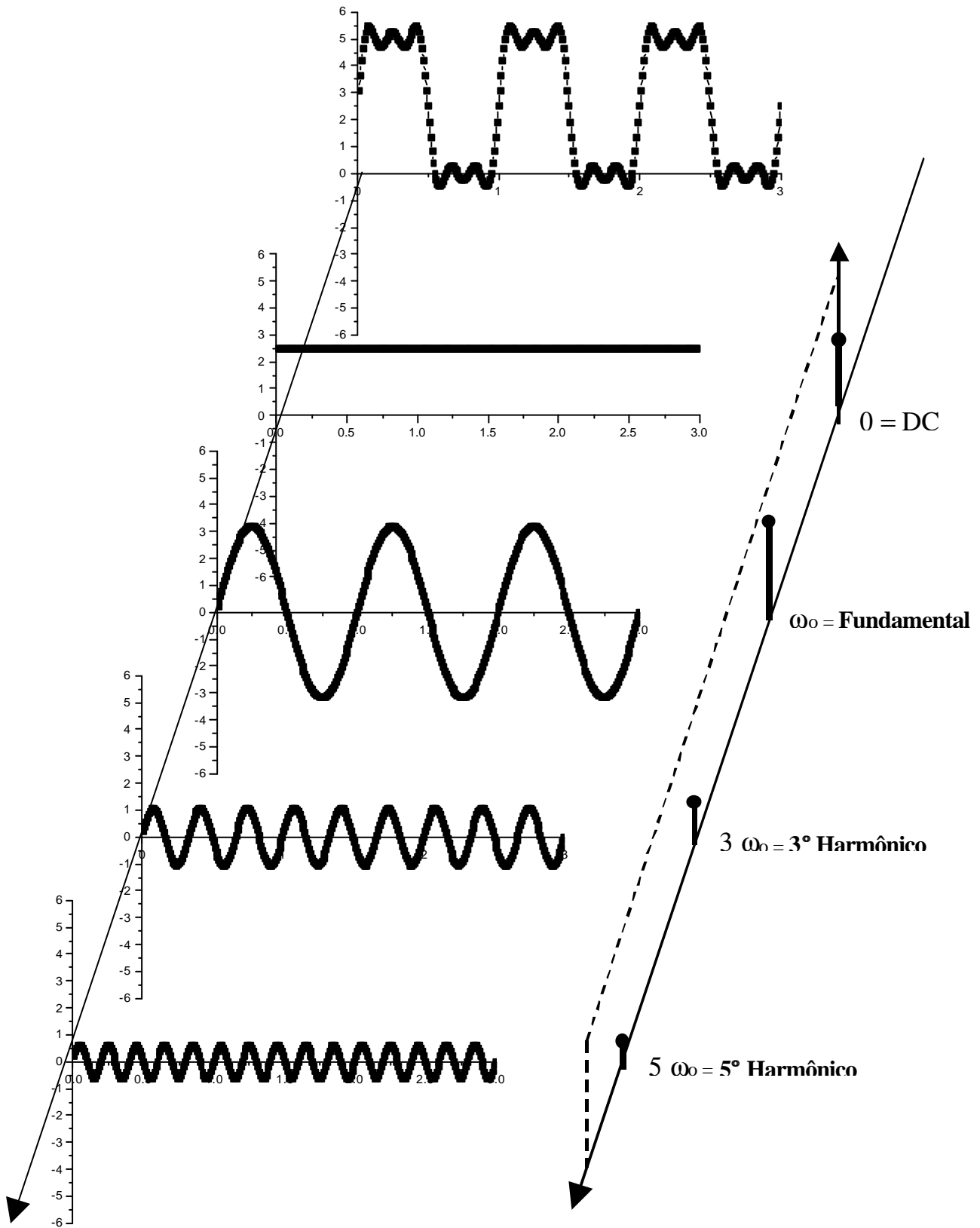
$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{sen}(n\omega_o t) dt$$

### Simplificações:

PAR  $\Rightarrow$  Se  $f(t) = f(-t)$  então todos os termos  $b_n$  serão nulos

IMPAR  $\Rightarrow$  Se  $f(t) = -f(-t)$  então todos os termos  $a_n$  serão nulos

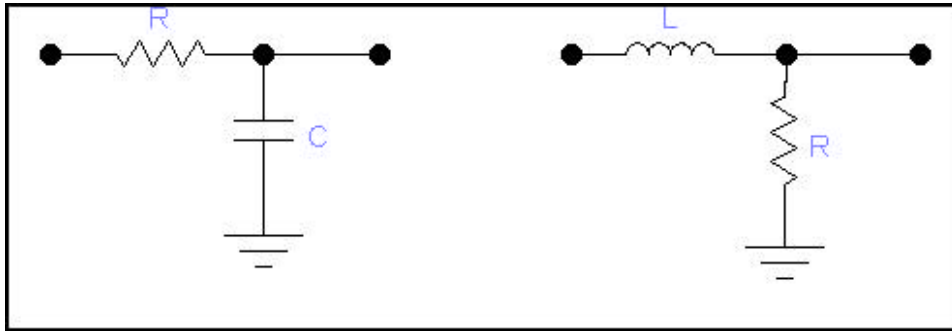
# Análise Espectrográfica



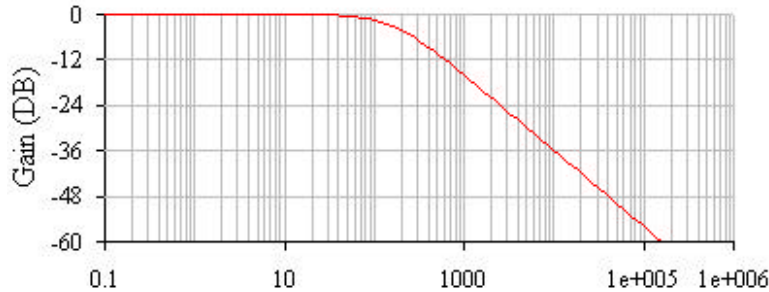


## Filtro Pass Baixa:

$$Z_C = -j/\omega C$$



$$V_{out} = \frac{1}{(1 + \omega^2 R^2 C^2)^{1/2}} V_{in} \quad f = 1/2\pi RC$$



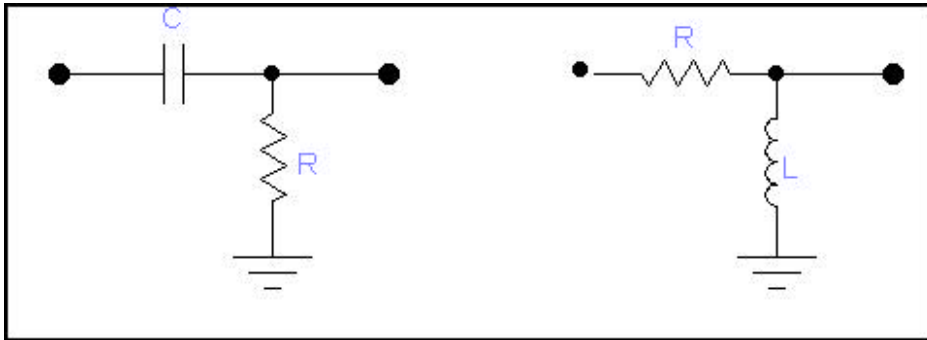
**Decibel :**

$$dB = 20 \log_{10} \frac{A_2}{A_1} \quad dB = 10 \log_{10} \frac{P_2}{P_1}$$

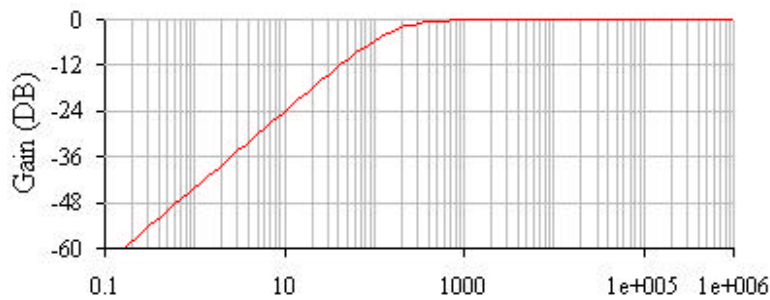
Se  $A_2 = 2.A_1$  como  $\log_{10} 2 = 0.3010$  então  $\Rightarrow +6dB$

Se  $A_2 = 10.A_1$  como  $\log_{10} 10 = 1$  então  $\Rightarrow +20dB$

## Filtro Passa Alta:



$$V_{out} = \frac{R}{\left(R^2 + 1/(\omega C)^2\right)^{1/2}} V_{in} = \frac{2\pi fRC}{\left(1 + (2\pi fRC)^2\right)^{1/2}} V_{in}$$



Atenuação = -20dB / dec ou - 6dB/octave

fase @ -3dB = 45 °

### Representação:

**Função do Tempo:**

$$V_o \cos(\omega t + \phi)$$

⇔

**Numero Complexo**

$$V_o e^{j\phi} = a + jb$$

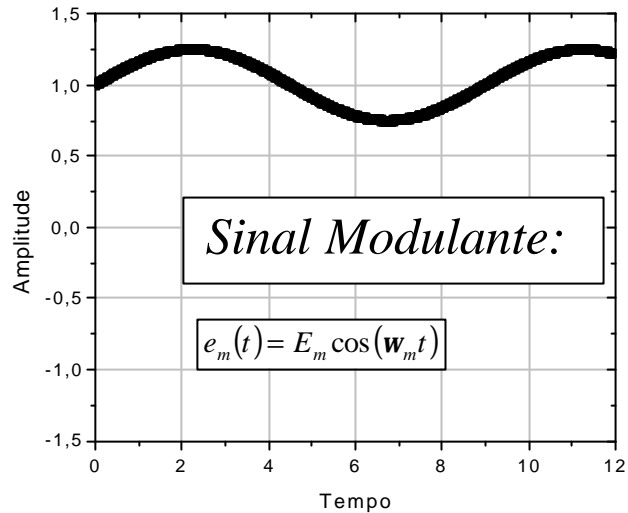
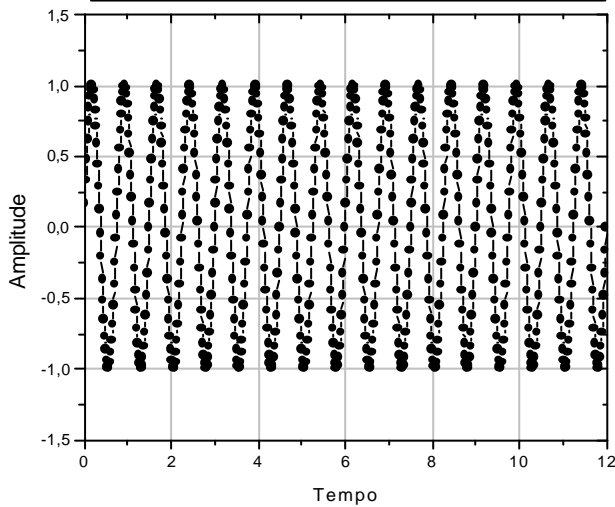
Multiplicar por  $e^{j\omega t}$  e tomar a parte real

# Modulação:

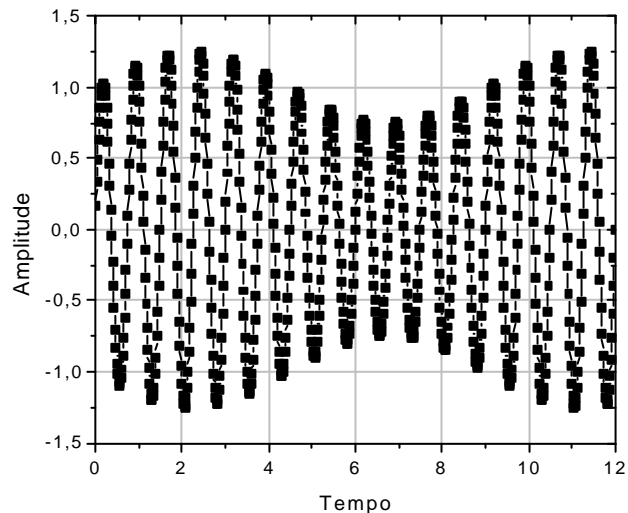
*Alterar uma característica da onda portadora, proporcionalmente ao sinal modulante*

*Sinal da Portadora:*

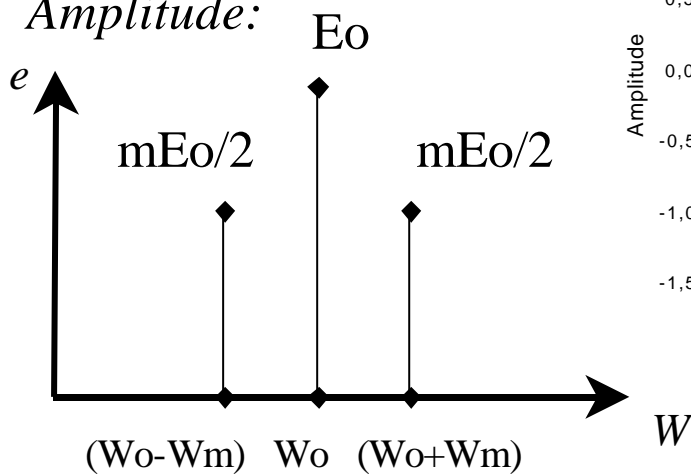
$$e_o(t) = E_o \cos(\omega_o t)$$



*Sinal Modulado:*



*Espectro de Amplitude:*



**Modulação AM**

$m = E_m/E_o = \text{índice de modulação}$

# Modulação AM-DSB:

*Sinal da Portadora:*  $e_o(t) = E_o \cos(\mathbf{w}_o t)$

*Sinal Modulante:*  $e_m(t) = E_m \cos(\mathbf{w}_m t)$

*Sinal Modulado:*

$$e(t) = [E_o + e_m(t)] \cos(\mathbf{w}_o t)$$

$$e(t) = [E_o + E_m \cos(\mathbf{w}_m t)] \cos(\mathbf{w}_o t)$$

$$e(t) = E_o \left[ 1 + \frac{E_o}{E_m} \cos(\mathbf{w}_m t) \right] \cos(\mathbf{w}_o t)$$

como  $\frac{E_o}{E_m} = m$

$$e(t) = E_o [1 + m \cos(\mathbf{w}_m t)] \cos(\mathbf{w}_o t)$$

$$e(t) = E_o \cos(\mathbf{w}_o t) + m E_o \cos(\mathbf{w}_m t) \cos(\mathbf{w}_o t)$$

lembrando que :

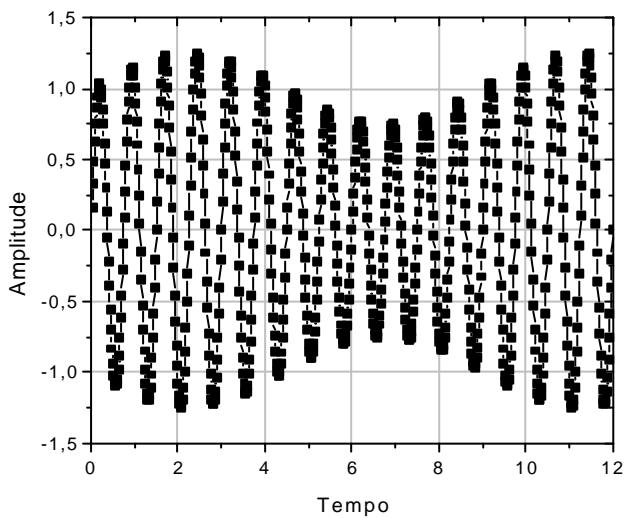
$$\cos A \cos B = \frac{1}{2} \cos(A + B) + \frac{1}{2} \cos(A - B)$$

então

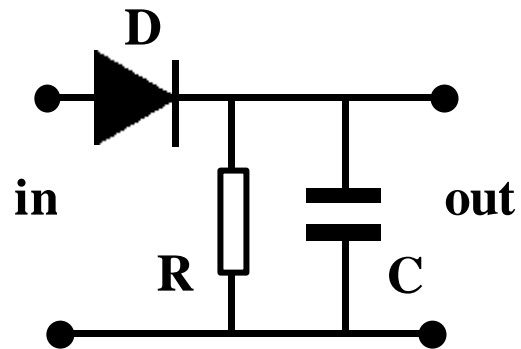
$$e(t) = E_o \cos(\mathbf{w}_o t) + m \frac{E_o}{2} \cos[(\mathbf{w}_m + \mathbf{w}_o)t] + m \frac{E_o}{2} \cos[(\mathbf{w}_m - \mathbf{w}_o)t]$$

# Detetor de Envoltória:

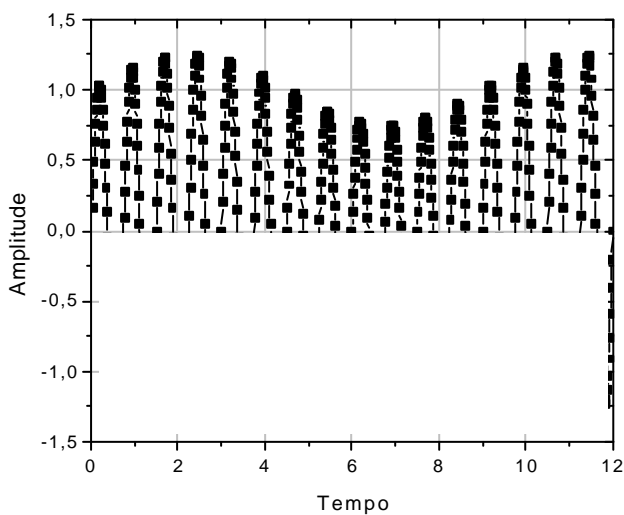
*Sinal Modulado:*



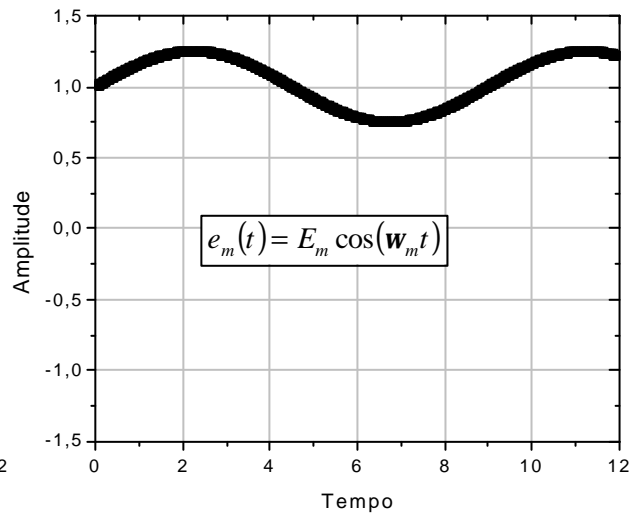
*Circuito Retificador:*



*Sinal Retificado:*



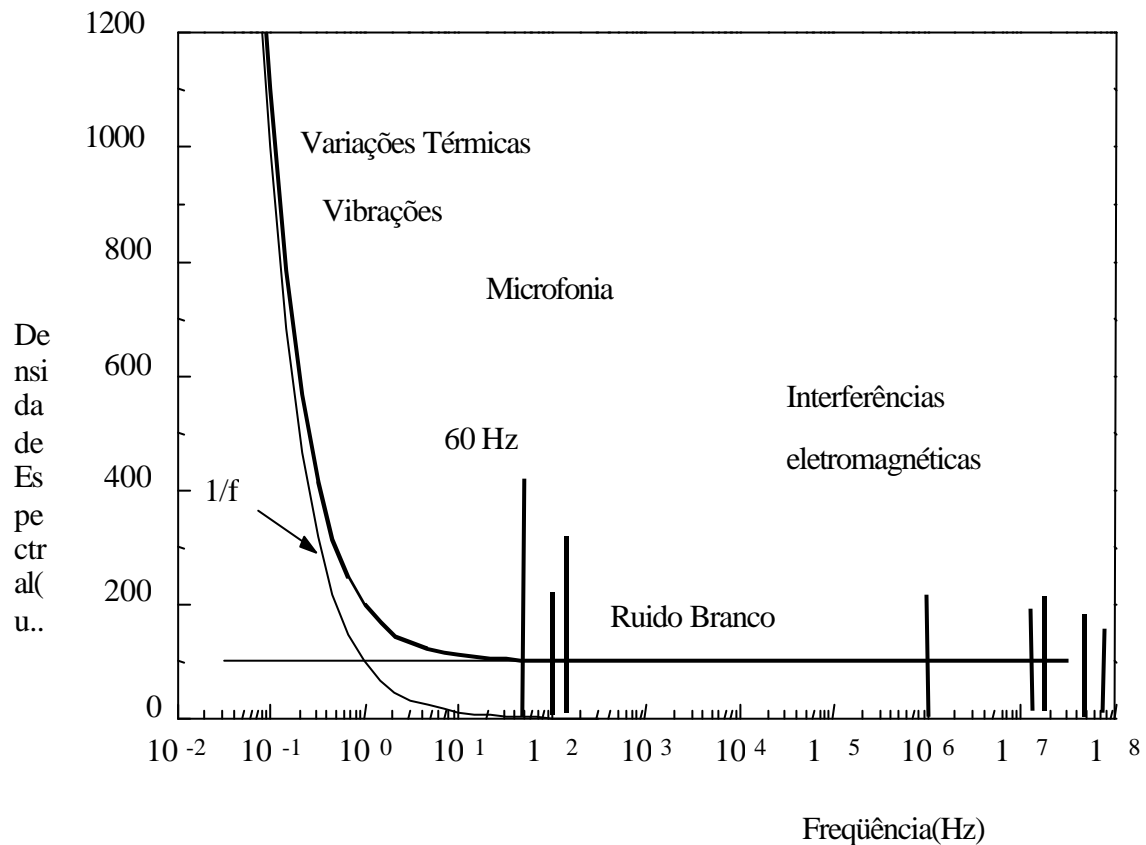
*Ação do Filtro:*



*Sinal Demodulado:*

# Ruído e Interferência:

## *Espectro de Freqüência:*



Ruído Johnson (Branco): fenômeno de flutuação-dissipação

$$V_n(\text{rms}) = (4kTRB)^{1/2}$$

Ruído Shot: discretização da corrente

$$I_n(\text{rms}) = (2qI_{DC}B)^{1/2}$$

Ruído 1/f: amplitude varia com o inverso da

## Análise de erro em medidas Físicas

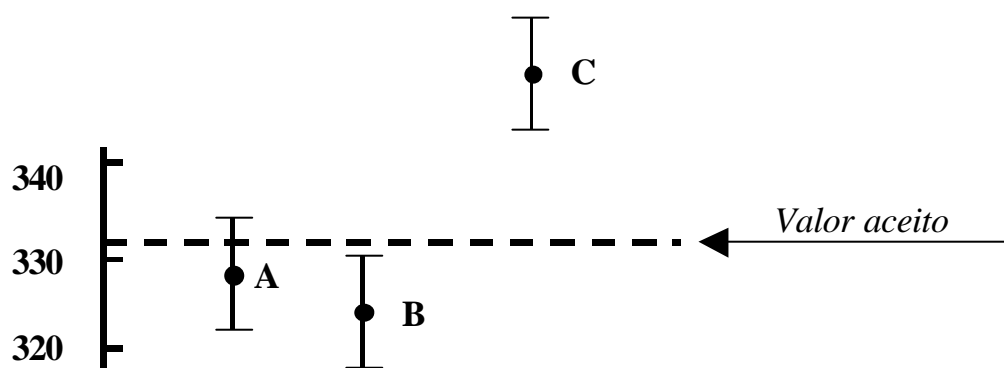
A incerteza de uma medida deve ser apresentada com um algarismo significativo. Ex.:

	Errado:	Correto:
(medida de g)	$9,82 \pm 0,02385 \text{ m/s}^2$	$9,82 \pm 0,02 \text{ m/s}^2$

O ultimo algarismo significativo do resultado deve ser de mesma ordem de grandeza (posição decimal) que a incerteza

incerteza	$\pm 0,02 \text{ m/s}^2$	$\pm 0,1 \text{ m/s}^2$
(medida de g)	$9,82 \pm 0,02 \text{ m/s}^2$	$9,8 \pm 0,1 \text{ m/s}^2$

Critérios de avaliação de valores medidos e valores aceitos:



### Propagação de erro nos cálculos

Erro da soma/subtração = Soma dos erros

Erro de um produto/divisão = Soma dos erros percentuais

Erro de uma potencia = Produto da potência pelo erro percentual

Estimativa de erro de uma experiência de contagem:  
(Número médio de eventos em um período T)

$$\approx n \pm \sqrt{n}$$

## Regras para estimar a propagação das incertezas

**Adições e subtrações: se**

$$q = x + \dots + z - (u + \dots w)$$

**então (se todas as incertezas são independentes e aleatórias)**

$$dq = \sqrt{(dx)^2 + \dots + (dz)^2 + (du)^2 + \dots + (dw)^2}$$

**e**

$$dq \leq dx + \dots + dz + du + \dots dw$$

**Produtos e quocientes: se**

$$q = \frac{x \times \dots \times z}{u \times \dots \times w}$$

**então (se todas as incertezas são independentes e aleatórias)**

$$\frac{dq}{q} = \sqrt{\left(\frac{dx}{x}\right)^2 + \dots + \left(\frac{dz}{z}\right)^2 + \left(\frac{du}{u}\right)^2 + \dots + \left(\frac{dw}{w}\right)^2}$$

**e**

$$\frac{dq}{|q|} \leq \frac{dx}{|x|} + \dots + \frac{dz}{|z|} + \frac{du}{|u|} + \dots + \frac{dw}{|w|}$$

**Potencias: se**

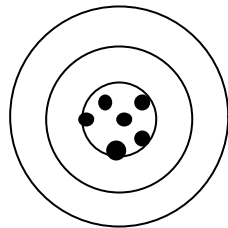
$$q = x^n$$

**então**

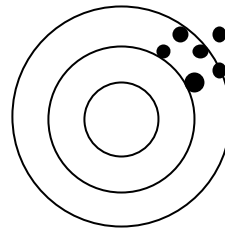
$$\frac{dq}{|q|} = |n| \frac{dx}{|x|}$$



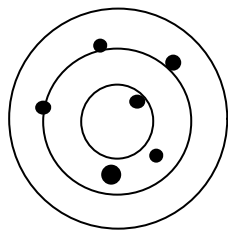
***Incertezas Aleatórias e Incertezas Sistemáticas***



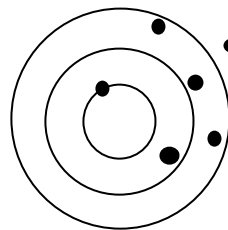
**Fraca componente aleatória**  
**Fraca componente sistemática**



**Fraca componente aleatória**  
**Forte componente sistemática**

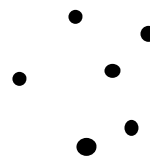
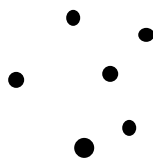


**Forte componente aleatória**  
**Fraca componente sistemática**



**Forte componente aleatória**  
**Forte componente sistemática**

**Situação real:**



## Análise Estatística de Incertezas Aleatórias

**Média: melhor valor estimado de uma medida**

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Ex.: {86,85,84,89,85,89,87,85,82,85} = 85,7

**Desvio padrão: incerteza média, 68% das medidas, dispersão**

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Ex.: = 2,16

**Desvio padrão médio: incerteza do melhor valor estimado**

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_x}{\sqrt{N}} = dx_{aleat}$$

Ex.: = 0,7

**Incerteza total: boa estimativa**

$$dx = \sqrt{(dx_{aleat})^2 + (dx_{sist})^2}$$

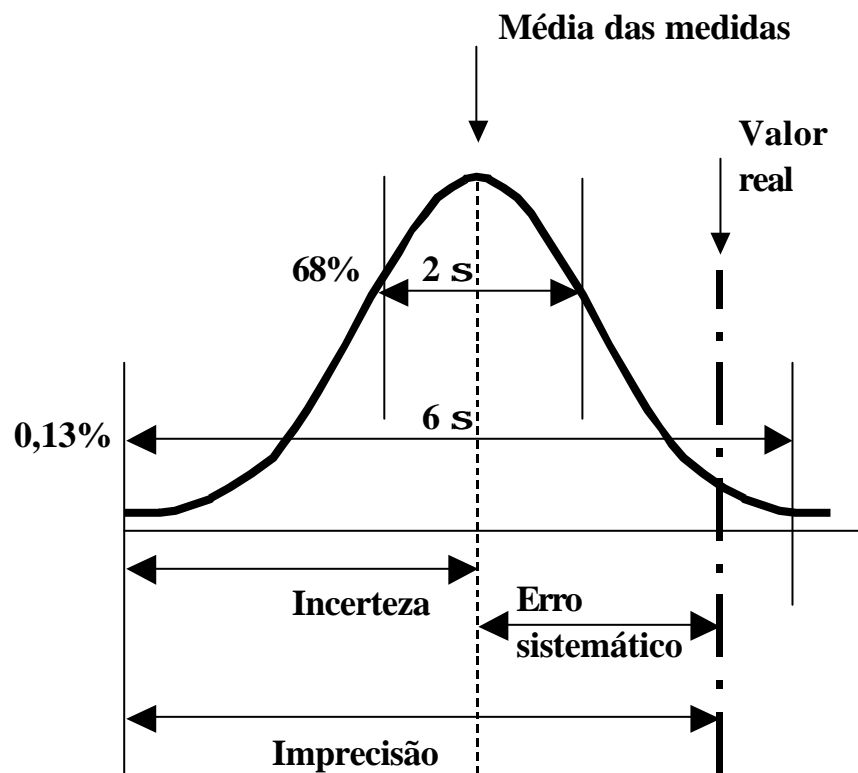
Ex.: = 85,7 ± 0,7

## Distribuição Normal ou Distribuição de Gauss

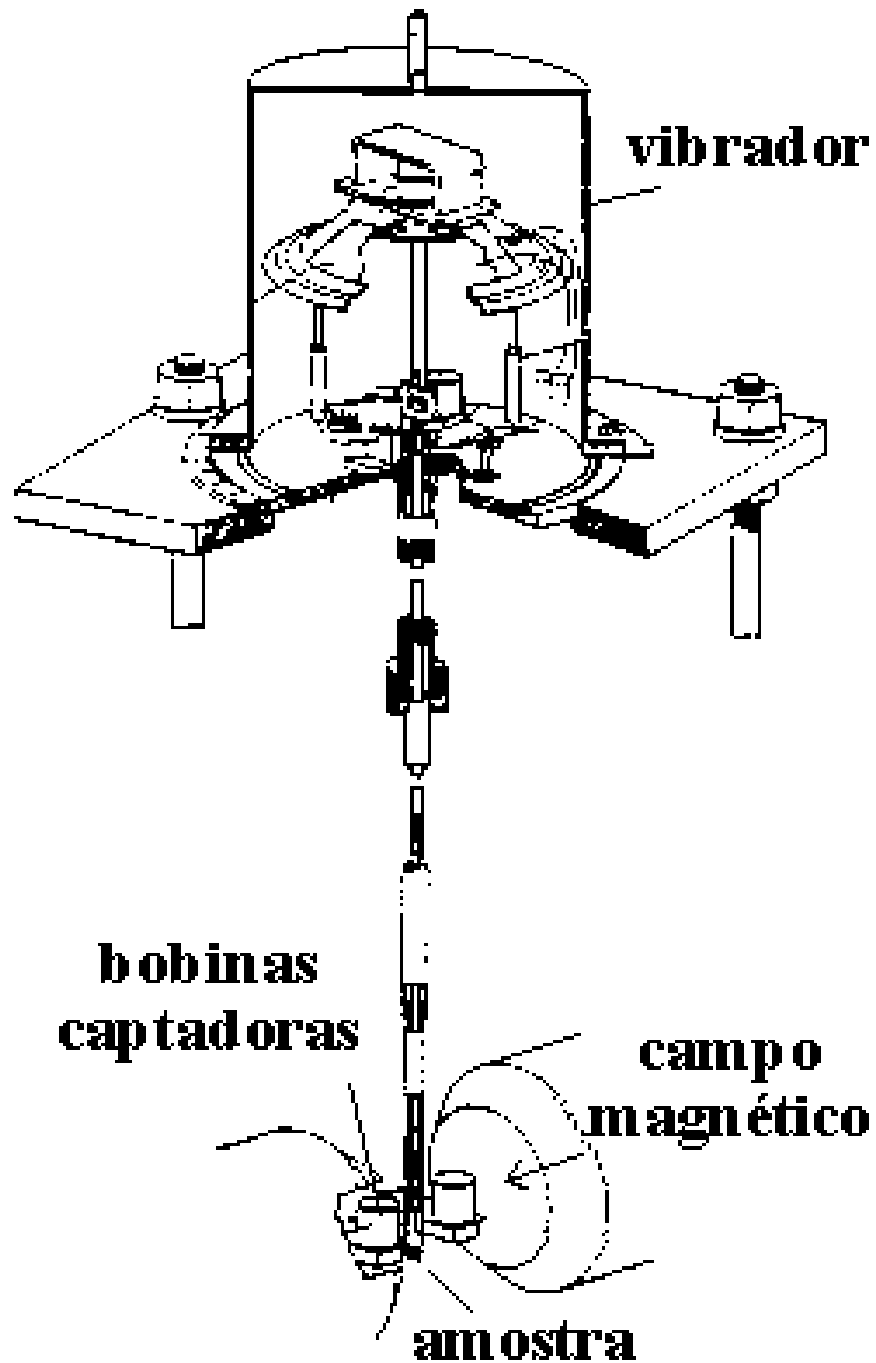
$$G(x) = \frac{1}{s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-X)^2}{2s^2}}$$

**X** = Valor verdadeiro  
= Centro da distribuição  
= valor médio

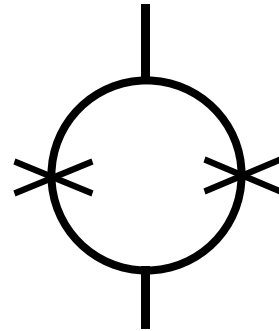
**s** = largura da distribuição  
= desvio padrão



# Magnetometro de Amostra Vibrante:



# *SQUID:*



<i>S</i> uperconductor	=	Supercondutor
<i>QU</i> antum	=	Quântico
<i>I</i> nterference	=	Interferência
<i>D</i> evice	=	Dispositivo

## *Consiste:*

Um anel supercondutor interrompido por uma (SQUID RF) ou duas (SQUID DC) junções.

## *Funcionalmente:*

É um conversor de variação de fluxo magnético em variação de corrente crítica:  $I_c = F(\mathbf{F})$

## *Princípio:*

Baseado no efeito Josephson e na quantização do fluxo em um circuito supercondutor fechado.

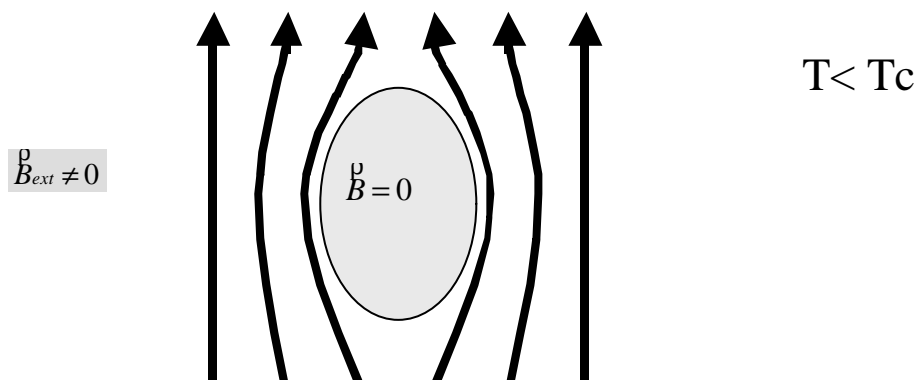
# Resumo:

- Introdução:
  - Supercondutividade
  - Quantização
  - Interferência
  - Junções Josephson
- Princípio de funcionamento
  - Transdutor
- Descrição do Sistema de medidas
  - Magnetometro
  - Criostato
  - Bobina supercondutora
- Descrição da Medida
  - Gradiometro
- Aplicações

# Supercondutividade:

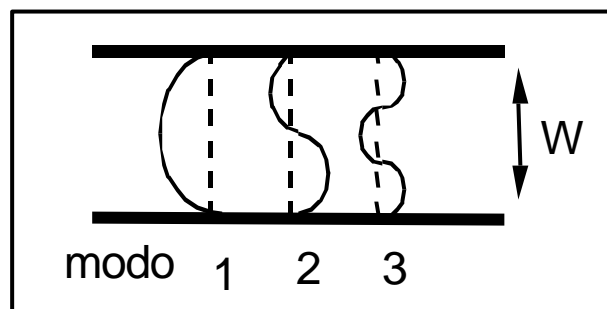
- Resistividade nula p/:  $T < T_c$ ,  $I < I_c$  e  $H < H_c$  (1911, ONNES)
  - Transporte elétrico acima dos valores críticos pode ser descrito pelo modelo de Drude
  - No regime supercondutor (teoria BCS) é baseado em pares de Cooper - fenômeno quântico

- Efeito Meissner: um campo magnético gera uma corrente elétrica que anula o fluxo no seu interior.
- Diamagnético Perfeito



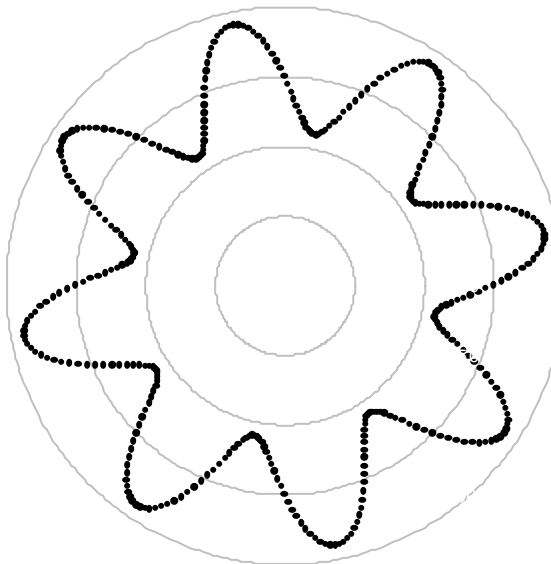
# Quantização:

- Modos próprios de propagação:

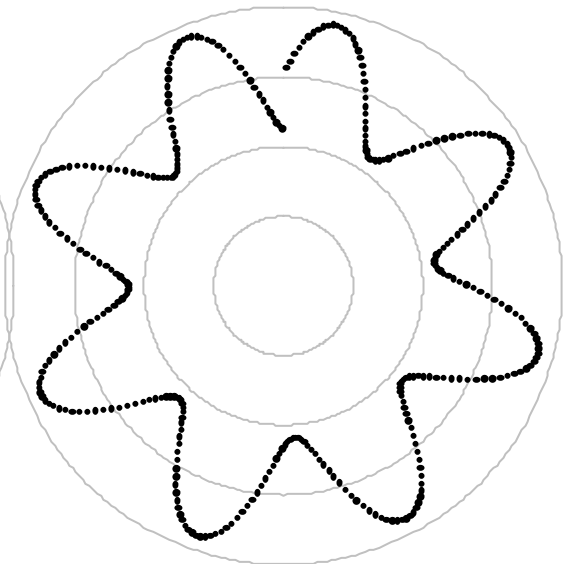


Conceito de  
onda estacionaria

- *permitido:*



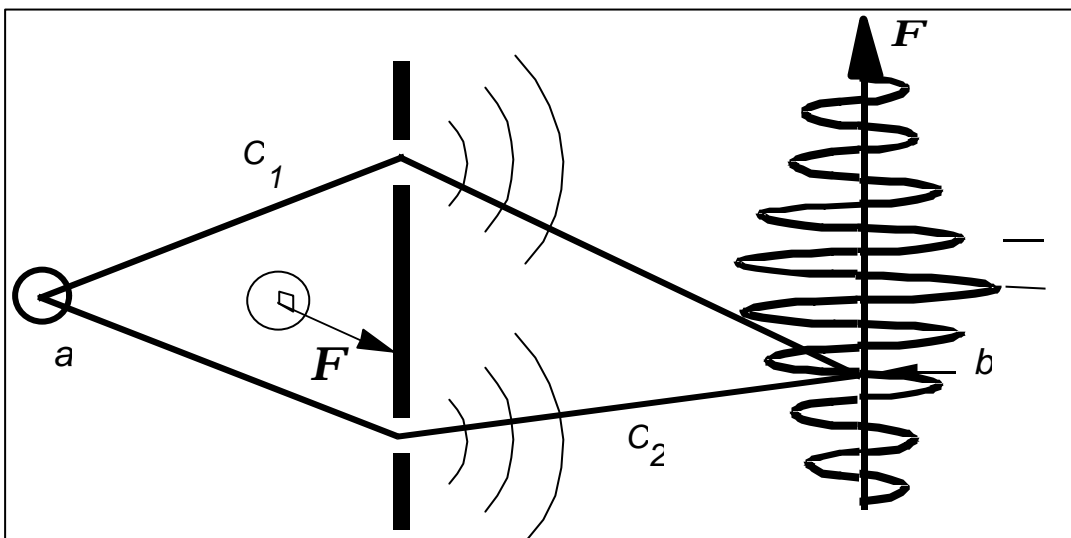
- *não permitido:*



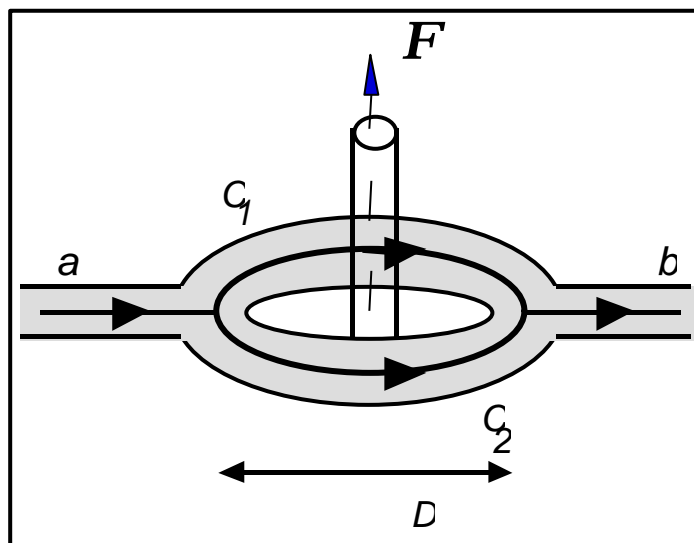


# Interferência:

- Experiência de duas fendas:

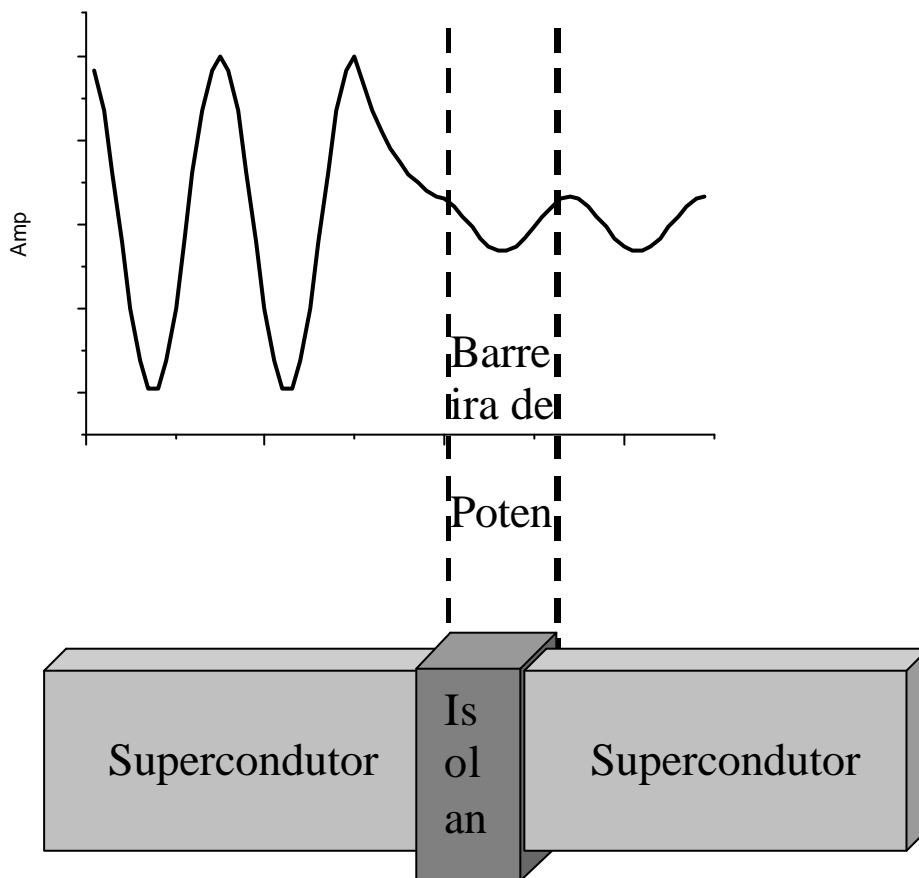


- Analogia:



# Efeito Túnel:

- Junção Josephson:

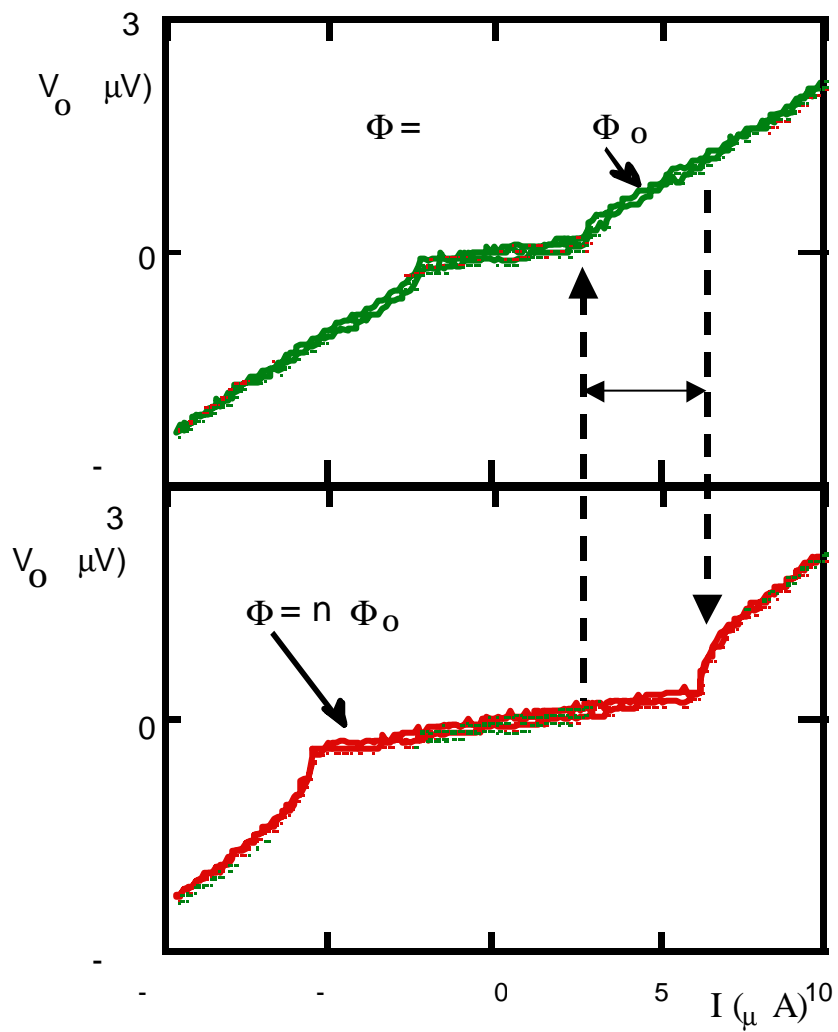


- A passagem, por efeito túnel, de uma corrente de pares de Cooper através de uma fina barreira isolante separando dois supercondutores é descrita pela fórmula:

$$I_j = I_{jc} \sin(q) \quad (1)$$

- onde  $q = (\phi_1 - \phi_2)$  é a diferença de fase das funções de onda dos dois lados da barreira.

# Efeito Josephson:



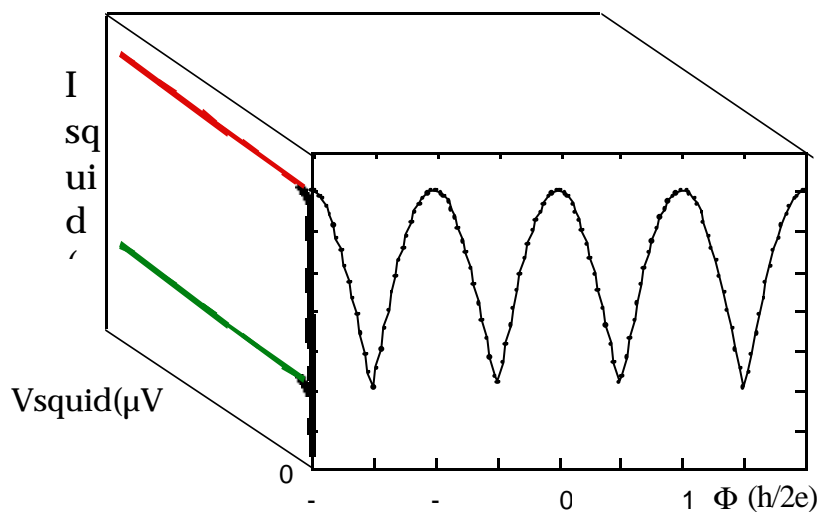
Dados experimentais

# Funcionamento:

- O SQUID apresenta uma corrente critica periódica em função do fluxo magnetico aplicado, com uma periodicidade de  $h/2e$ .

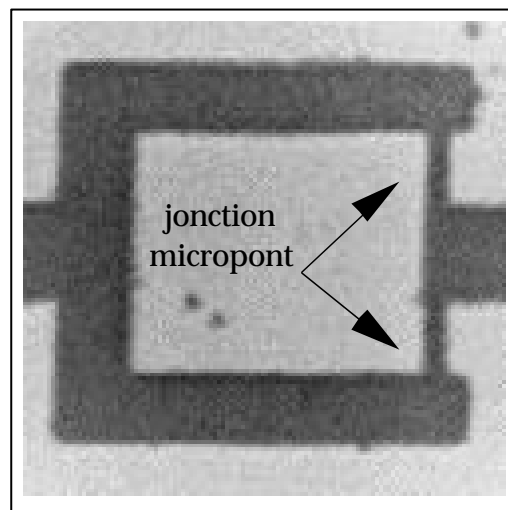
$$f_0 = h/2e = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb.}$$

- A medida desta corrente critica nos permite conhecer o fluxo que atravessa o anel com uma grande resolução.

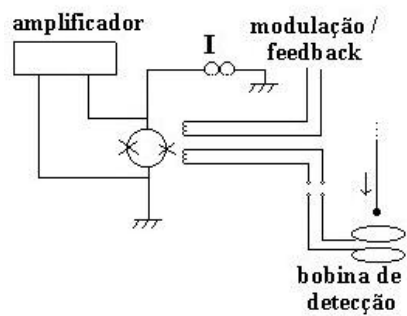


# Dispositivo:

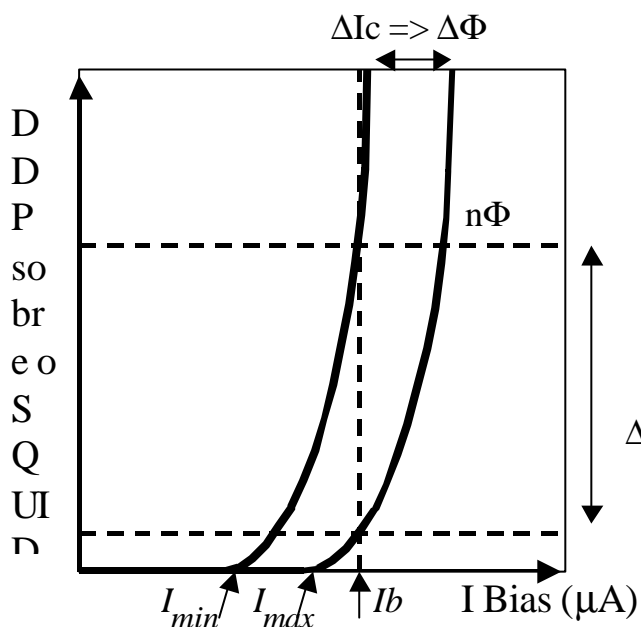
- Foto:



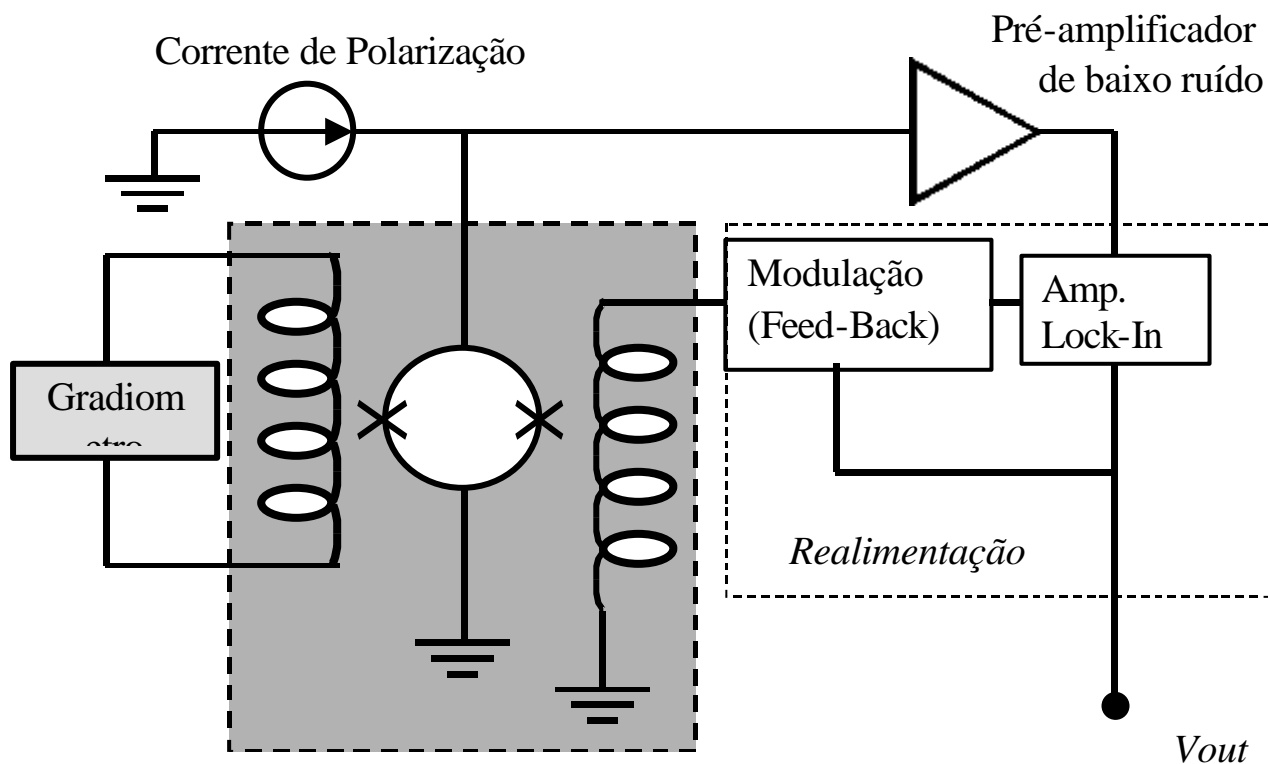
- Sistema:



# Detecção SQUID DC:

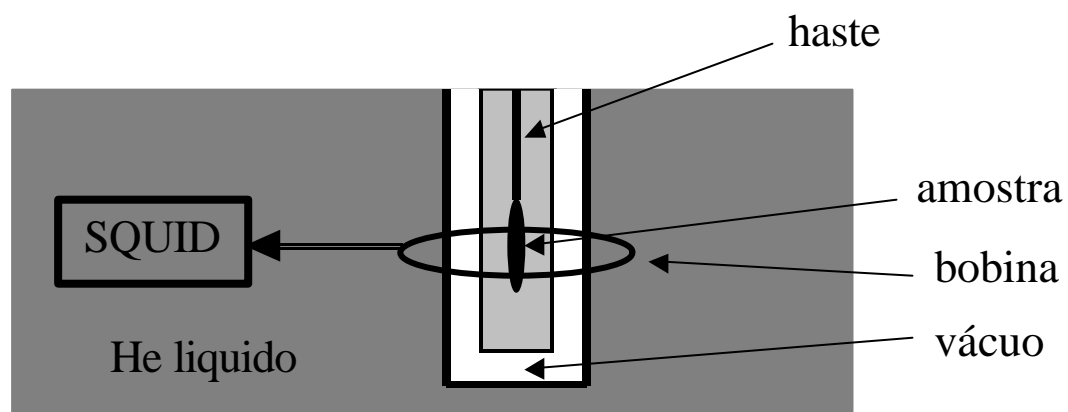


Variação da Corrente Crítica  $I_c$  para dois fluxos aplicados ao SQUID



# Objetivo da medida:

- Magnetização da amostra x Temperatura:
  - Varia a temperatura da amostra.
  - o SQUID funciona a temperatura cte.: 4 K.
  - necessitamos isolar termicamente o SQUID:
    - **Calorímetro (vácuo).**
  - necessitamos acoplar o sinal amostra ao SQUID:
    - **Transformador de fluxo.**



- Magnetização da amostra x Campo:
  - Varia o campo aplicado: de vários Teslas.
  - necessitamos blindar magneticamente o SQUID.
  - necessitamos diminuir o efeito do campo aplicado sobre o transformador de fluxo:
    - **Gradiômetro.**

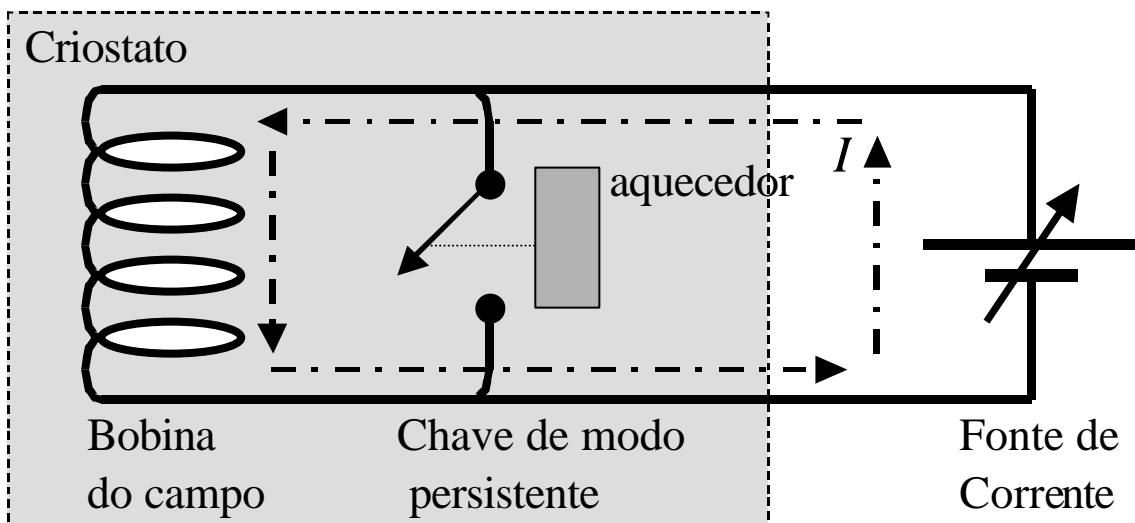
# Descrição do equipamento:

- Sistema de medida
- Quantum Design:
  - Modelo MPMS-XL5
- Variação de Temperatura:
  - de 1.9 a 400K
  - 30 minutos p/ variação de 5K a 300K
- Consumo de Hélio:
  - 56 litros e 5.5 litros/dia
- Variação de Campo Magnético:
  - de +/- 5.0 Tesla
- Sensibilidade:
  - de  $10^{-7}$  EMU a 2 Tesla

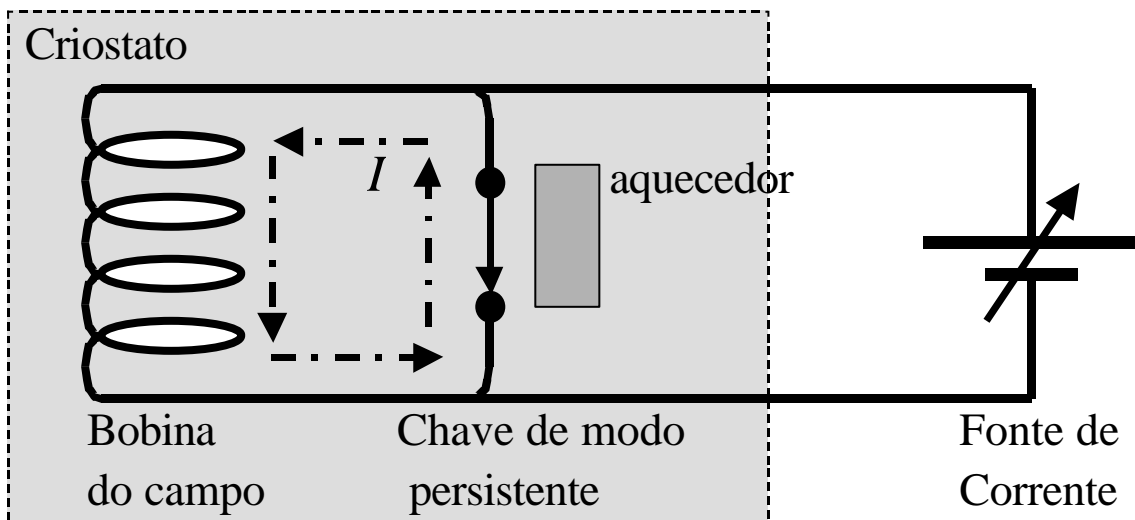


# Bobina de campo:

- Eletroimã supercondutor:

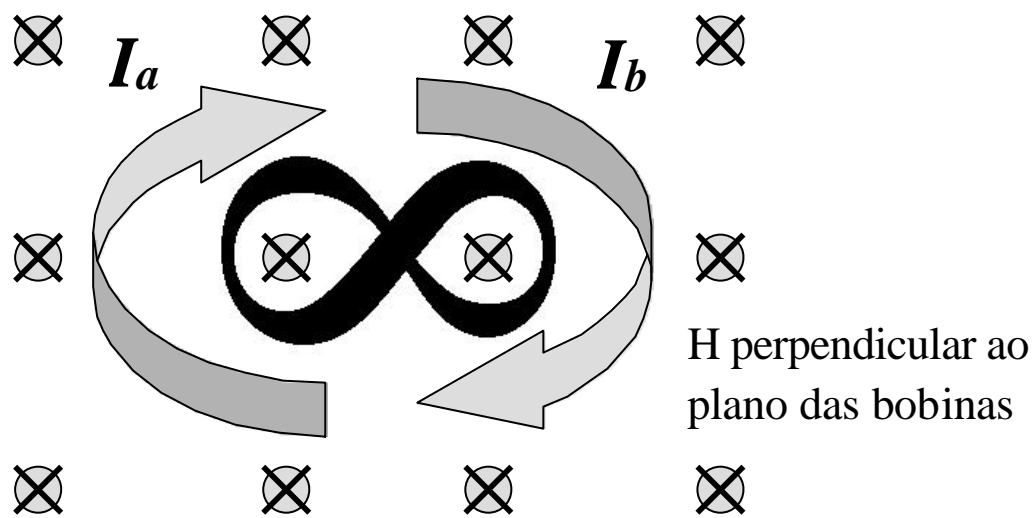


- Modo persistente:

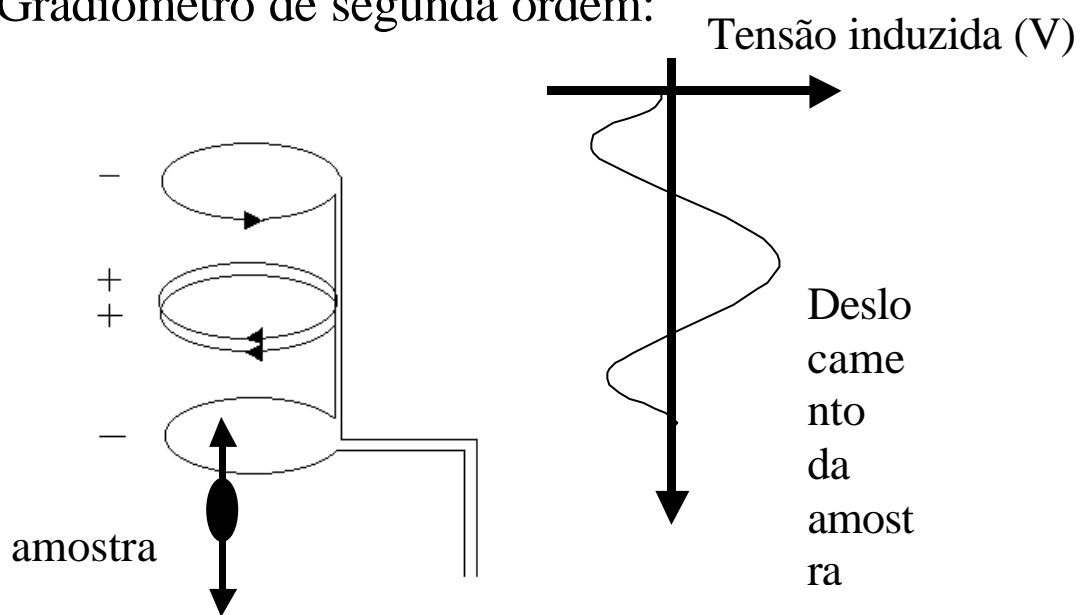


# Gradiometro:

- Gradiometro de primeira ordem :



- Gradiometro de segunda ordem:



## Descrição da medida:

- Fixa um parâmetro
  - Campo aplicado e/ou uma temperatura
- Espera parâmetro estabilizar:
  - Varia posição da amostra: Scan
    - induzindo sinal no SQUID
    - Digitaliza sinal induzido
      - Momento magnético da amostra
    - Acumula (Average) sinal induzido
  - Acumula (Average) Scan
  - Concluído Scan: ajusta dados medidos à curva característica do gradiometro (Fit)
- Incrementa campo ou temperatura
- Verifica se final de medida
- Retorna ao primeiro passo



