

# Junção PN

## Laboratório de Complementos de Eletromagnetismo e Termodinâmica MEFT 2013/2014

Débora Barreiros, 75693 — Pedro Cal, 75699 — Tiago Costa, 75970 — Nuno Rosa, 76018  
Instituto Superior Técnico — Turma de sexta-feira — Grupo I  
25 de Maio de 2014

### Resumo

O objetivo deste trabalho experimental foi a determinação da característica  $V(I)$  de uma junção PN e a sua variação com a temperatura. Verificou-se que à medida que a intensidade de corrente aumenta, a tensão também aumenta aproximadamente de acordo com os modelos descritos no relatório. Algumas características da junção foram também calculadas tais como o parâmetro  $\eta = 1.6 \pm 0.6$  e o valor de  $E_g = 0.89 \pm 0.02$  eV para o primeiro modelo e ainda o parâmetro para a energia de  $gap$  de  $1.07 \pm 0.03$  eV para o segundo modelo.

## 1. INTRODUÇÃO TEÓRICA

Nesta experiência laboratorial pretende-se estudar a característica tensão-corrente de uma junção PN [2] e avaliar o modo como esta varia com a temperatura. De facto ao longo da experiência foi utilizado uma junção de silício ou seja utilizou-se um díodo comercial.

Uma junção PN trata-se apenas de associar dois semicondutores do mesmo material sendo um de tipo N e outro de tipo P. Estes dois tipos diferentes de semicondutor diferem apenas no dopante que é inserido nos espaços entre os átomos do semicondutor. Efectivamente em qualquer um dos casos partimos de um semicondutor intrínseco isto é, sem 'impurezas', e acabamos com um semicondutor extrínseco que possui átomos de outros elementos. De uma forma mais aprofundada e tendo em conta que o semicondutor a utilizar é o silício, podemos considerar que a parte da junção que constitui o semicondutor do tipo N foi dopada com átomos do grupo 15 da tabela periódica, como o fósforo, enquanto que a parte da junção com o semicondutor do tipo P foi dopada com átomos do grupo 13 como o Boro. Os nomes de N e P têm a ver com a característica 'negativa' e 'positiva' do semicondutor, ou seja, ao dopar o semicondutor com átomos de fósforo estamos a adicionar partículas com mais um electrão de valência do que as existentes, enquanto que no caso da adição ser de Boro, resulta em um maior número de espaços vazios.

Assim, o maior número de electrões no caso do tipo N faz com que sejam estes os responsáveis pelo movimento da carga enquanto que no tipo P são os 'buracos' os principais responsáveis. Assim sendo para além da movimentação de carga natural que ocorre num semicondutor intrínseco o que se verifica é que ao unir os dois semicondutores haverá um transporte de electrões por difusão do semicondutor do tipo N para o P. No entanto existe uma carga fixa em ambos os lados da junção o que provoca uma barreira de potencial. O processo de difusão prossegue e com o aumento da carga positiva no terminal N e de carga negativa no terminal P, gera-se um campo contrário ao movimento das cargas e que eventualmente vai impedir a evolução das mesmas.

Ao fornecer uma diferença de potencial à junção PN o que sucede é que os elementos com maior número de electrões de valência desclocar-se-ão até ao semicondutor com lacunas, isto é vão ocupar os espaços vazios existentes e deste modo procede-se a uma diminuição da barreira de potencial já referida o que leva a que haja movimento de cargas e deste modo se gera uma corrente.

Essencialmente existem dois modelos que explicam a relação tensão corrente da junção PN.

O modelo A, modelo mais simples a utilizar diz-nos que a corrente que percorre a junção é dada por:

$$I = I_s(e^{\frac{QV_d}{KT\eta}} - 1) \quad (1.1)$$

A expressão da tensão em função da corrente toma então a forma:

$$V = RI + b \cdot \ln(I) + c \Leftrightarrow \quad (1.2)$$

$$\Leftrightarrow V = RI + \frac{\eta KT}{q} \ln(I) - \frac{\eta KT}{q} \ln(I_s) \quad (1.3)$$

em que:

$$b = \frac{\eta KT}{q} \quad (1.4)$$

$$c = -\frac{\eta KT}{q} \ln(I_s) \quad (1.5)$$

O valor de  $I_s$  é:

$$I_s \propto T^3 e^{-\frac{E_g}{KT}} \quad (1.6)$$

Uma vez que existem algumas impurezas associadas aos estados de condução do sistema temos que considerar um novo modelo que leve isso em conta e daí surge o modelo B, no qual a expressão da corrente toma a forma:

$$I = I_s(e^{\frac{QV_d}{KT\eta}} - 1) + I_r(e^{\frac{QV_d}{2KT}} - 1) \quad (1.7)$$

Em que as expressões de  $I_s$  e de  $I_r$  são respectivamente:

$$I_s \propto T^3 e^{-\frac{E_g}{KT}} \quad (1.8)$$

$$I_r \propto T^{\frac{5}{2}} e^{-\frac{E_g}{2KT}} \quad (1.9)$$

O valor da tensão para este modelo B tendo em conta as novas aproximações feitas pode ser escrito:

$$V = RI + \frac{2KT}{q} \ln \left[ \sqrt{\left(\frac{I_r}{2I_s}\right)^2 + \left(\frac{I + I_r}{I_s} + 1\right)} - \frac{I_r}{2I_s} \right] \quad (1.10)$$

## 2. MONTAGEM DA EXPERIÊNCIA

Esta experiência possui apenas uma montagem [1], sendo que serão analisados diversos conjuntos de dados para situações distintas. De facto o circuito efectuado pode ser analisado na figura 1.

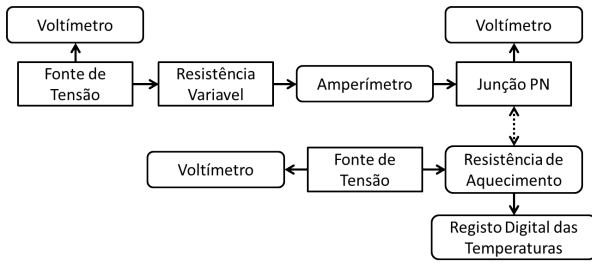


Figura 1. Diagrama de blocos associado à montagem experimental

Desta forma o circuito possuía duas fontes de tensão uma que controlava a temperatura da junção PN devido à presença de resistências eléctricas ( $E_2$ ) e uma outra que regulava a corrente que era transmitida á junção ( $E_1$ ). Assim a primeira fase do procedimento exigia que a fonte que regula a temperatura se mantivesse a 0 por forma a que não houvesse qualquer alteração na junção, isto é esta teria que se manter à temperatura ambiente. Assim, ajusta-se a resistência inicialmente para  $100\text{ K}\Omega$ , e varia-se a tensão de tal modo que a corrente varie de forma controlada entre  $10\text{ }\mu\text{A}$  e  $100\text{ }\mu\text{A}$ . Altera-se a resistência para  $20\text{ K}\Omega$  e procede-se do mesmo modo para correntes entre os  $100\text{ }\mu\text{A}$  e os  $1000\text{ }\mu\text{A}$ . Altera-se de novo a resistência, desta feita para  $1000\text{ }\Omega$  e ajusta-se a tensão para que a corrente varie de  $1\text{ mA}$  até  $19\text{ mA}$ . Por fim a resistência toma o valor de  $200\text{ }\Omega$  e a corrente varia entre os  $20\text{ mA}$  e os  $110\text{ mA}$ . Em todas as medidas foram retirados os valores de tensão correspondente ao ajuste da corrente pretendida. Desta forma recolheram-se os dados para a relação tensão corrente pretendida. De salientar que as alterações nos valores da resistência devem-se ao facto de se pretender evitar correntes e tensões elevadas que prejudiquem a correcção dos resultados obtidos.

Repetiu-se o procedimento para  $8,9\text{ V}$ ,  $12,6\text{ V}$ ,  $15,5\text{ V}$ ,  $17,5\text{ V}$  e  $20\text{ V}$ . Procedeu-se posteriormente ao ajuste dos dados recolhidos através dos dois modelos já referenciados anteriormente. De notar que o sistema demora algum tempo a estabilizar numa nova temperatura após alteração da tensão na fonte  $E_2$

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 3.1. Análise utilizando o Modelo 1

Em primeiro lugar, efectue-se a análise dos resultados utilizando o modelo mais simples para a Junção PN, segundo o qual a corrente que a atravessa é dada pela expressão (1.1).

Recolhidos os pares (I,V) foi efectuado um ajuste para cada temperatura utilizando a equação (1.2), como se pode ver na figura 2. Note-se que os valores de temperatura obtidos resultam da média dos valores lidos ao longo da recolha de dados.

Efectuou-se novamente o ajuste para cada temperatura, desta vez aos pares ( $\ln(I)$ ,V), que se encontra presente na figura 3.

Os parâmetros resultantes dos ajustes encontram-se na tabela I.

Utilizando os valores resultantes dos ajustes, é possível representar a resistência da parte neutra dos semicondutores em função da temperatura, e procede-se ao ajuste dos valores de  $b(T)$ , utilizando a expressão (1.4), e  $c(T)$ , utilizando a conjugação das expressões (1.5) e (1.6). Estas representações gráficas e ajustes encontram-se, respetivamente, nas figuras 4,5, 6.

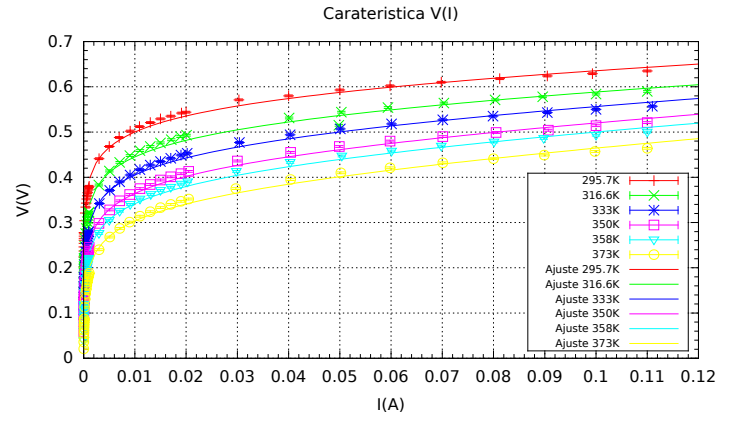


Figura 2. Ajuste aos valores de V em função de I para cada temperatura

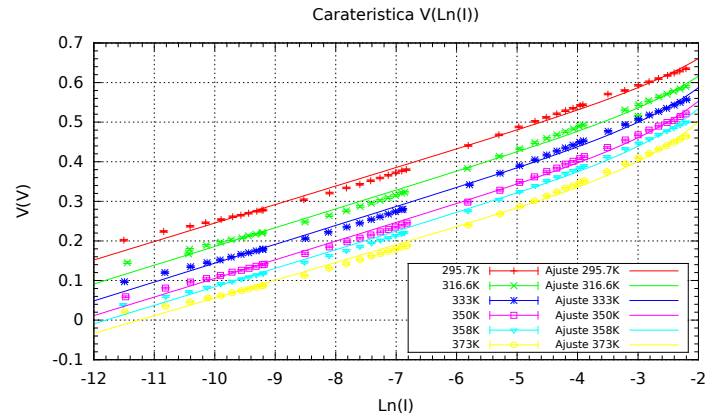


Figura 3. Ajuste aos Valores de V em função de  $\ln(I)$  para cada temperatura

T(K)	R( $\Omega$ )	b(mV)	c(mV)
$295.7 \pm 0.5$	$0.31 \pm 0.08$	$46.7 \pm 0.9$	$712 \pm 7$
$316.6 \pm 0.4$	$0.38 \pm 0.08$	$47.3 \pm 0.9$	$659 \pm 7$
$333 \pm 1$	$0.46 \pm 0.08$	$47.6 \pm 0.8$	$620 \pm 7$
$350 \pm 2$	$0.53 \pm 0.07$	$47.0 \pm 0.8$	$575 \pm 6$
$358 \pm 2$	$0.56 \pm 0.07$	$46.7 \pm 0.9$	$551 \pm 6$
$373 \pm 2$	$0.65 \pm 0.08$	$44.7 \pm 0.8$	$503 \pm 7$

Tabela I. Parâmetros resultantes dos ajustes

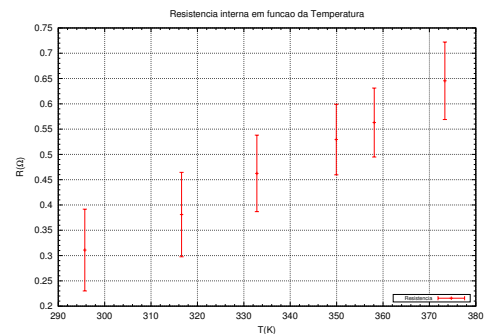


Figura 4. Resistência em função da temperatura

Para o ajuste aos valores de b obteve-se  $\eta = 1.6 \pm 0.6$ .

Feito o ajuste aos valores de c, foi possível obter o valor  $E_g = (1.42 \pm 0.03) \times 10^{-19}\text{ J}$ . Dividindo este valor pela carga do eletrão, tem-se que em eV,  $E_g = 0.89 \pm 0.02\text{ eV}$ .

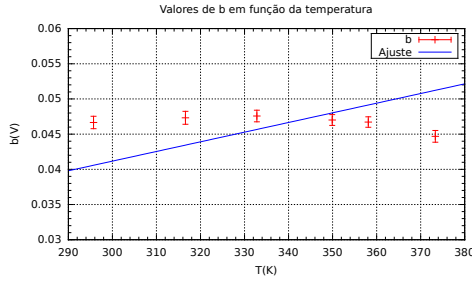


Figura 5. Valores de  $b$  em função da temperatura

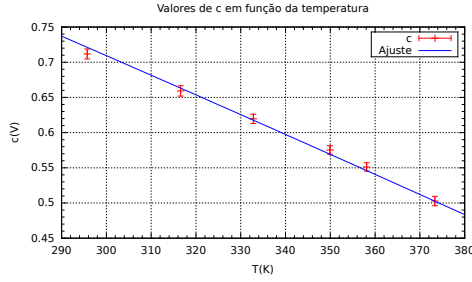


Figura 6. Valores de  $c$  em função da temperatura

### 3.2. Análise utilizando o Modelo 2

Efectue-se agora a análise utilizando o modelo para a Junção PN segundo o qual a corrente que a atravessa é dada pela expressão (1.7).

Efetuuou-se de novo o ajuste para os pares  $(V, \ln(I))$ , utilizando agora a expressão (1.10), deixando  $R$ ,  $I_s$  e  $I_r$  como parâmetros livres. Obteve-se então o ajuste presente na figura 7.

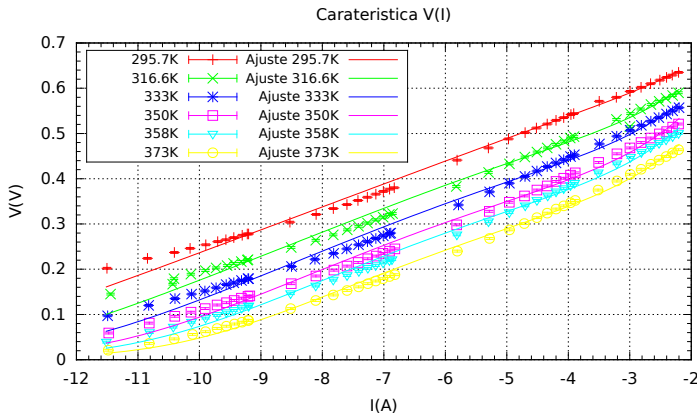


Figura 7. Ajuste aos valores de  $V$  em função de  $\ln(I)$  para cada temperatura

Os parâmetros resultantes deste ajuste encontram-se presentes na tabela III.

Obtidos estes valores é agora possível representar graficamente  $R(T)$  e fazer os ajustes teóricos a  $I_r(T)$  e  $I_s(T)$  utilizando as expressões (1.9) e (1.8) respetivamente. A representação gráfica e ajustes de  $R$ ,  $I_r$  e  $I_s$  encontram-se presentes nas figuras 8, 9 e 10.

Destes ajustes obtiveram-se os valores de  $E_g$  que se encontram na tabela

Apesar de dos ajustes de  $I_r$  e  $I_s$  resultarem dois valores para a energia de *gap*, estes valores são referentes aos mesmos pontos experimentais e ao mesmo modelo, pelo que só pode

$T(K)$	$R(\Omega)$	$I_r(A)$	$I_s(A)$
$295.7 \pm 0.5$	$0.3 \pm 0.1$	$(4.4 \pm 0.2) \times 10^{-7}$	$(2.5 \pm 0.3) \times 10^{-12}$
$316.6 \pm 0.4$	$0.6 \pm 0.1$	$(1.9 \pm 0.1) \times 10^{-6}$	$(3 \pm 1) \times 10^{-10}$
$333 \pm 1$	$0.7 \pm 0.1$	$(5.0 \pm 0.3) \times 10^{-6}$	$(3 \pm 1) \times 10^{-9}$
$350 \pm 2$	$0.78 \pm 0.09$	$(1.19 \pm 0.07) \times 10^{-5}$	$(3.4 \pm 0.8) \times 10^{-8}$
$358 \pm 2$	$0.78 \pm 0.08$	$(1.9 \pm 0.1) \times 10^{-5}$	$(9 \pm 2) \times 10^{-8}$
$373 \pm 2$	$0.76 \pm 0.07$	$(3.9 \pm 0.2) \times 10^{-5}$	$(5.0 \pm 0.7) \times 10^{-7}$

Tabela II. Parâmetros resultantes dos ajustes utilizando o modelo 2

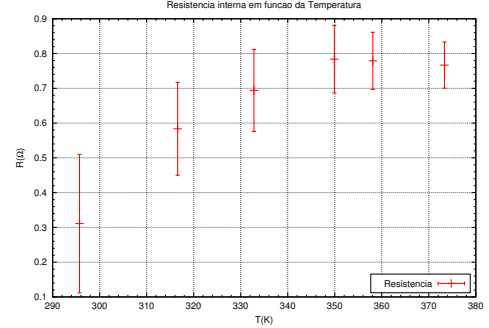


Figura 8. Resistência em função da temperatura

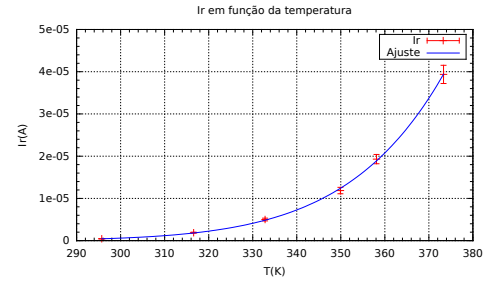


Figura 9. Valores de  $I_r$  em função da temperatura

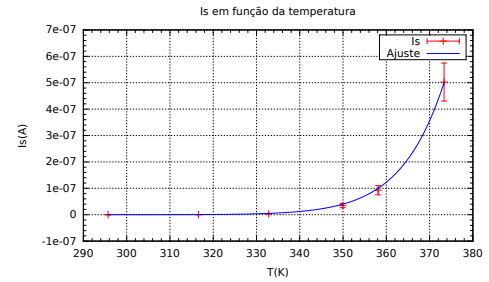


Figura 10. Valores de  $I_s$  em função da temperatura

	$E_g(J)$	$E_g(eV)$
$I_r$	$(1.58 \pm 0.03) \times 10^{-19}$	$0.99 \pm 0.02$
$I_s$	$(1.80 \pm 0.05) \times 10^{-19}$	$1.13 \pm 0.03$

Tabela III. Parâmetros resultantes dos ajustes utilizando o modelo 2

existir um valor de  $E_g$ . Para tal, foi necessário realizar várias iterações em que se variava incrementalmente  $E_g$  - igual para os dois ajustes - de modo a se encontrar o valor para o qual a soma dos  $\chi^2$  fosse mínima. O valor de  $E_g$  que satisfaz estas condições foi então  $E_g = (1.71 \pm 0.04) \times 10^{-19} J$ , o que corresponde a  $1.07 \pm 0.03 eV$ .

Os ajustes com o valor de  $E_g$  que minimiza  $\chi^2$  podem ser encontrados nas figuras 11 e 12.

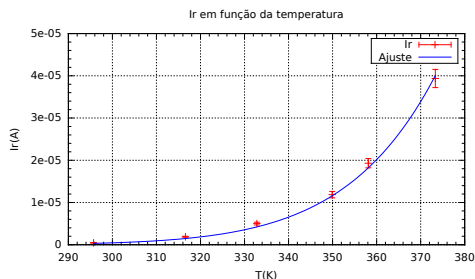


Figura 11. Valores de  $I_r$  em função da temperatura em que o ajuste é feito com  $E_g = 1.71 \times 10^{-19} J$

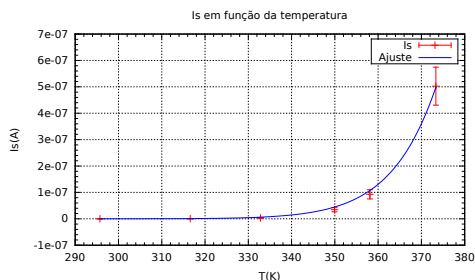


Figura 12. Valores de  $I_s$  em função da temperatura em que o ajuste é feito com  $E_g = 1.71 \times 10^{-19} J$

#### 4. ANÁLISE, CRÍTICAS E CONCLUSÃO

Quanto ao primeiro modelo, após a análise dos resultados, observa-se que a expressão da tensão em função da intensidade de corrente por este prevista se ajusta razoavelmente aos pontos obtidos experimentalmente, apesar de em alguns pontos a curva não estar compreendida dentro do valor do erro. Esta discrepância entre a curva teórica e os valores obtidos pode ter origem na impossibilidade de se manter a temperatura constante - existiram flutuações na temperatura da Junção PN enquanto se efectuavam as medições - uma vez que o modelo admite que a temperatura é constante para os vários valores de tensão e intensidade.

Analisando o gráfico da figura 4 verifica-se que a resistência da parte neutra dos condutores cresce com a temperatura, como se poderia prever. Para este modelo obteve-se o valor  $\eta = 1.6 \pm 0.6$ , valor esse que se encontra entre 1 e 2, como seria de esperar para o valor de  $\eta$  utilizado por este modelo. Contudo, verifica-se que o ajuste de b através deste modelo é extremamente insatisfatório, pelo que é posta em causa a validade quer do valor de  $\eta$  quer da parte do modelo responsável pela previsão dos valores de b em função da temperatura. Por outro

lado, a expressão obtida para os valores de c ajusta-se bastante bem aos valores obtidos experimentalmente. Desse ajuste resultou o valor  $E_g = (1.42 \pm 0.03) \times 10^{-19} J$  com um desvio à precisão de 2.45%, o que corresponde a  $E_g = 0.89 \pm 0.02 eV$ . Sabendo que a Energia da Banda Proibida de um semiconductor se encontra compreendida entre os 0eV e os 3eV, então conclui-se que o valor obtido para  $E_g$  é plausível uma vez que estamos na presença de dois semicondutores.

Relativamente ao segundo modelo, verifica-se mais uma vez que a expressão para a tensão em função da intensidade prevista por este se ajusta adequadamente aos pontos experimentais. Tal como no caso anterior, alguns pontos pelos quais a curva não está compreendida dentro do seu erro, o que se pode atribuir a flutuações térmicas durante as medições. O facto de o ajuste não se adequar completamente aos pontos pode também dever-se a características intrínsecas ao modelo, uma vez que aplicados aos mesmos dados este modelo e o anterior produzem resultados de qualidade diferente. Isto é, pode dar-se o caso que, tanto o modelo 1 como o modelo 2 não se adequem perfeitamente por não serem rigorosos o suficiente, em conjugação com fatores de perturbação externa já apresentados. Por este andar poder-se-ia pensar que o modelo 1, mais simples, descreve melhor o comportamento da Junção PN do que o modelo 2, visto que o ajuste aparenta ser melhor. Contudo verificar-se-á posteriormente que não é isso que acontece.

Quanto à representação gráfica da resistência da parte neutra em função da temperatura, observa-se novamente que a primeira tem tendência a aumentar com a segunda. Analisando agora o ajuste de  $I_r$  em função da temperatura já considerando o valor de  $E_g$  que minimiza o  $\chi^2$  verifica-se que o ajuste é bom. Verifica-se uma qualidade de ajuste semelhante para os valores de  $I_s$  novamente já tendo em conta o valor de  $E_g$  que minimiza a soma dos erros. Esse valor foi de  $E_g = (1.71 \pm 0.04) \times 10^{-19} J$ , o que corresponde a  $1.07 \pm 0.03 eV$  valor esse que cai novamente no intervalo 0eV-3eV.

Se se tomar o valor da Energia de Banda Proibida do silício ( $E_g=1.11eV$ ) como o verdadeiro, então para o valor calculado pelo modelo 1 obtém-se um desvio à exactidão de 24.7%, e para o valor calculado a partir do modelo 2 tem-se um desvio à exactidão de 3.6%. O facto de o desvio à exactidão para o modelo 2 dar bastante inferior ao do modelo 1, juntamente com a significativa melhor qualidade dos ajustes por parte do modelo 2, leva-nos a concluir que o modelo 2 apresenta, de facto, uma melhor descrição da Junção PN que o modelo 1.

Finalmente, sugere-se que para uma melhor determinação do valor de  $E_g$  se melhore o isolamento térmico da Junção PN, de forma a que a assunção dos modelos de que a temperatura se mantém constante ao longo das medições se verifique.

- 
- [1] Guia experimental *Protocolo de execução do trabalho sobre a determinação das características eléctricas de uma junção PN e sua variação com a temperatura*, Professor João Figueirinhas  
 [2] Apontamentos das aulas teóricas, Professor João Figueirinhas