

Laura dopes, TP6, G7

Trabalho cuidadoso

85

ObjetivosOpções de análise foram  
descritas mas o

→ Análise do funcionamento de uma válvula preenchida com gás xenon a baixa pressão

Critérios para  $R^2$  deve

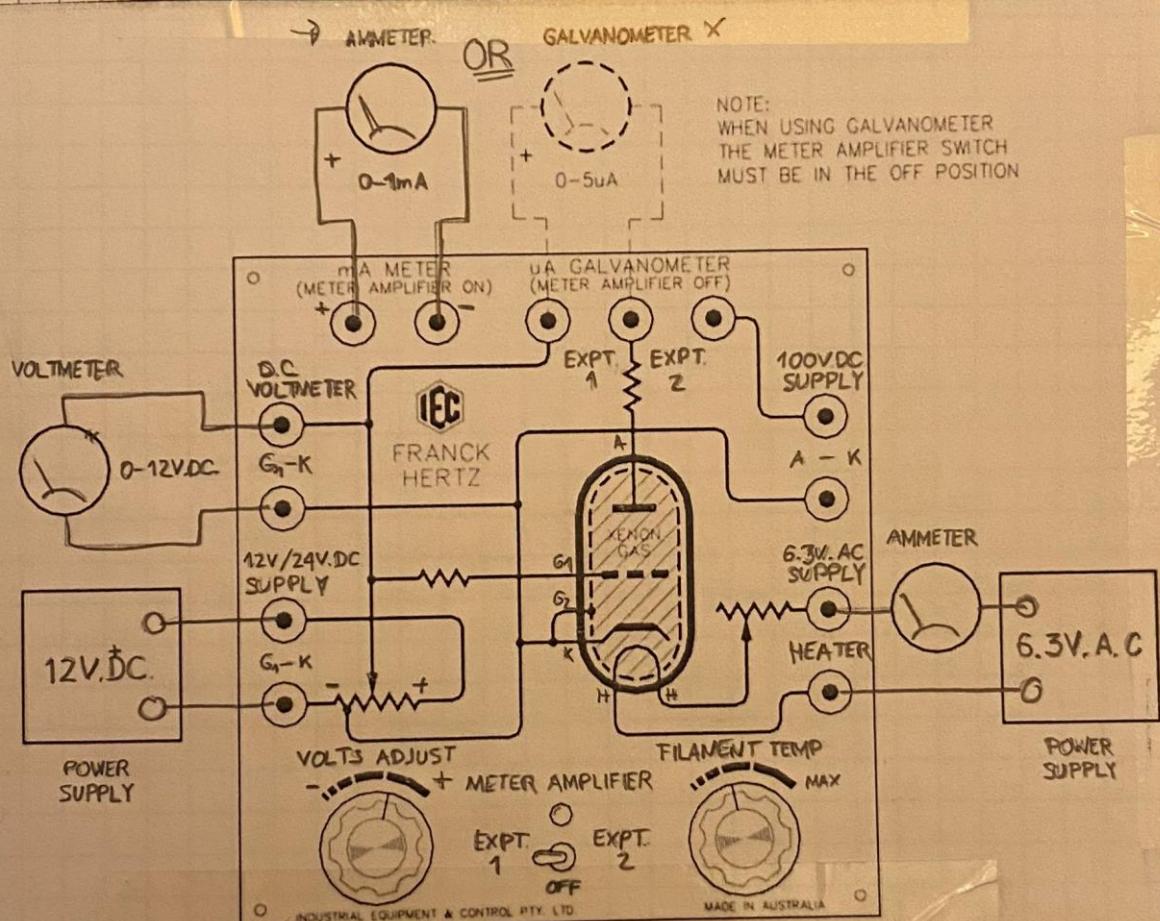
→ Determinação experimental das energias de excitação e ionização do átomo de xénon

ser usado com cuidado

e confrontado com gráfico  
de resultadosPreparação

1) Primeira energia de excitação de átomos de xénon

→ montar este circuito:



→ selecionar o EXPT. 1 no interruptor

→ regular a corrente de aquecimento para o seu mÁx

→ variar o potencial acelerador e registrar a variação  
da corrente que atravessa a válvula

→ fazer o gráfico de I (Vacel)

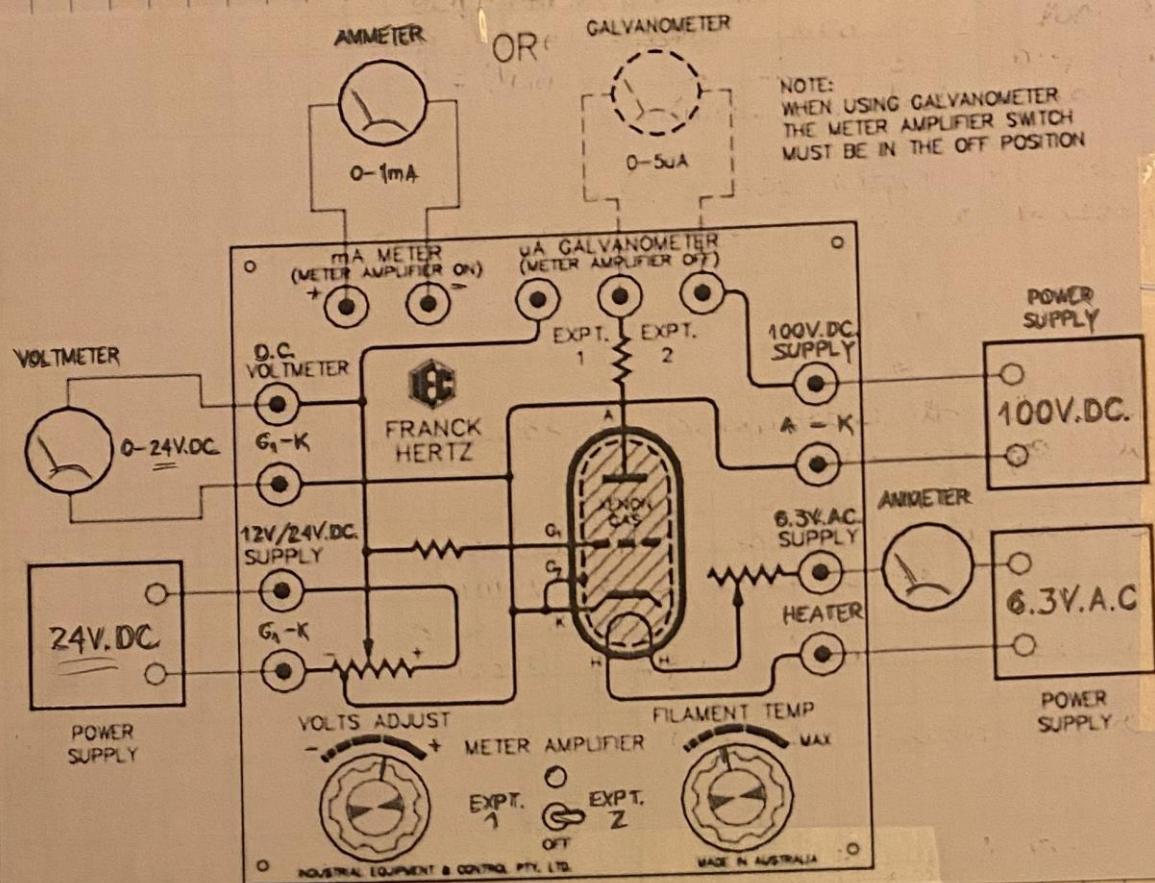
- determinar o seu mÍnimo num intervalo em torno da energia de excitação prevista, com a ajuda de um ajuste polinomial de segundo grau e derivando esta expressão expressão para obter o mÍnimo da função

$$\text{Excitação} = 8,3 \text{ eV}$$

prevista

## 2) Energia de ionização de catódicos de xénon

→ montar este circuito:



- selecionar o EXP. 2
- regular a corrente de aquecimento para aproximadamente 0,46A
- registrar as variações do potencial acelerador e da corrente que atravessa a válvula.
- fazer o gráfico com os dados
  - determinar o potencial de aceleração limiar e a primeira energia de ionização do xénon

$$E_{\text{ionização}} = 12 \text{ eV}$$

$$E_i = |e \cdot \text{Vaceleração} |_{\text{limiar}}$$

• a energia de ionização obtém-se determinando o Vál para o valor nulo de corrente elétrica.

*J.C.*

## Execução

- começamos por montar o circuito e escolher que multímetros utilizar como amperímetro e como voltmímetro
- optamos por usar o multímetro portátil como o amperímetro de aquecimento pois era aquela em que os algarismos significativos eram mais irrelevantes e dispensáveis **OK**
- ligamos o circuito e ajustamos as escelas dos aparelhos para:

$$\text{Vál} \rightarrow 20 \text{ V}$$

$$\text{I} \rightarrow 2 \text{ mA}$$

$$\text{Aquecimento} \rightarrow 10 \text{ A}$$

→ preparamos a tabela e gráfico no excel para facilitar o  
registro de dados

então estamos a utilizar um multímetro DMM 3466A Digital Multimeter da HP para medir V<sub>ocel</sub>, um 1ff Microvolt DMM da Keithley para medir I e um multímetro Faive MY64 para medir a ~~condutância~~ Transistor.

→ fizemos um registo de os dados com o máximo de controlo possível na zona perto do mínimo que queremos determinar

→ obtendremos en el gráfico esperado con una cantidad de est

→ Temos de arredondar vários valores enquanto os mudamos por estes não se estabilizaram independentemente do período de tempo que esperamos.

→ em preparação para a 2ª parte da experiência, alteramos o circuito para o 2º circuito e decidimos retirar o máximo de dados possível na zona em que a corrente aumenta para podermos obter o melhor ajuste linear possível

→ ligamos o circuito e ajustamos as escadas para:

$$V_{\text{acel}} \rightarrow 120 \text{ V} \quad I \rightarrow 2 \text{ mA} \quad I_{\text{requirements}} \rightarrow 10 \text{ A}$$

→ ~~ajustamos~~ ajustamos a corrente de aquecimento para 0,46A  
e testamos o circuito

→ decidimos alterar a escala do voltímetro de aceleração quando nos ~~aproximamos~~ aproximamos do máximo da escala originalmente escolhida (20V), para podermos registrar o máximo de dados possível, já que o máximo de tensão que poderíam ser registrados eram 24V, a tensão fornecida pelo gerador externo utilizado apenas neste circuito.

→ referimo-nos cerca de 60 dados e obtivemos um gráfico conforme o esperado

→ desligamos o circuito, organizamos a bancada, e demos a experiência como Terminada.

## Análise de Dados

→ após a experiência organize os dados recolhidos numa tabela com os nomes das ~~grande~~ variáveis ~~e~~ as respectivas demonstrações e também as incertezas que durante a 1ª parte da experiência foram constantes:

Vacuum  $\pm 0,001$  V       $\pm 0,0001$  mA

→ devido à ~~extensa~~ quantidade extensa de dados recolhidos, a Tabela presente na próxima página ficou um bocado comprimida.

→ Processo de análise de dados no Excel:

### (1<sup>a</sup> Parte de Experiência)

~~Começar por representar todos~~

Para escolher o melhor ajuste polinomial, comecei por selecionar um total de 29 dados (de tensão e de corrente) em torno do valor mínimo de corrente que registamos ( $0,2663\text{ mA}$ ) e com a função do "PROSLIN" fazer o ajuste de segundo grau. Obtevi valores para  $a$ ,  $b$  e  $c$  ( $y = ax^2 + bx + c$ ) com incertezas relativamente baixas ( $a = 0,0066 \pm 0,0002$ ;  $b = -0,103 \pm 0,003$ ;  $c = 0,66 \pm 0,01$ ) mas o valor de  $R^2$  que deveria ser o mais próximo de 1 possível é  $\approx 0,985$ ; por issohei experimentar variar o número de dados utilizados para melhorar o ajuste:

→ primeiro experimentei retercer 5 dados mas reparrei de imediato que isso influenciava negativamente os valores obtidos. (29 dados)

→ experimentei fazer o ajuste com 30 valores, com maior concentração acima do  $I_{\min}$ , e o valor de  $R^2$  aproximou-se ligeiramente mais de 1 ( $R^2 = 0,984$ ), mas mesmo assim, é mais baixo do que o primeiro ajuste.

→ tentei fazer um outro ajuste com 25 valores bastante mais concentrados acima do valor mínimo de corrente e o  $R^2$  passou para  $\approx 0,9988$ , logo conclui que estava perto ou mesmo no melhor conjunto de dados.

→ a partir deste conjunto experimentei variar mais e menos um/dois valores em ambas as direções para verificar se conseguia obter um ajuste ainda melhor.

→ cheguei a um conjunto de dados em que as incertezas eram satisfatórias e em que  $R^2 = 0,9992$ , que foi o mais próximo de 1 que consegui encontrar.

*Nota: Notei incluir as barras de erro em nenhum destes dois gráficos, pois as incertezas eram dimensões pequenas para serem visualizadas nos gráficos visíveis nos gráficos.*

### (2<sup>a</sup> Parte de Experiência)

Utilizei o mesmo processo da primeira parte para encontrar o melhor conjunto de dados para ~~repetir~~ fazer o ajuste linear da parte crescente do gráfico, de modo a poder calcular o ponto onde o ajuste linear se cruza com o eixo de  $I$  (onde  $I=0$  e  $V_{acel} = V_{acel\limiar}$ ).

Após várias tentativas erro, sempre 2 voltas de conjuntos de 20 a 30 valores, ~~até~~ cheguei a um conjunto com incertezas bastante reduzidas e  $R^2 = 0,9999$ .

Tracei o gráfico do ajuste linear de  $I(V_{acel})$  e calculei a partir da matriz do ajuste, o valor de  $V_{acel\limiar}$ , e o da 1<sup>a</sup> Energia de Ionização

**$R^2$  não é tudo: analisar os resíduos.**

Nota: Representei o gráfico dos resíduos em ambas as partes da experiência, e ambos tinham valores de ordem de grandeza inferior aos dados.

Vacel / V ±0.001V	I / mA ±0.0001mA
0.059	0.0996
0.093	0.1070
0.124	0.1141
0.264	0.1453
0.571	0.2167
0.787	0.2721
1.185	0.3610
1.355	0.3926
1.541	0.4218
1.774	0.4527
2.027	0.4787 Ajuste Polinomial
2.342	0.4931 0.552
2.842	0.4886 0.500
3.058	0.4794 0.479
3.364	0.4607 0.451
3.534	0.4485 0.437
3.822	0.4252 0.413
4.181	0.3960 0.386
4.420	0.3763 0.370
4.658	0.3590 0.355
5.033	0.3344 0.333
5.135	0.3282 0.328
5.340	0.3169 0.318
5.476	0.3105 0.312 Resíduos 1000
5.578	0.3088 0.307 0.00154 1.54
5.680	0.3044 0.303 0.00131 1.31
5.816	0.2991 0.298 0.00124 1.24
5.953	0.2942 0.293 0.00122 1.22
6.055	0.2908 0.290 0.00119 1.19
6.145	0.2880 0.287 0.00120 1.20
6.226	0.2859 0.284 0.00147 1.47
6.363	0.2819 0.281 0.00118 1.18
6.465	0.2792 0.278 0.00099 0.99
6.533	0.2776 0.277 0.00094 0.94
6.601	0.2762 0.275 0.00100 1.00
6.669	0.2749 0.274 0.00106 1.06
6.772	0.2732 0.272 0.00123 1.23
6.840	0.2723 0.271 0.00145 1.45
6.908	0.2714 0.270 0.00157 1.57
6.964	0.2709 0.269 0.00184 1.84
7.079	0.2697 0.268 0.00201 2.01
7.181	0.269 0.267 0.00230 2.30
7.249	0.2684 0.266 0.00224 2.24
7.351	0.2676 0.266 0.00207 2.07
7.522	0.2670 0.265 0.00204 2.04
7.624	0.2665 0.265 0.00159 1.59
7.727	0.2663 0.265 0.00122 1.22
7.761	0.2667 0.265 0.00151 1.51
7.795	0.2671 0.265 0.00178 1.78
7.829	0.2669 0.265 0.00143 1.43
7.863	0.2671 0.266
7.897	0.2672 0.266
8.000	0.2677 0.267
8.102	0.2681 0.268
8.206	0.2686 0.269
8.281	0.2691 0.270
8.410	0.2697 0.272
8.547	0.2707 0.274
8.718	0.2723 0.278
8.888	0.2742 0.282
9.025	0.2759 0.286
9.230	0.2787 0.293
9.435	0.2820 0.300
9.777	0.2880 0.314
9.980	0.2912 0.324
10.291	0.2974 0.340
10.428	0.2999 0.348
10.633	0.3041 0.361
10.941	0.3102 0.381

Esta é a tabela 1, que contém todos os dados da primeira parte da experiência, e assinalado a vermelho está o ponto de corrente mínima da curva a considerar no ajuste, que foi registado durante o procedimento. Este ponto serve como um estimativa inicial do valor da energia de excitação do xenon ( $E_{ex} \approx 7,727 \pm 0,001 \text{ eV}$ ). Assinalados a verde estão os valores limite do conjunto que utilizou para fazer o ajuste polinomial. Inclui também a 3ª coluna do ajuste com valores extra que utilizou para extender a linha no gráfico 2 e as colunas dos resíduos. A segunda coluna dos resíduos serviu apenas para obter valores com unidades diferentes e menos casas decimais, para poder representar melhor no gráfico 3.

Nas páginas seguintes ~~foram feitas~~ por os gráficos 1, 2 e 3 (dos dados, do ajuste polinomial e dos resíduos), com explicações já fiz.

0.0104	-0.158	0.865
0.0002	0.002	0.007
0.999239	0.000362	#N/D
15093.24	23	#N/D

Esta é a matriz do Ajuste Polinomial obtida através da função PROJ-LIN, ~~onde~~ onde posso retirar os valores de  $a$ ,  $b$  e  $c$  e as respectivas incertezas.

$$y = ax^2 + bx + c \quad \text{expressão do ajuste polinomial}$$

$$a = 0,0104 \pm 0,0002$$

$$b = -0,158 \pm 0,002$$

$$c = 0,865 \pm 0,007$$

$\Rightarrow \text{Vacel / V}$

$$y = 2ax^2 + b$$

$$\Delta x_{\min} \Rightarrow y = 0 \Leftrightarrow 2ax^2 + b = 0 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow x = \frac{-b}{2a} \quad \Leftrightarrow x = \frac{-(-0,158)}{2 \times 0,0104}$$

$$\Leftrightarrow x = 7,60 \text{ V}$$

$$\mu^2(x_{\min}) = \left( \frac{\partial x}{\partial a} \right)^2 \mu^2(a) + \left( \frac{\partial x}{\partial b} \right)^2 \mu^2(b) = \\ = \left( \frac{b}{2a^2} \right)^2 \mu^2(a) + \left( \frac{-1}{2a} \right)^2 \mu^2(b) = 0,009 \text{ V}$$

$$\therefore \text{Exatação} = (7,6 \pm 0,1) \text{ eV}$$

$$\therefore \mu(x_{\min}) = \sqrt{\mu^2(x_{\min})} = 0,1 \text{ V}$$

Gráfico 1

### I (Vacel)

● I / mA  $\pm 0.0001$  mA

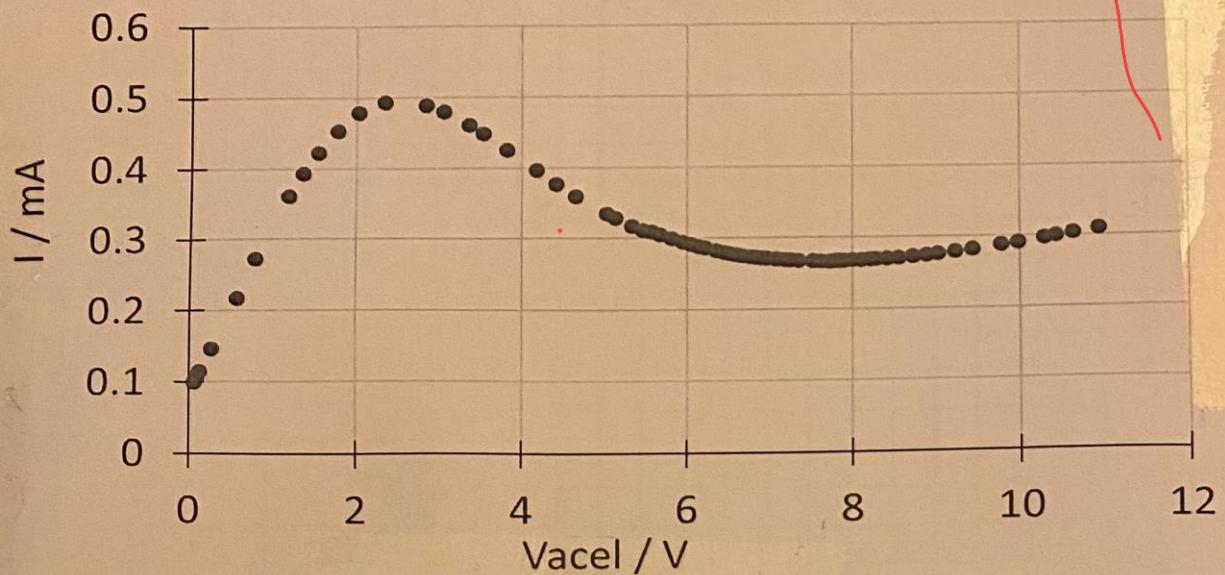


Gráfico 2

### Ajuste Polinomial I(Vacel)

● I(Vacel) — Ajuste Polinomial

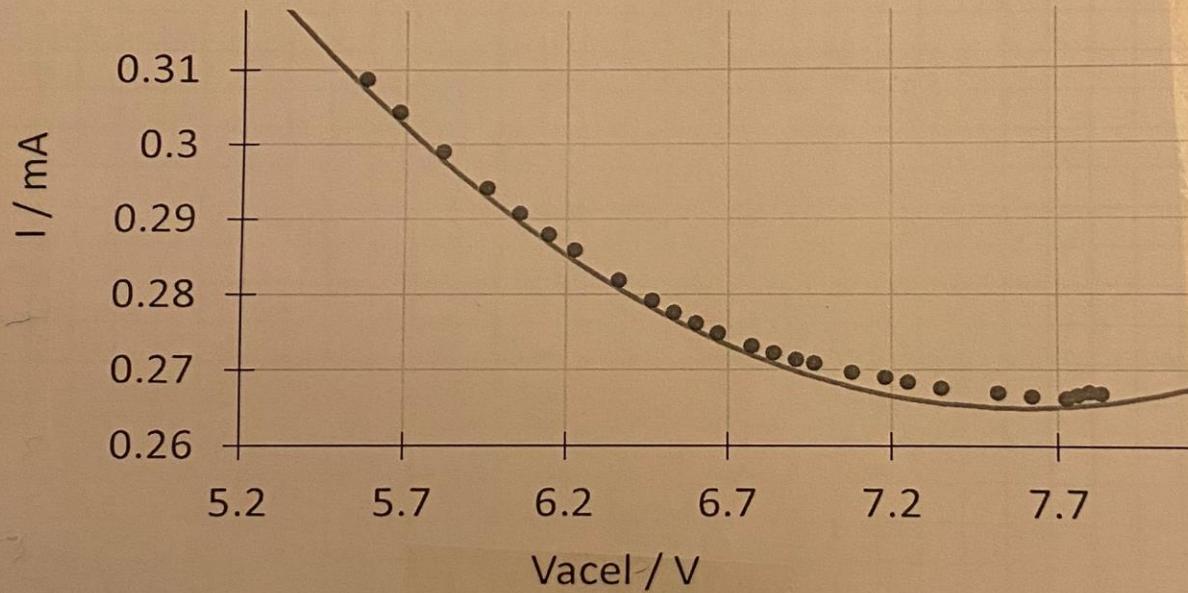
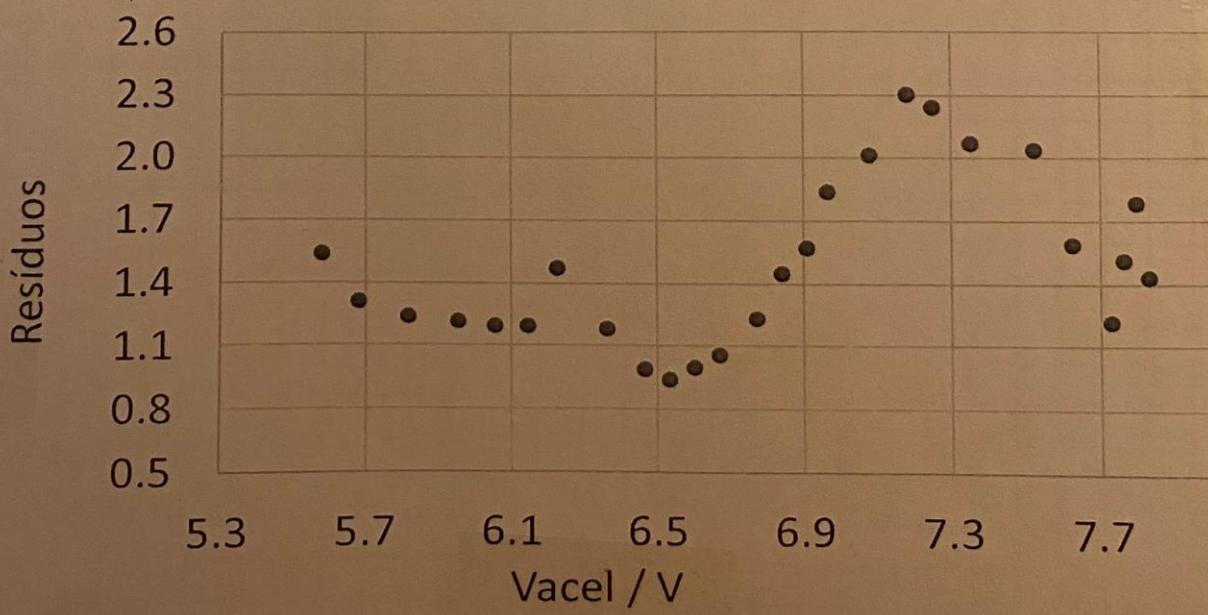


Gráfico 3

### Resíduos do Ajuste Polinomial



Vacel / V	I / mA ±0.0001mA	Reta de Ajuste
0.129	0.0028	-0.501
1.152	0.0028	-0.461
2.389	0.0028	-0.412
3.608	0.0028	-0.365
4.860	0.0028	-0.316
5.994	0.0029	-0.272
7.220	0.0028	-0.224
8.427	0.0028	-0.176
9.626	0.0029	-0.130
10.828	0.0029	-0.083
11.556	0.0029	-0.054
11.926	0.0029	-0.040
12.063	0.0029	-0.034
12.199	0.0030	-0.029
12.381	0.0031	-0.022
12.537	0.0033	-0.016
12.671	0.0036	-0.011
12.804	0.0039	-0.005
13.042	0.0049	0.004
13.197	0.0058	0.010
13.325	0.0067	0.015
13.515	0.0087	0.022
13.640	0.0106	0.027
13.886	0.0154	0.037
14.060	0.0215	0.044
14.218	0.0316	0.050
14.430	0.0429	0.058
14.619	0.0522	0.066
14.855	0.0636	0.075
15.033	0.0721	0.082
15.273	0.0832	0.091
15.454	0.0915	0.098
15.696	0.1024	0.108
15.880	0.1104	0.115
16.186	0.1240	0.127
16.310	0.1294	0.132
16.433	0.1345	0.136
16.619	0.1424	0.144
16.805	0.1502	0.151
16.992	0.1580	0.158
17.178	0.1656	0.165
17.432	0.1760	0.175
17.608	0.1822	0.182
17.684	0.1853	0.185
17.812	0.1905	0.190
18.003	0.1980	0.198
18.195	0.2056	0.205
18.258	0.2080	0.208
18.388	0.2132	0.213
18.524	0.2185	0.218
18.711	0.2257	0.225
18.906	0.2334	0.233
19.036	0.2384	0.238
19.168	0.2433	0.243
19.299	0.2485	0.248
19.430	0.2536	0.253
19.621	0.2610	0.261
19.828	0.2688	0.269
19.960	0.2738	0.274
20.36	0.2892	0.290
20.56	0.2970	0.298
20.77	0.3048	0.306
20.98	0.3127	0.314
21.18	0.3206	0.322
21.31	0.3255	0.327

Ésta é a Tabela 2 que inclui os dados recolhidos na 2ª parte da experiência e a análise dos mesmos.

→ a seta presente no lado esquerdo da tabela (perto do fim) indica o ponto em que a incerteza da Vacel mudou de  $\pm 0,001\text{V}$  para  $\pm 0,01\text{V}$ .

Caracterização desta alteração está na Execução.

→ Tal como na tabela 1, delimitei os dados que escolhi utilizar no ajuste linear com verdi, e extendi a coluna dos pontos da reta de ajuste para poder prolongar essa reta no gráfico 2.

→ através da função PROJ. LIN do Excel, obtive a Matriz do Ajuste Linear:

Ajuste Linear

0.03907	-0.506
0.00008	0.002
0.9999	0.000457

$$y = ax + b$$

Desta matriz posso retirar os valores a e b da equação da reta de ajuste e as respectivas incertezas:

$$a = 0,03907 \pm 0,00008$$

~~$b = -0,506 \pm 0,002$~~

O valor que quero obter é o Vacel linear, que corresponde ao Vacel quando  $I=0$ , logo:

$$\text{Vacel linear} \Rightarrow 0 = ax + b \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow x = -\frac{b}{a} \Leftrightarrow x = -\frac{(-0,506)}{0,03907} \Leftrightarrow$$

~~$x = 12,95\text{V}$~~

$$u^2(x) = \left(\frac{\partial u}{\partial a}\right)^2 u^2(a) + \left(\frac{\partial u}{\partial b}\right)^2 u^2(b) =$$

$$= \left(\frac{b}{a^2}\right)^2 u^2(a) + \left(\frac{-1}{a}\right)^2 u^2(b)$$

$$= 0,003$$

$$u(x) = 0,05$$

Possuo então concluir que a primeira energia de ionização corresponde a:

~~$E_i = (12,95 \pm 0,05)\text{eV}$~~

→ por fim, tal como na 1ª parte da experiência, multipliquei os valores dos resíduos para que ficassem melhores de representar no gráfico 3, e confirmei que todos os valores são de ordens de grandeza inferiores aos dedos.

### E ionização / J

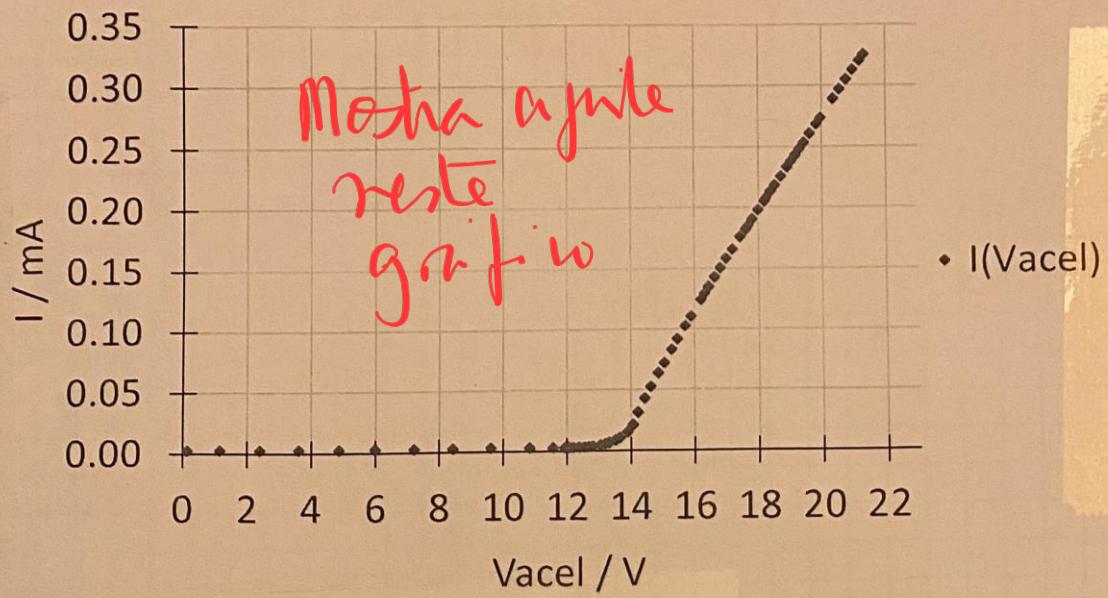


Gráfico 1, representação de dados,  $I(\text{Vacel})$

### Ajuste Linear de $I(\text{Vacel})$

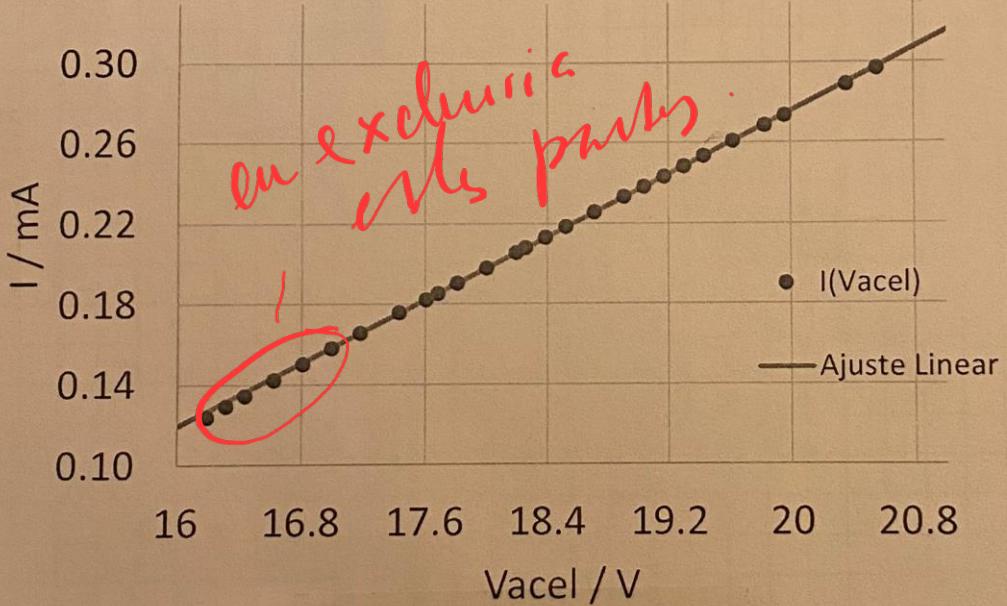


Gráfico 2, Ajuste Linear dumha parte dos dados

### Resíduos do Ajuste Linear

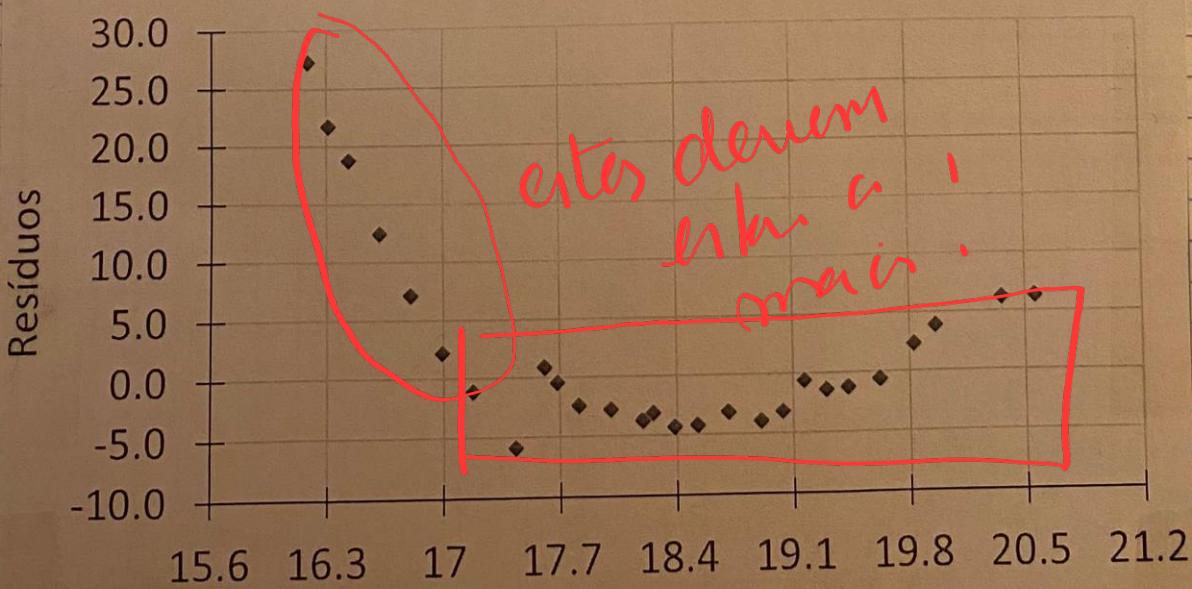


Gráfico 3,  
Resíduos  
entre os  
dados e o  
ajuste linear

## Conclusão

Os resultados obtidos através desta experiência foram:

$$E_{\text{excitação}} = (7,6 \pm 0,1) \text{ eV}$$

$$E_{\text{ionização}} = (12,95 \pm 0,05) \text{ eV}$$

Para poder fazer uma análise extra destes resultados, fui pesquisar os valores tabulados destas duas energias, ~~relativa~~ para calcular a diferença relativa entre ambas. Infelizmente só consegui encontrar o valor da energia de ionização do xénon, e por isso ~~só~~ vou utilizar o valor da energia de excitação presente no protocolo para com parer com o meu primeiro resultado.

$$E_{\text{ext}(P)} = 7,6 \text{ eV}$$

(1<sup>a</sup> Energia  
de excitação  
prática)

$$E_{\text{ext}(T)} = 8,3 \text{ eV}$$

(1<sup>a</sup> Energia  
de excitação  
tabulada)

↳ retirado do protocolo de experiência

$$\frac{|7,6 - 8,3|}{8,3} \times 100 = 8,4\%$$

Esta diferença relativa é subjetivamente grande, mas considerando que a incerteza do valor prático apenas tem uma casa decimal, e foi obtido através de um ajuste linear, concluo que seja uma diferença justificável que faz sentido e que não é excessivamente grande.

$$E_i(P) = 12,95 \text{ eV}$$

(1<sup>a</sup> energia de  
ionização prática)

$$\frac{|12,95 - 12,13|}{12,13} \times 100 = 6,76\%$$

$$E_i(T) = 12,13 \text{ eV}$$

(1<sup>a</sup> energia de ionização  
tabulada)

↳ retirado do site "[https://pt.kle.cz/pt\\_BR/xenonio.html](https://pt.kle.cz/pt_BR/xenonio.html)"  
no dia 07/10/2022

Esta diferença relativa é menor do que a do primeiro resultado, mas mesmo assim, é maior do que o que eu esperava.

É possível que esta diferença se deva à escolha de valores para o ajuste, mesmo ~~mesmo~~ depois de testar vários conjuntos e de ter escolhido o melhor

conjunto que encontrei, é possível que houvesse um melhor ~~mais~~ conjunto que desse um resultado mais exato. As incertezas dos valores são contudo baixas,

(0,1 eV a 0,05 eV) o que me faz ponderar se o "valor verdadeiro" realmente se encontra no intervalo criado pelos resultados e as respectivas incertezas. Acredito que ~~que~~ os erros desta experiência não venham dos aparelhos usados, especificamente os dois multímetros a partir dos quais registámos os dados, pois estes apresentavam erros com bastantes algarismos significativos e incertezas bastante pequenas. Isto leva-me a concluir que os erros desta experiência vêm da análise dos dados e ajustes dos mesmos ou mesmo de algum erro sistemático que para ser testado teríamos de realizar novamente a experiência com equipamentos diferentes para comparar os resultados.

Para concluir, esta experiência deu-me a conhecer o funcionamento de uma válvula com gás xénon, como analisar dados com tendências não lineares, e determinar os valores da primeira energia de excitação do xénon e da primeira energia de ionização do xénon, embora estes resultados não tenham sido muito exatos.