

# Indução Magnética

14

? AQUI!!

## • Objetivos

→ Verificar a existência de indução magnética e a sua dependência com:

- o nº de espiras;
- a área,  $S$ , da seção de reta;
- o ângulo,  $\theta$ , entre os eixos da bobina de prova;
- intensidade da corrente,  $i_0$ , que alimenta o solenoide;
- frequência do sinal,  $\omega_0$ .

→ Determinar experimentalmente o valor da permeabilidade magnética no núcleo,  $\mu_0$ .

→ Familiarizar com componentes eletrônicos, como por exemplo, bobinas.

marca, origem, especificações relevantes!

## • Material:

→ Multímetros (ampémetro e voltmetro) incompleto

→ Osciloscópio

→ Solenoide

→ Bobinas de prova (pequenos solenoides)

→ Gerador de sinais

→ Amplificador de Sinais

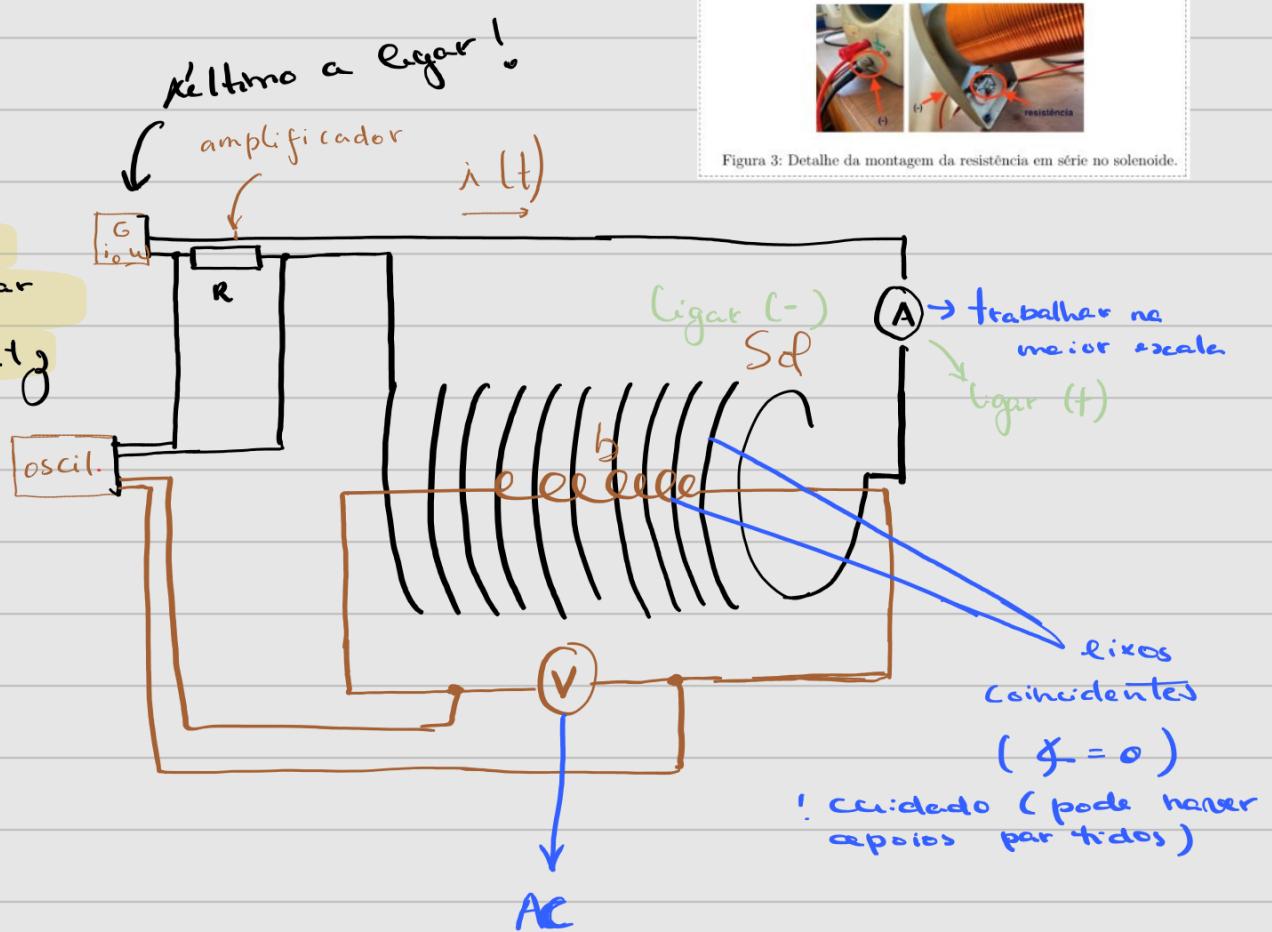
## • Execução Experimental

### Montagem

$f \bar{n}$  pode

ultrapassar

os  $2000 \text{ Hz}$



O n°

de espiras

$N = 364$

mas sim 361

contou - ar  
ou regui informa -  
disponibiliza - da  
(onde?)



↳ Montagem experimental feita na aula

Gerador



Amplificador



Figura 2: Ligação do gerador ao amplificador.



Figura 3: Detalhe da montagem da resistência em série no solenoide.

## • Procedimento

- Montar o esquema representado ✓
- Verificar que a diferença de fase entre os dois senais se mantém, a  $\frac{\pi}{2}$  ✓  
(é independente de qualquer um dos parâmetros em estudo, porquê?)

→ Para o solenoide :  $L = 0.75\text{cm}$   $N = 3 \times 4 = 361$

bobinas :

Bobina	Diâmetro (mm)	n (número de espiras)
1	41,00	300
2	33,00	300
3	26,00	300
4	41,00	200
5	41,00	100
6	26,00	100
7	41,00	442
8	41,00	542

a bobina 6 é a que permite variar  $\theta$

→ Verificar a relação :

$$V_{E_0} = \mu_0 \frac{N n S \cos \theta W i_0}{L} \quad (1)$$

- $V_{E_0}$  amplitude do sinal de tensão induzido na bobina de prova ( $V_s$ , volt);
- $i_0$  : amplitude do sinal de corrente ( $i = i_0 \sin(\omega t)$ ) que percorre o solenoide (A, ampere);
- $\mu_0$  : permeabilidade magnética no vácuo ( $4\pi \times 10^{-7} \text{ H}\text{m}^{-1}$ );
- $N$  : nº de espiras do solenoide;
- $n$  : nº de espiras da bobina de prova;
- $S$  : área da secção recta da bobina de prova ( $S = \pi D^2/4$ ), dâmetro
- $\theta$  : ângulo entre os eixos do solenoide e da bobina de prova;
- $W$  : frequência angular do sinal do gerador
- $L$  : comprimento do solenoide

→ Para fazer o estudo da dependência de  $V_{E_0}$

Mutar cada parâmetro individualmente e sequencialmente de acordo com a seguinte prioridade :

$\mu(L) ?$   
medir ?,

(manter a corrente const.  
no gerador)

\* 1)  $V_{E_0}$  em função de  $\omega$  (bobina 1)

2)  $V_{E_0}$  em função de  $i_0$  ( " )

3)  $V_{E_0}$  em função de  $n$  ( bobinas 1, 4, 5, 7 e 8 )

4)  $V_{E_0}$  em função de  $S$  ( bobinas 1, 2 e 3 )

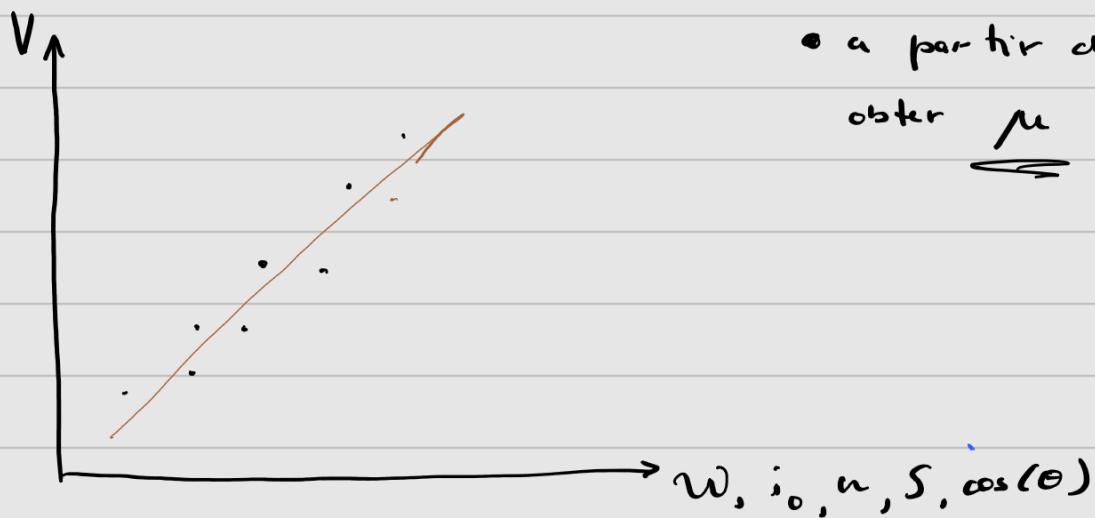
5)  $V_{E_0}$  em função de  $\cos \theta$  ( bobina 6 )

→ Representar graficamente os resultados obtidos ✓

→ Determinar  $\mu_0$  em cada caso ✓ ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$ )

\* A variação de  $i_0$  tem de ser menor ou igual a 0,1

• Previsão de Gráficos a obter



• a partir do declive  
obter  $\underline{\mu}$

• Resultados Experimentais //

Para o estudo de  $V_{E_0}$  em função de  $\omega$  e de  $i_0$   
foi usado o mesmo solenoide e a mesma bobina (1).

Solenóide

$$L = 0,75 \text{ cm}$$

$$N = 361$$

$$S = \frac{0,041^2}{4} \times \pi = 0,00132 \text{ m}^2$$

Bobina

$$n = 30 \text{ } \circ$$

$$\theta = 0 \text{ } \circ$$

ML Sat Tr ex  
n gráficos

1/ Determinação da permeabilidade magnética através da variação da frequência angular do sinal ( $\omega$ )

Foram registados os valores de  $V_{RMS}$  e de  $\omega$  mantendo-se um valor de corrente fixo ( $i_0 = (0.402 \pm 0.1)A$ )

Isto consegue-se através de um registo na amplitude do sinal no gerador para ver que há medida que se aumenta o valor da frequência naturalmente também aumenta o valor de  $\omega$ .

Os valores de  $V_{RMS}$  foram mediados no multímetro e comparados com os detetados no osciloscópio ao longo da experiência e verifica-se que estes eram concordantes.

Foram registados os seguintes valores:

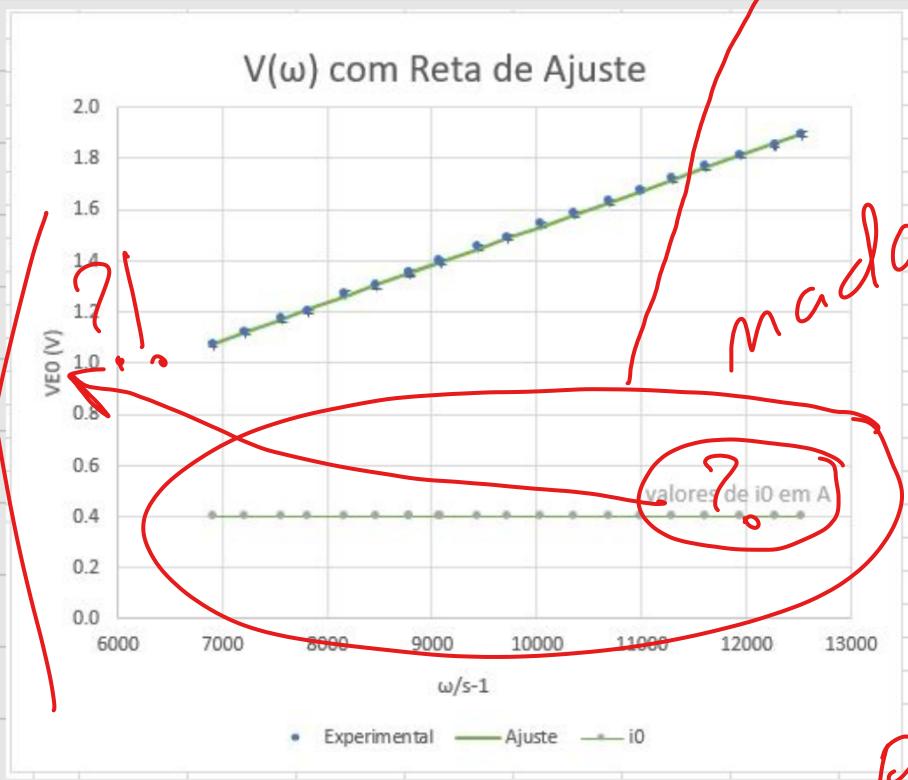
f	$i_0$ (A)	$V$ (RMS)(V)
1995	0.401	1.3387
1954	0.401	1.309
1902	0.403	1.2822
1848	0.403	1.25
1799	0.403	1.2165
1749	0.403	1.1853
1703	0.402	1.1533
1650	0.402	1.1188
1599	0.402	1.0895
1549	0.402	1.0534
1502	0.403	1.0273
1445	0.402	0.9879
1399	0.401	0.955
1448	0.401	0.9864
1400	0.402	0.9573
1348	0.401	0.9198
1300	0.401	0.8982
1244	0.401	0.8492
1205	0.402	0.8276
1150	0.403	0.7921
1100	0.403	0.7589

Pretende-se elaborar um gráfico  $(\omega, V_{E_0})$  pelo que se recorre à relação  $V_{t_0} = \sqrt{2} V_{RMS}$

Para obter  $\omega$  foi multiplicado aos valores de  $f$ . ?

$$\mu(i_0) = ?$$
$$\mu(\sqrt{RMS}) = ?$$

Foi obtido o seguinte gráfico:



No gráfico de  $V(\omega)$  foram ~~incluídos~~ <sup>com</sup> os valores  $i_0$  para  $i_0(\omega)$ !

No gráfico de  $V(\omega)$  foram ~~incluídos~~ <sup>com</sup> os valores  $i_0$  para  $i_0(\omega)$ !

correspondentes aos desvios  $-2s_y$  e  $2s_y$  mas estes são muito próximos (encontram-se pelos pontos experimentais)

Também foi incluída a reta com os valores registrados para  $i_0$ .



Os resíduos aparecem distribuídos aleatoriamente não sendo observadas grandes tendências. Os pontos estão todos contidos no intervalo  $[-2s_y, 2s_y]$  pelo que não há pontos desviados a analisar. Assim considera-se este um bom ajuste, o que também é concordante com o valor de  $r^2 \approx 1$ .

Retirar / rejeitar, o resíduo que dá a má menor calha grafico

Má menor calha grafico

MATRIZ RETA AJUSTE

$m$	0.0001462	0.067	$b$
$u(m)$	0.0000006	0.006	$u(b)$
$r^2$	0.9996	0.005	$s_y$

Procedemos, então, ao cálculo da permeabilidade magnética.

Pela relação a reificar temos

$$V_{E_0} = \mu_0 \frac{N n S \cos \theta W i_0}{L}$$

$$\Rightarrow \mu_0 = \frac{\frac{V_{E_0}}{W}}{m} \frac{L}{N n S \cos \theta i_0}$$

para  $i_0$  foi gerada uma  
média dos valores  
e o resultado  
multiplicado por  $\sqrt{2}$   
 $\sqrt{2} \times 0.402$

O valor de  $\mu_0$  experimental é obtido através do  
declarar:

SEMPRE que possível usar a forma relativa na propagação  
de incertezas /

$$\mu_0 - \text{exp} = 1,349 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2$$

$$\mu(\mu_0) = \sqrt{\left(\frac{\partial \mu_0}{\partial m}\right)^2 \mu(m)^2 + \left(\frac{\partial \mu_0}{\partial i_0}\right)^2 \mu(i_0)^2} \quad (\text{sabe porquê?})$$

$$\mu(\mu_0) = \sqrt{\left(\frac{L}{N n S \cos \theta i_0}\right)^2 \mu(m)^2 + \left(\frac{m L}{N n S \cos \theta i_0^2}\right)^2 \mu(i_0)^2}$$

Para  $\mu(i_0)$  foi considerado o desvio máximo:

$$X(i_0) = 0.402$$

$$\delta(i_0) = 0.402 - 0.403 = 0.001 \text{ A}$$

$$\therefore \mu(\mu_0) = 5 \times 10^{-9} \text{ N/A}^2 \quad \text{inc. rel} = 0.37$$

$$\mu_0 = (1349 \pm 5) \times 10^{-9} \text{ N/A}^2$$

$$\% \mu(\mu_0) = ?$$

Para este resultado temos um erro:

$$E_r (\%) = \frac{|1,257 - 1.349|}{1,257} \times 100 = 7,3\%$$

Valor teórico obtido como  $4\pi \times 10^{-7}$

## 21 Determinação da permeabilidade magnética através da variação da amplitude do sinal, $i_0$

Foi escolhido um valor fixo da frequência ( $f = 100 \text{ Hz}$ )

Foram registados os valores de  $V_{\text{RMS}}$  lidos no voltímetro e comparados com os valores lidos no osciloscópio. ao longo da experiência, mais puma vez, constatou-se que estes valores eram concordantes.

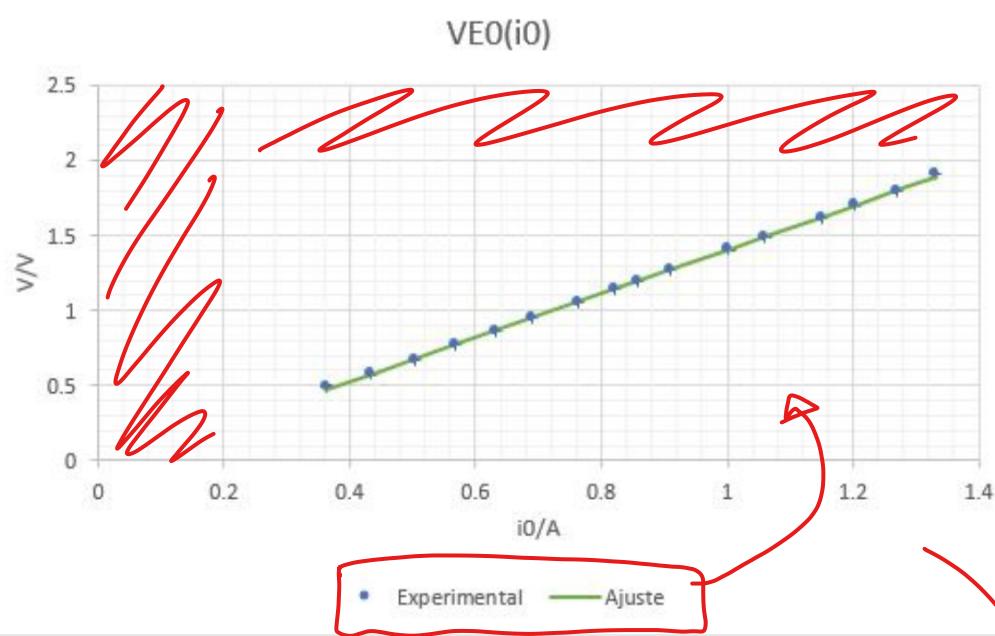
Obtiveram-se os seguintes dados para  $i_0$  (RMS) e  $V_{\text{RMS}}$ :

$i_0$ (A)	$V$ (RMS) (V)
0.256	0.3503
0.307	0.4066
0.356	0.4771
0.402	0.5441
0.446	0.6098
0.488	0.6716
0.539	0.7461
0.581	0.8088
0.607	0.8471
0.644	0.9009
0.709	0.9946
0.75	1.0542
0.814	1.1468
0.851	1.2024
0.897	1.2716
0.942	1.3524

Uma vez mais foi feita uma conexão de  $V_{\text{RMS}}$  em  $\sqrt{E_0}$  e logo imediatamente se obtiveram os valores de  $i_0$  por  $\sqrt{2}$ .  
(de modo análogo à primeira parte).

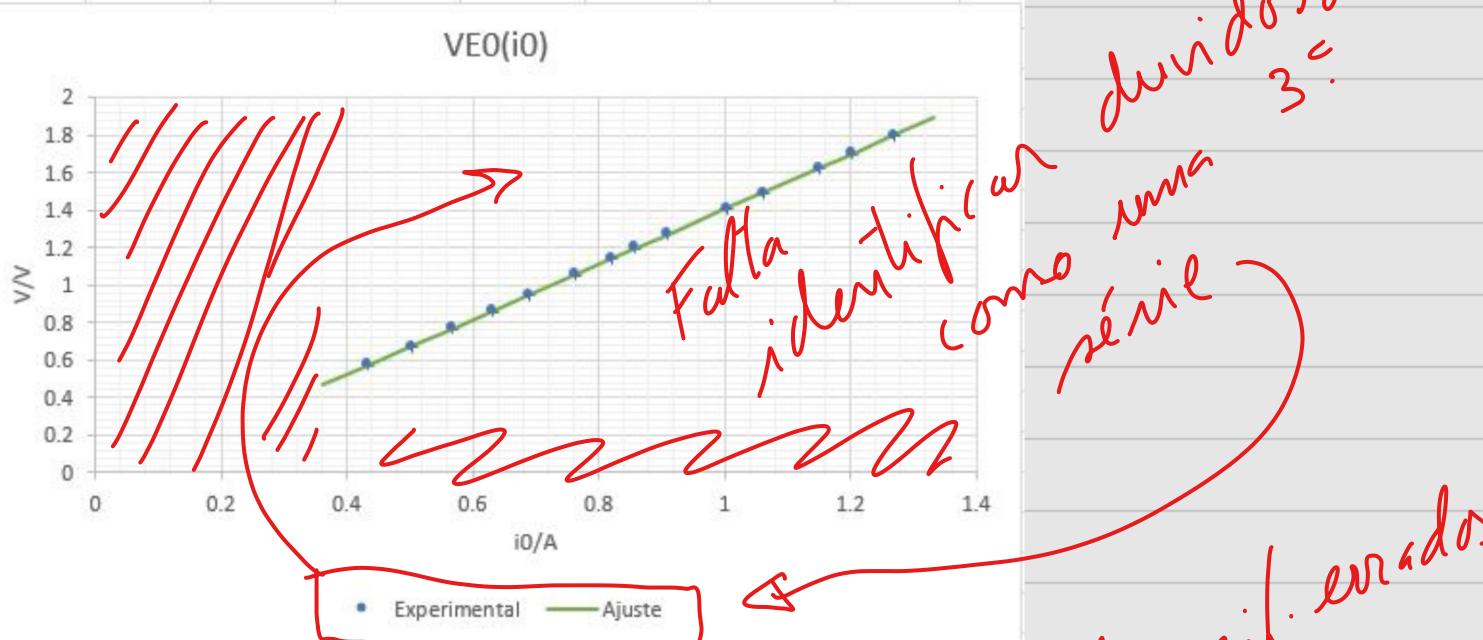
→ inteiros dos valores?

Assim foi elaborado o gráfico ( $i_0$ ,  $V_{E0}$ ):



São reisímos dois pontos desviados que destoam muito dos restantes. Não consideramos estes pontos e repetimos a análise.

OBS: "desconsiderar" é faltar ao respeito (ai, ai, o vocabulário!...)



$m$		1.464589885	-0.06138432	$b$
$u(m)$		0.001617052	0.001431734	$u(b)$
$r^2$		0.999985372	0.001548148	$s_y$

{alg. signif. errados  
faltam as barras



faltam dos exp.  
dados

Desta vez os pontos encontram-se todos contidos no intervalo  $[-2s_y, 2s_y]$  e apresentam uma distribuição aleatória. Assim considera-se a segunda regressão linear um bom ajuste como podemos prever pelo  $t^2 \approx 1$ .

Sendo assim proceder-se ao cálculo da permeabilidade magnética com os dados do segundo ajuste.

$$\mu_0 = \frac{\frac{N E_0}{i_0}}{m} \cdot \frac{L}{N n S \cos(\theta) \omega}$$

foi mantida constante  
( $f = 1000 \text{ Hz}$ )

$$\omega = 2\pi \times 1000 \text{ rad s}^{-1}$$

A partir do cálculo calculemos  $\mu_0$  experimental:

$$\mu_0 - \text{exp} = 1,223 \times 10^{-6}$$

$$\mu(\mu_0 - \text{exp}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \mu_0}{\partial m}\right)^2 \mu(m)^2 + \left(\frac{\partial \mu_0}{\partial f}\right)^2 \mu(f)^2}$$

$$\Rightarrow \mu(\mu_0 - \text{exp}) = \sqrt{\left(\frac{L}{N n S \cos(\theta) \omega}\right)^2 \mu(m)^2 + \left(\frac{m L}{N n S \cos(\theta) 2\pi(f)^2}\right)^2 \mu(f)^2}$$

$$\mu(f) = \pm 1 \text{ Hz}$$

$$\mu(\mu_0 - \text{exp}) = 2 \times 10^{-9} \text{ N/A}^2 \quad \text{inc rel} = 0,16$$

$$\therefore \mu_0 - \text{exp} = (1223 \pm 2) \times 10^{-9} \text{ N/A}^2$$

$\rightarrow \text{lem \% ?}$

E para este resultado temos um erro:

$$\text{Er (\%)} = \frac{|1,223 - 1,257|}{1,257} \times 100 = 2,7\%$$

• Resultados finais

identifique o parâmetro que varia!

$$\mu_0 \quad (N/A^2)$$

valor  $1,349 \times 10^{-9}$   
incerteza  $5 \times 10^{-9}$

% Erro 7,3 % Inc 0,37

? (1ª Parte)

$$\mu_0 \quad (N/A^2)$$

? (2ª parte)

Valor  $1,223 \times 10^{-9}$   
incerteza  $2 \times 10^{-9}$

% Erro 7,3 % Inc 0,16

Conclusão:

→ Como não tivemos tempo não foram realizados os pontos 4 e 5 propostos nos objetivos. Foram recolhidos e analisados dados para os pontos 1 e 2 (obrigatórios), tendo sido cumpridos os objetivos descritos nestas partes.

→ Foi calculada a permeabilidade magnética mantendo-se  $i$  constante e variando-se a frequência e obtido um bom ajuste com o qual se determinou o valor de  $\mu_0 : \mu_0 = (1349 \pm 5) \times 10^{-9} N/A^2$  e um erro de 7,3%.

→ O erro obtido nesta parte é maior do que o recomendável e alguns dos fatores que podem ter levado a tal são:  
 Não precisei de suposições de tipo quantitativo.  
 • posição da bobina no interior do solenóide (a posição deve ser mantida e o alinhamento é correto)  
 → Não verificou-se

→ Foi também calculada a permeabilidade mantendo-se  $f$  constante variando  $i_0$ , obtendo-se  $\mu_0 = (1223 \pm 2) \times 10^{-9} N/A^2$

→ Foram detetados dois pontos suspeitos no 1º ajuste que muito possivelmente se devem a algum erro que não conseguimos detectar.

com % inc?

→ Apesar de terem sido retirados esses pontos e ~~existir~~ o valor de  $i_0$ , obtém-se um erro de 2,7%. Este erro é consideravelmente menor que o obtido na 1ª parte muito provavelmente porque é mais fácil fixar o valor de  $f$  do que o de  $i_0$ .

→ Um fator a melhorar na execução desta experiência teria sido registar os valores neutralizados no osciloscópio e comparar os valores de  $\mu_0$  obtidos pelos dois processos.

→ Assim, o balanço desta atividade é muito positivo.

Faltou a quantificação (linearidade) → log | log !

do expoente amônia log | log !

lava não se diz o que não foi feito !

conclusão → não apresenta o resultado da resecação de factos feitos !

NOTA: Apenas este é que foi concluído