

Autor: Luís Oliveira  
PL 2, grupo 2

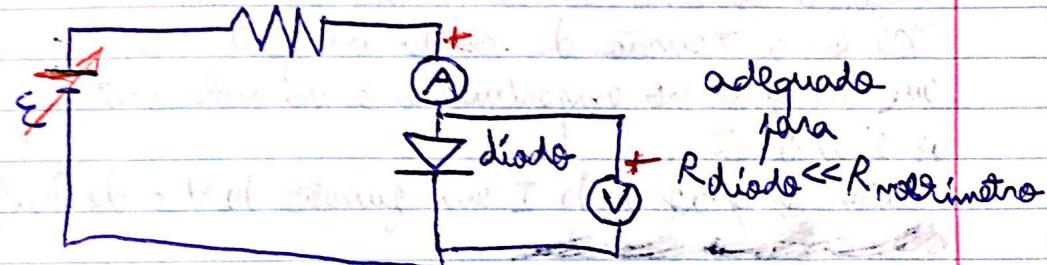
Ação 3 B: Traçado da curva característica de diodos (ajuster muito ferrados)

• O objetivos:

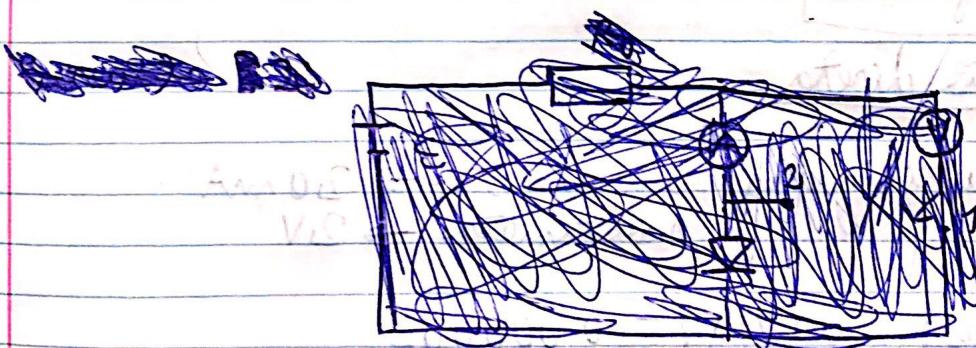
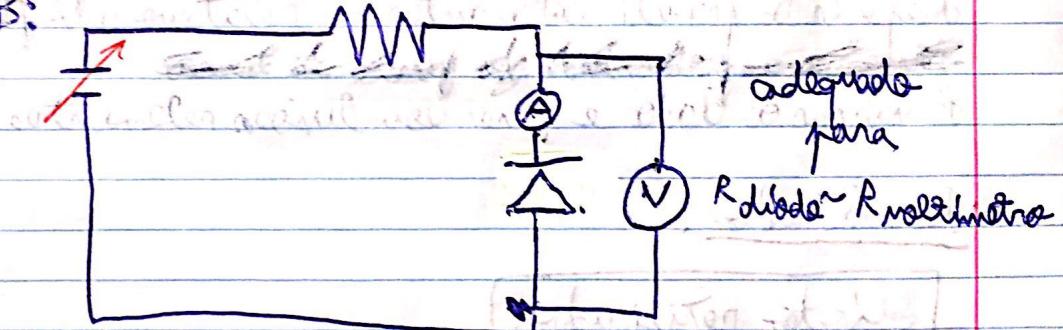
Traçar e parametrizar a curva (não linear) característica dos diodos retificadora e reversa, e avaliar as suas resistências internas aparentes em várias gamas de tensão.

• Esquema experimental:

Circuito A:



Circuito B:



• Passo:

Conferir a disponibilidade do equipamento a usar, nomeadamente:

- multímetro digital a configurar como voltmetro;
- multímetro digital a configurar como ampermetro;

- fonte de tensão variável;
- resistência de proteção ( $R_0$ );
- diodos montados em placas com terminais;
- comutador;
- pinos elétricos para as ligações.

~~Se existir alguma indisponibilidade, substituir adequadamente o equipamento.~~

Escolher um dos diodos para efetuar a experiência.

Montar os circuitos A e B.

Ligar os multímetros e configurá-los.

Ligar o gerador com a tensão no mínimo.

Variar a tensão de saída na fonte, E, e registrar os valores que surgem no amperímetro e no voltímetro, tendo em conta as flutuações.

Desenhar os gráficos de I em função de V e de  $\ln(I)$  em função de V.

~~Repetir o procedimento anterior, relativos a A e B, para o outro diodo.~~

Analisar os dados e tirar conclusões relevantes.

## Resultados:

### Diodo retificador

#### Polarização direta

Escalar utilizados: amperímetro  $\rightarrow 20\text{ mA}$   
voltímetro  $\rightarrow 2\text{ V}$

$$\text{Incertezas: } n(V)/V = 0,000003$$

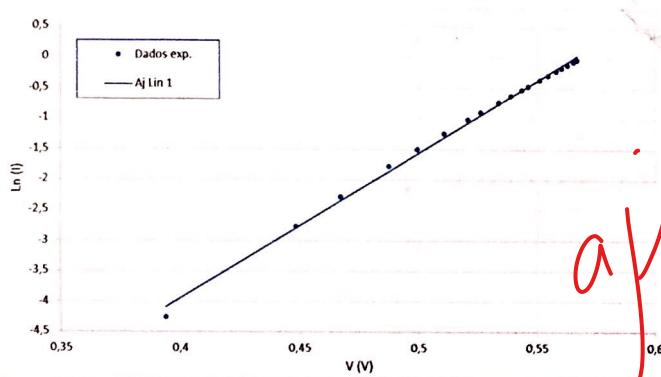
$$n(I)/mA = 0,00005$$

ML  
MB  
Sg

# Tabela de dados experimentais:

V (V)	I (mA)	Ln (I)	Ln (I) a) 1	I a) 1 (mA)	Resíduos de Ln (I) a) 1	Ln (I) a) 2	I a) 2 (mA)	Resíduos de Ln (I) a) 2	Resíduos de I a) 2
0,566955	0,96815	-0,032368245	0,029973267	1,030426988	0,062341512	-0,028394158	0,972005167	0,003974087	0,003855167
0,565430	0,93845	-0,063525701	-0,006368141	0,993652092	0,05715756	-0,060887934	0,94092868	0,002637767	0,00247868
0,562860	0,88970	-0,116870952	-0,067612351	0,934622709	0,049258601	-0,115647936	0,890788783	0,001223016	0,001088783
0,560440	0,84580	-0,167472354	-0,125281996	0,882248077	0,042190358	-0,167211829	0,84602038	0,000260525	0,00022038
0,558100	0,80550	-0,216292076	-0,181045207	0,834397637	0,03524687	-0,217071131	0,804872716	-0,000779055	-0,000627284
0,554680	0,74950	-0,288348961	-0,262545284	0,769091536	0,025803678	-0,289942418	0,748306655	-0,001593457	-0,001193345
0,551120	0,69510	-0,363699559	-0,347381621	0,706535648	0,016317938	-0,36579674	0,693643777	-0,002097182	-0,001456223
0,546140	0,62560	-0,46904409	-0,466005712	0,627471409	0,002986918	-0,471907562	0,623811174	-0,002863472	-0,001788826
0,543500	0,59160	-0,524924548	-0,528969512	0,589211833	-0,004044964	-0,528159082	0,589689541	-0,003234534	-0,001910459
0,538780	0,53480	-0,625862434	-0,64144915	0,526528851	-0,015586716	-0,628729981	0,533268632	-0,002867547	-0,001531368
0,533740	0,48000	-0,733969175	-0,761554527	0,466939992	-0,027585352	-0,736119246	0,478969075	-0,002150071	-0,001030925
0,526190	0,40710	-0,898696423	-0,941474287	0,390052362	-0,042777864	-0,89699007	0,407795249	0,001706353	0,000695249
0,520780	0,36130	-1,018046641	-1,070396924	0,342872396	-0,052350283	-1,012263071	0,363395658	0,00578357	0,002095658
0,510710	0,28840	-1,243406874	-1,310369372	0,269720411	-0,066962499	-1,226828527	0,293221047	0,016578346	0,004821047
0,499490	0,22310	-1,500135178	-1,577746818	0,206439721	-0,07761164	-1,465897487	0,230870695	0,034237691	0,007770695
0,487580	0,16860	-1,780226233	-1,861567261	0,155428842	-0,081341028	-1,719668548	0,17912551	0,060557685	0,01052551
0,467300	0,10230	-2,279845606	-2,344848419	0,095861732	-0,065002813	-2,151782496	0,11627671	0,12806311	0,01397671
0,448550	0,06300	-2,764620553	-2,791669017	0,061318786	-0,027048464	-2,551296131	0,077980527	0,213324421	0,014980527
0,393960	0,01410	-4,261580482	-4,092572292	0,016696231	0,16900819	-3,714466764	0,024368432	0,547113718	0,010268432

eyônia com ajuste linear 1:

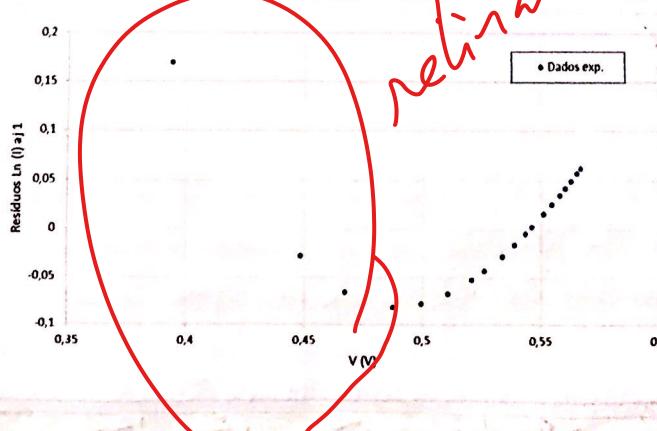


ajuste errado

Matriz de ajuste linear 1:

m	23,8	-13,5	b
sm	0,3	0,2	sb
r <sup>2</sup>	0,997	0,06	sy

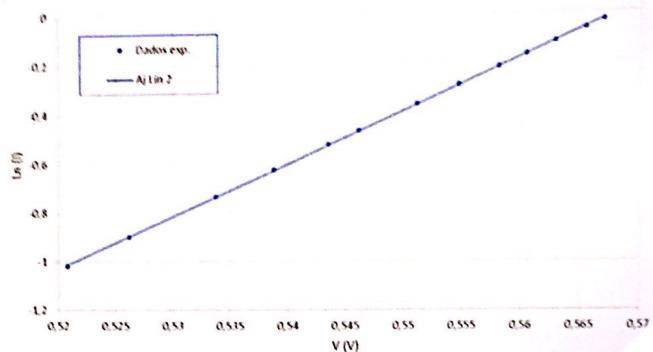
Resíduos (ajuste):



retirar, refazer

Podemos observar que a distribuição de dados anterior não é homogênea na gama experimental. Para melhorar os gráficos experimentais, efectuar-se então um segundo ajuste linear com um menor número de pontos.

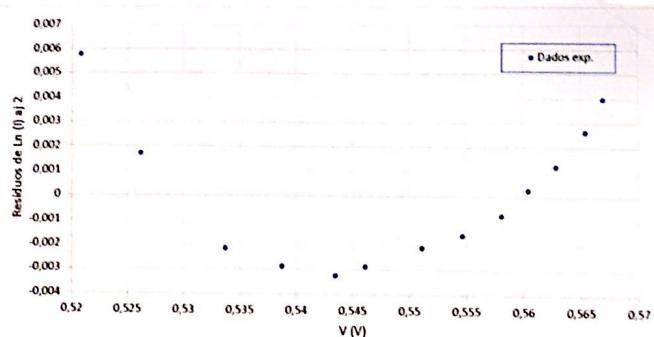
Gráfico com ajuste linear 2:



Matriz de ajuste linear 2:

$m$	21,31	-12,11	$b$
$s_m$	0,06	0,03	$s_b$
$r^2$	0,99992	0,003	$s_y$

Resíduos (ajuste 2):

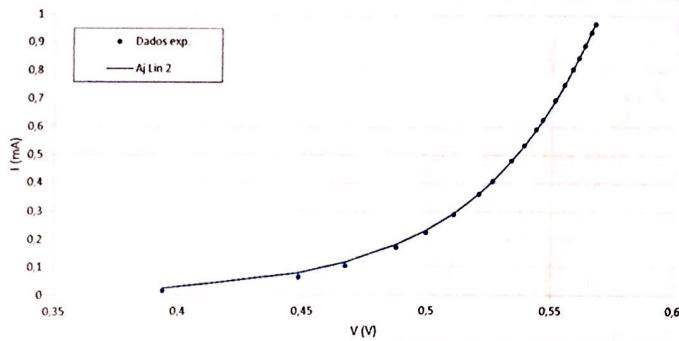


Neste novo ajuste verifica-se uma maior homogeneidade da distribuição de dados, e podemos confirmar que a qualidade do ajuste melhorou ao constatar que temos mais 9's no fator  $R^2$ .

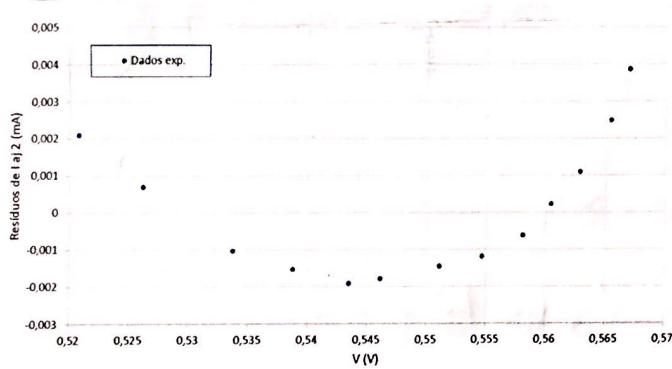
O gráfico de resíduos apresenta uma tendência parabólica, que poderá indicar algum efeito sistemático a influenciar

as medições. No entanto, dada a diferença significativa de dimensão entre os valores experimentais e os resíduos (umas ordens de grandeza), podemos considerar estes resíduos como sendo bastante aceitáveis.

Curva característica do diodo (com ajuste linear 2):



Resíduos de  $I$  (ajuste 2):



A curva observada está de acordo com o esperado.

Em relação à tendência parabólica do gráfico de resíduos, faz-se uma análise análoga à efectuada para os resíduos de  $\ln(I)$ .

Para verificar a lei de Shockley, dada por  $I = I_0 \left( e^{\frac{qV}{nKT}} - 1 \right)$ , podem determinar-se os parâmetros necessários, fazendo uso dos dados da tabela do ajuste linear 2, e calcular os valores de  $\ln(I_D)$  vindos da expressão. Com eles, pode construir-se um gráfico da função teórica, que poderá então ser comparado com o gráfico experimental de  $\ln(I)$ .

Temos que:

$$I_D = I_0 \left( \frac{e^V}{mKT} - 1 \right)$$

De onde vem:

$$\ln(I_D + I_0) = \ln(I_0) + \frac{e^V}{mKT}$$

Para  $I_D \gg I_0$ :

$$\ln(I_D) = \ln(I_0) + \frac{e^V}{mKT}$$

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$e = 1,60 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$T = 293,15 \text{ K}$  (vindo de uma estimativa da temperatura ambiente)

Das equações acima, pode concluir-se que:

$$\rightarrow n = \frac{e}{mKT}$$

$$\rightarrow I_0 = e^n$$

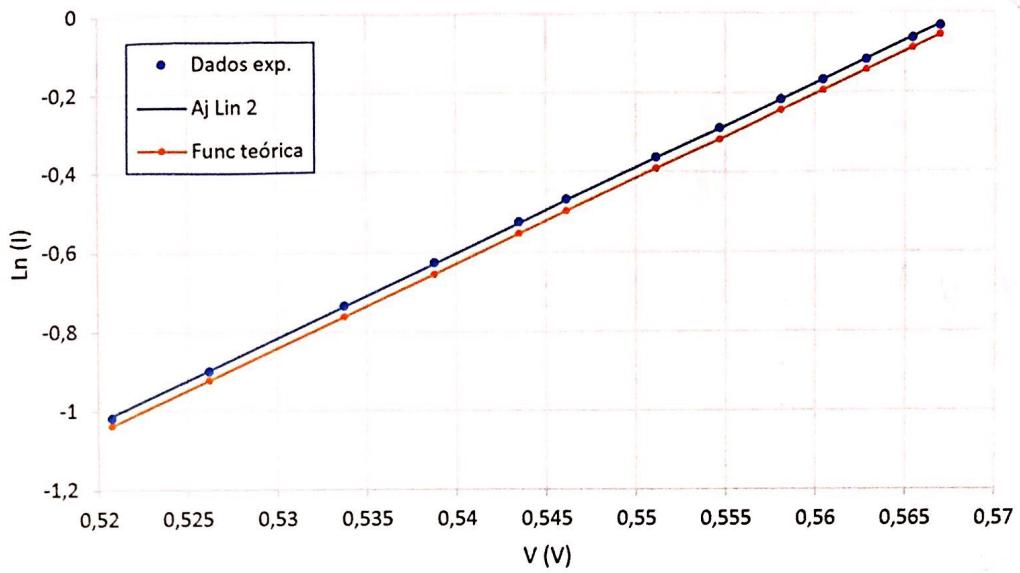
~~$$I_0 = \frac{e}{21,31KT} = 1,86$$~~

$$I_0 = e^{-13,11} = 5,50 \times 10^{-6} \text{ mA}$$

Tabela de dados usados ~~para~~ para o gráfico da função teórica:

V (V)	I (mA)	Ln (I)	Ln (I) teórico
0,566955	0,96815	-0,03237	-0,05522316
0,56543	0,93845	-0,06353	-0,08765025
0,56286	0,8897	-0,11687	-0,14229786
0,56044	0,8458	-0,16747	-0,19375592
0,5581	0,8055	-0,21629	-0,24351289
0,55468	0,7495	-0,28835	-0,31623461
0,55112	0,6951	-0,3637	-0,39193325
0,54614	0,6256	-0,46904	-0,49782628
0,5435	0,5916	-0,52492	-0,55396235
0,53878	0,5348	-0,62586	-0,65432683
0,53374	0,48	-0,73397	-0,76149569
0,52619	0,4071	-0,8987	-0,92203633
0,52078	0,3613	-1,01805	-1,03707274

gráfico da função teórica (e dados experimentais com ajuste 2):



Verifica-se que a função teórica está muito próxima da linha de ajuste linear 2. Isto permite, simultaneamente, verificar a validade da lei de Shockley (como se pretendia) e a fiabilidade dos dados experimentais. De notar que estes condicões só aplicam, no entanto, apenas à gama experimental estudada atrás.

Cálculo de resistências:

V (V)	I (mA)	R estática ( $\Omega$ )	R dinâmica ( $\Omega$ )
0,566955	0,96815	585,6065692	51,34680135
0,56543	0,93845	602,514785	52,71794872
0,56286	0,8897	632,6402158	55,12528474
0,56044	0,8458	662,6152755	58,06451613
0,5581	0,8055	692,8615767	61,07142857
0,55468	0,7495	740,0667111	65,44117647
0,55112	0,6951	792,8643361	71,65467626
0,54614	0,6256	872,9859335	77,64705882
0,5435	0,5916	918,6950642	83,09859155
0,53878	0,5348	1007,442034	91,97080292
0,53374	0,48	1111,958333	103,5665295
0,52619	0,4071	1292,532547	118,1222707
0,52078	0,3613	1441,406034	138,1344307
0,51071	0,2884	1770,839112	171,8223583
0,49949	0,2231	2238,861497	218,5321101
0,48758	0,1686	2891,933571	305,8823529
0,4673	0,1023	4567,937439	477,0992366
0,44855	0,063	7119,84127	1116,359918
0,39396	0,0141	27940,42553	75020,20847

## Polarização inversa

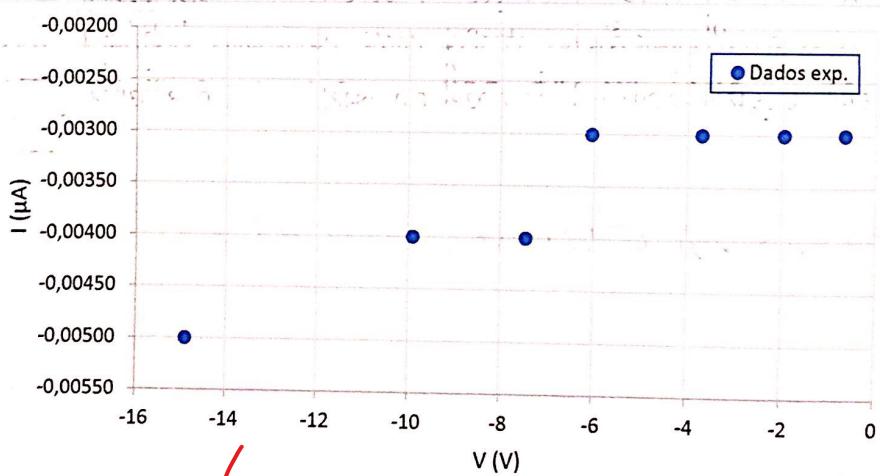
• Escalas utilizadas: amperímetro  $\rightarrow 20 \mu\text{A}$   
 voltmímetro  $\rightarrow 20 \text{ V}$

$$\text{Medidas: } \mu(V)/V = 0,00003 \\ \mu(I)/\mu\text{A} = 0,00005$$

Tabela de dados experimentais:

V (V)	I ( $\mu\text{A}$ )
-0,664050	-0,003
-1,966700	-0,003
-3,709000	-0,003
-6,058400	-0,003
-7,450500	-0,004
-9,903000	-0,004
-14,894000	-0,005

gráficos:



Verifica-se, tal como esperado, que o diodo retificador não conduz bem nesta gama experimental, dadas as valores muito baixos obtidos para a corrente.

Não se verifica aqui a zona de avalanche porque o diodo retificador sobrepassaria na gama experimental respetiva, podendo avançar.

$$I_0 \sim \text{constante}$$

## Líodo Gaseoso

Curva obtida experimentalmente

### Polarização direta

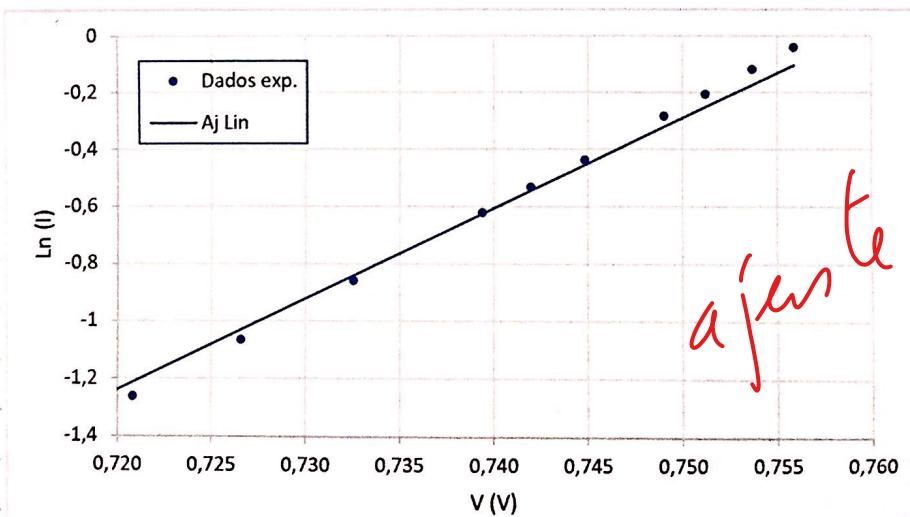
Escalas utilizadas: amperímetro  $\rightarrow 20\text{ mA}$   
voltímetro  $\rightarrow 2\text{ V}$

Incógnitas:  $\mu(V) \frac{V}{V} = 0,000003$   
 $\mu(I) \frac{\text{mA}}{I\text{mA}} = 0,00005$

### Tabela de dados experimentais:

V (V)	I (mA)	Ln (I)	Ln (I) aj	I aj (mA)	Resíduos de ln (I) aj	Resíduos de I aj (mA)
0,755900	0,95930	-0,041551	-0,10500	0,900329	-0,063443662	-0,058971056
0,753690	0,88740	-0,119459	-0,174758	0,83966	-0,055298436	-0,047739702
0,751220	0,81360	-0,206286	-0,252728	0,776679	-0,046441616	-0,036920929
0,749030	0,75300	-0,28369	-0,32186	0,7248	-0,038169449	-0,028199982
0,744830	0,64580	-0,437265	-0,45444	0,634803	-0,017174942	-0,010996872
0,741970	0,58690	-0,532901	-0,544722	0,580003	-0,011820785	-0,006896776
0,739400	0,53670	-0,622316	-0,625848	0,534807	-0,003532478	-0,001892536
0,732560	0,42330	-0,859674	-0,841766	0,430949	0,01790825	0,007648846
0,726570	0,34470	-1,065081	-1,030851	0,356703	0,03422936	0,012003118
0,720820	0,28300	-1,262308	-1,212361	0,297494	0,049947422	0,014494078
0,706640	0,17470	-1,744685	-1,659979	0,190143	0,084705858	0,015442934
0,671570	0,05480	-2,904065	-2,767029	0,062848	0,13703568	0,008048425
0,552500	0,00160	-6,437752	-6,52570	0,001465	-0,087945203	-0,000134702

Gráfica com ajuste linear:



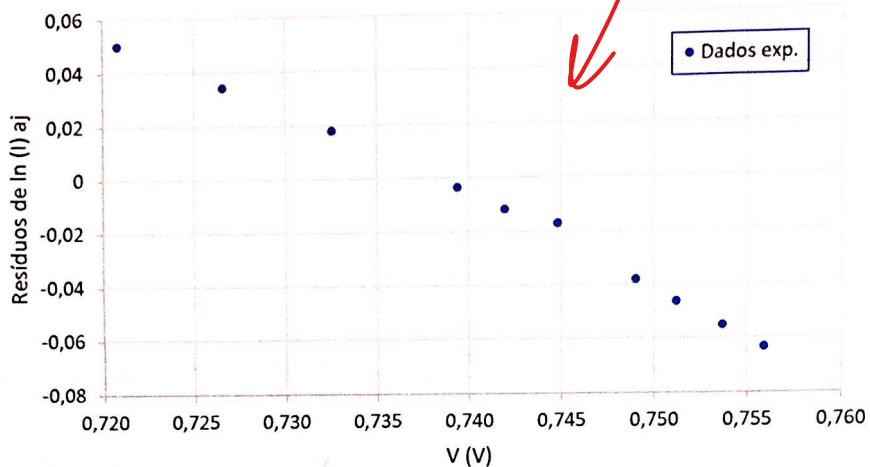
Ajuste linear feito sem os últimos três pontos da tabela, para obter uma distribuição mais homogênea e um melhor  $R^2$ .

Matrizes de ajuste linear:

m	31,6	-24,0	b
sm	0,3	0,3	sb
r2	0,9987	0,07	sy

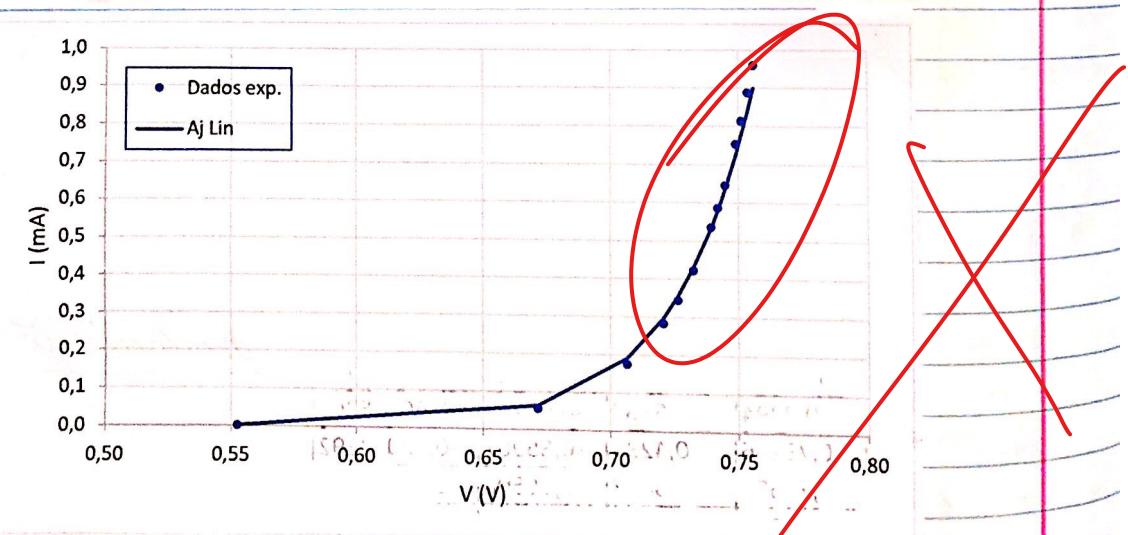
ajuste linear

Resíduos:



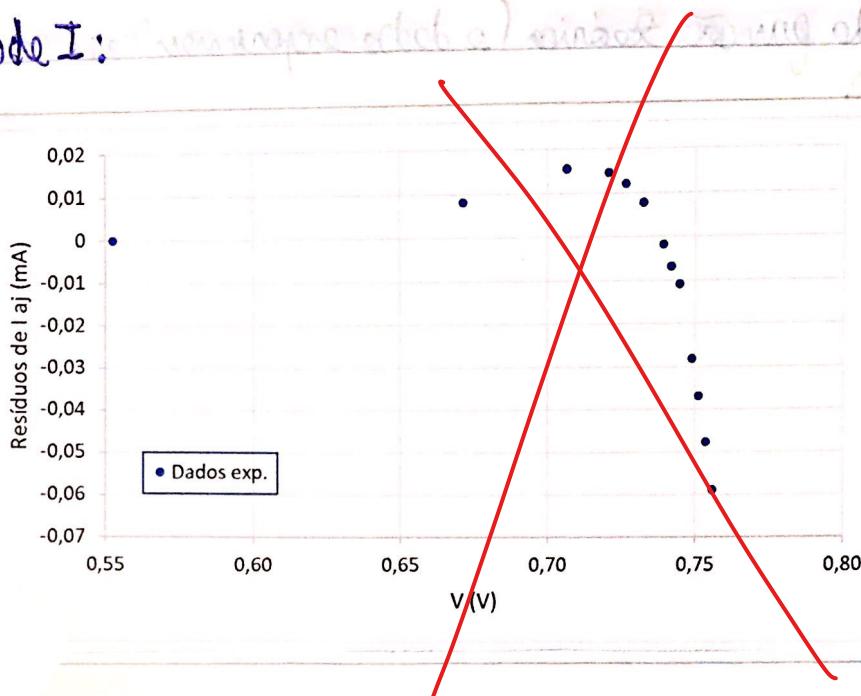
O gráfico de resíduos apresenta uma tendência linear, que poderá indicar um erro sistemático nas medições. No entanto, devido ao baixo valor dos resíduos, estes são aceitáveis.

Curva característica do diodo (com ajuste linear anterior):



A curva observada está de acordo com o esperado, sendo que faltam mais alguns pontos experimentais para que fique mais bacana!

Ruídos de I:



O gráfico de resíduos apresenta, na maioria da gama experimental aqui utilizada, uma tendência linear, em relação à qual se faz uma análise análoga à que foi feita para o gráfico de resíduos anterior.

Verifica-se agora a lei de Shockley.

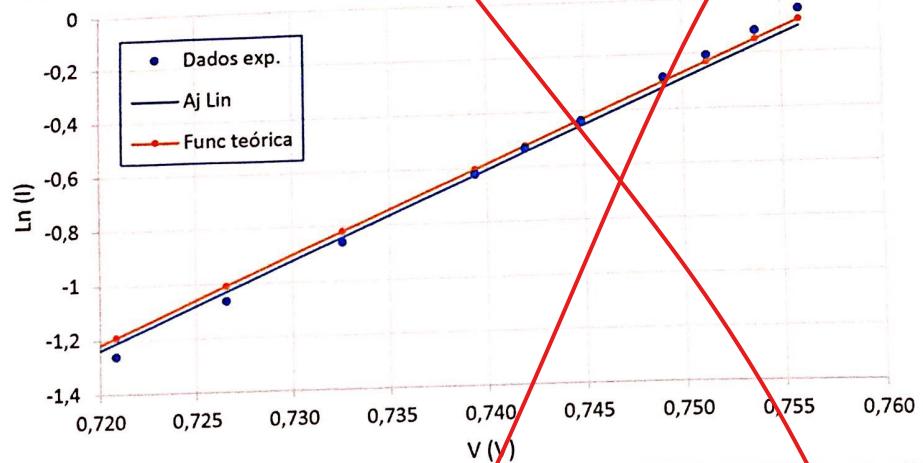
$$n = \frac{e}{31,6RT} = 1,25$$

$$I_0 = e^{-24,0} = 3,78 \times 10^{-11}$$

Tabela de dados usados para o gráfico da função teórica:

V (V)	I (mA)	Ln (I)	Ln (I) teórico
0,7559	0,9593	-0,04155	-0,08178765
0,75369	0,8874	-0,11946	-0,15171278
0,75122	0,8136	-0,20629	-0,22986439
0,74903	0,753	-0,28369	-0,29915671
0,74483	0,6458	-0,43727	-0,43204609
0,74197	0,5869	-0,5329	-0,52253743
0,7394	0,5367	-0,62232	-0,60385307
0,73256	0,4233	-0,85967	-0,82027292
0,72657	0,3447	-1,06508	-1,00979849
0,72082	0,283	-1,26231	-1,19173038
0,70664	0,1747	-1,74469	-1,64039024
0,67157	0,0548	-2,90407	-2,75001656
0,5525	0,0016	-6,43775	-6,51743048

gráfica da função teórica (e dados experimentais com ajuste):



Verifica-se que a função teórica está muito próxima da linha de ajuste linear. Verifica-se então, também aqui, a lei de Shockley.

Álculo de resistências:

V (V)	I (mA)	R estática ( $\Omega$ )	R dinâmica ( $\Omega$ )
0,7559	0,9593	787,9703951	30,73713491
0,75369	0,8874	849,3238675	33,46883469
0,75122	0,8136	923,3284169	36,13861386
0,74903	0,753	994,7277556	39,17910448
0,74483	0,6458	1153,344689	48,55687606
0,74197	0,5869	1264,218777	51,19521912
0,7394	0,5367	1377,678405	60,31746032
0,73256	0,4233	1730,59296	76,2086514
0,72657	0,3447	2107,832898	93,19286872
0,72082	0,283	2547,067138	130,9325946
0,70664	0,1747	4044,876932	292,4937448
0,67157	0,0548	12254,92701	2238,157895
0,5525	0,0016	345312,5	345312,5

Polarização inversa

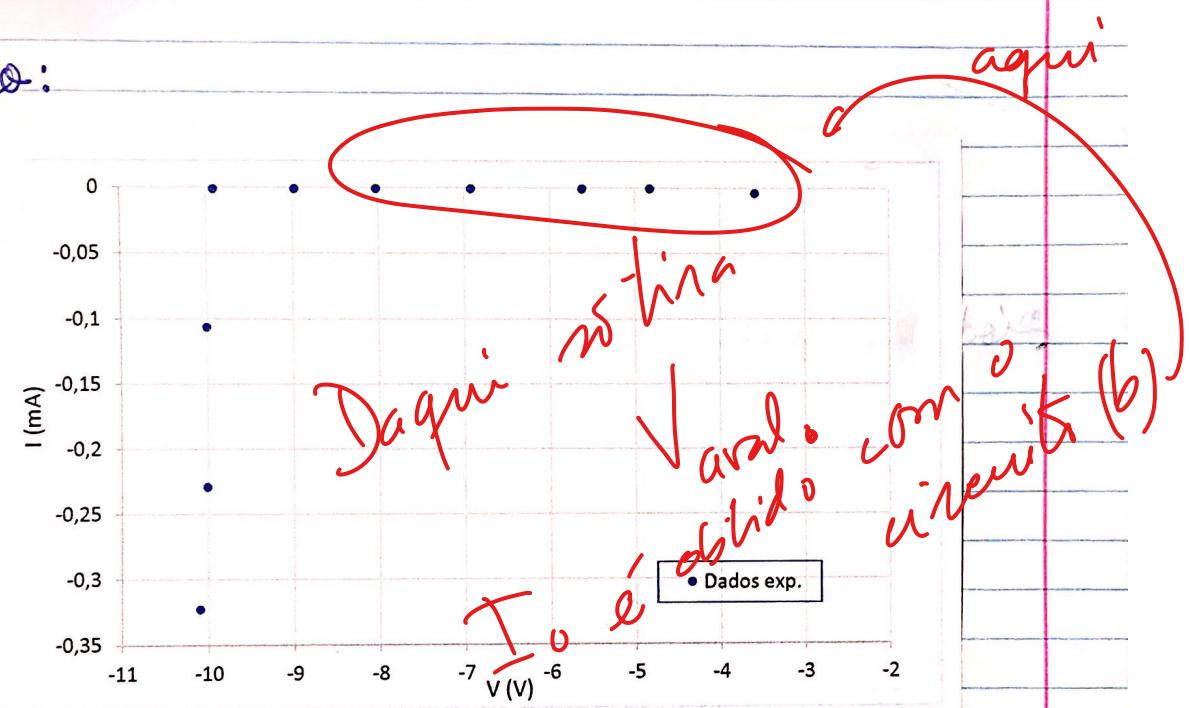
Escalaras utilizadas: amperímetro  $\rightarrow 20 \text{ mA}$   
voltímetro  $\rightarrow 20 \text{ V}$

Muitos:  
 $v(V) \backslash V = 0,0000013$   
 $v(I) \backslash \text{mA} = 0,00005$

## Tabela de dados experimentais:

V (V)	I (mA)
-10,10040	-0,3228
-10,00940	-0,2293
-10,00860	-0,10640
-9,91750	-0,00120
-8,97790	-0,00090
-8,02700	-0,00080
-6,92350	-0,00070
-5,61900	-0,00060
-4,82500	-0,00050
-3,58600	-0,00400

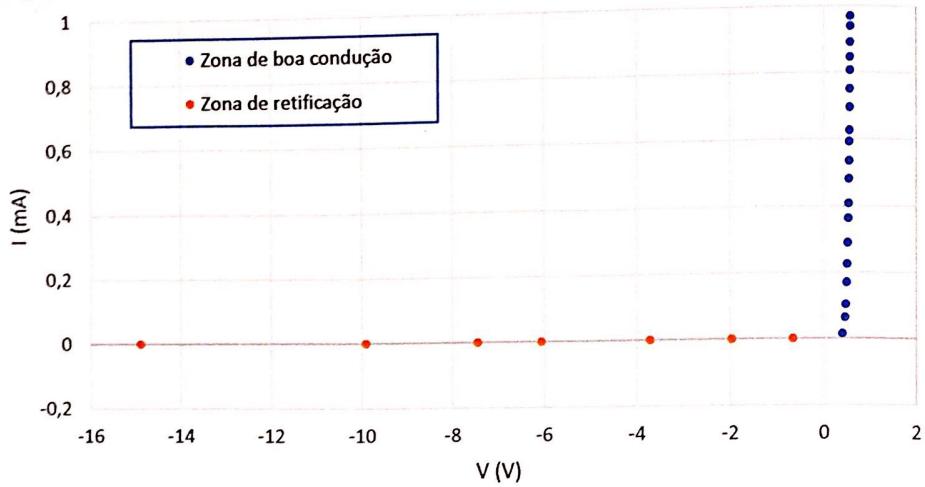
gráfico:



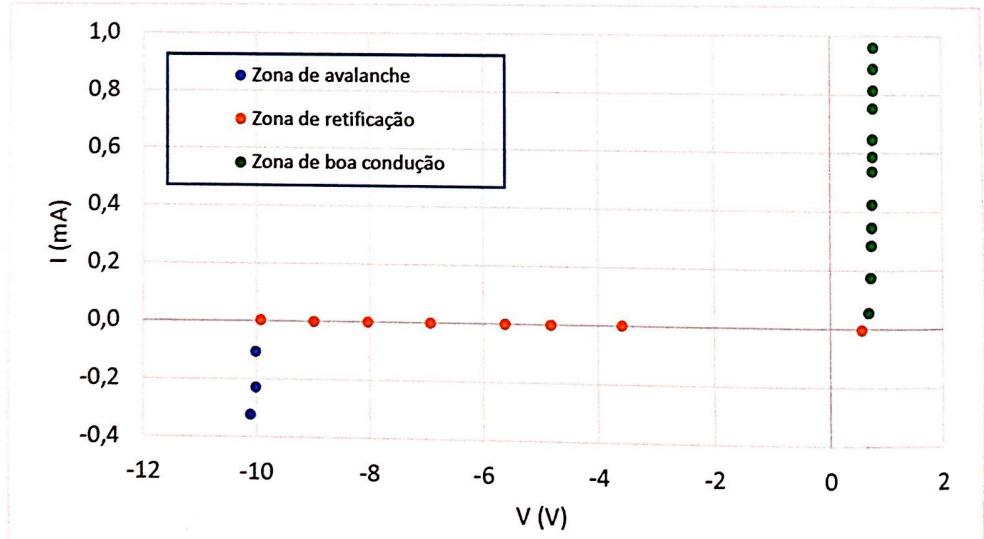
Nesta gama experimental, à medida que se aumenta o módulo da tensão, o valor do corrente vai-se mantendo aproximadamente constante, até um certo valor a partir do qual aumenta a pouca em módulo. Isto corresponde ao esperado. Na primeira gama referida, verificamos a gama de Ia (zona de condução de diodo Zener), e na segunda verificamos a sua gama de anulação.

Perfis experimentais completos dos diodos:

Diodo retificador:



Diodo Zener:



Vemos os perfis estão de acordo com o esperado, permitindo confirmar a fiabilidade dos dados experimentais.

### Observações e Conclusão:

Foi possível, tal como planeado, verificar a curva característica de ambos os diodos, bem como os seus perfis gerais, e em ambos os casos estes revelaram-se de acordo com o esperado.

As zonas de boa condução e de retificação confirmaram-se em ambos os diodos, bem como a zona de avalanche no diodo Zener.

Em ambos os diodos, na gama experimental correspondente à zona de boa condução, foi possível verificar a validade da lei de Shockley.