

# TB3 - Diodos

Grupo 3 - Maria Helene Nunes da Silveira

21/03

## Objetivos:

- Traçar a ~~curva~~ curva (mais linear) característica de diodos retificadores e gerar, parametrizando-a
- Analisar as resistências internas aparentes nos vários gabinetes de teste, com diodos retificadores e geradores

## Materiais:

- Amperímetro (multímetro) na gama mA - mA com resolução de 4,5 dígitos ①
- Voltímetro (multímetro) na gama 0,1 mV - 15 V com resolução de 4,5 dígitos ②
- Fonte de tensão 0 - 15 V ③
- Resistência de 15 K $\Omega$  de proteção do circuito
- Conjunto de vários diodos montados em placas com terminais
- Comutador
- Fios elétricos para ligação do circuito

① Keithley 197 Nicelost DMM

② Keithley 2110 5 1/2 Digit Multimeter

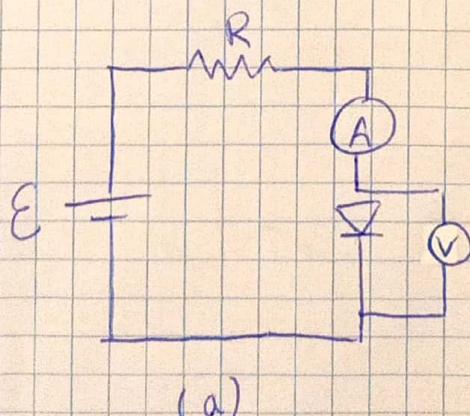
③ Leybold

com o diodo retificador

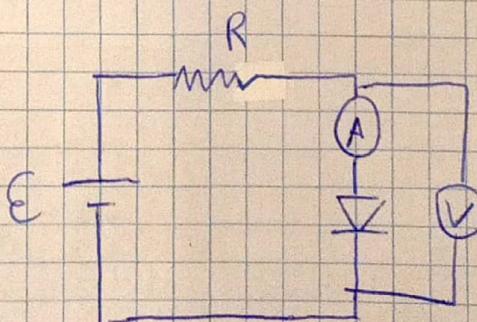
## Procedimento:

1. Montar os circuitos (a) e (b) ~~na base~~ abaixo fonda o cuidado de considerar em cada

um dos circuitos as formas  $I(V)$  adequadas às approximações



(a)



(b)

2. Varia os valores de  $V$  e registra correspondentes valores de  $I$

3. Redige a mesma expressão com o diodo Zener

Análise de dados

4. Representa graficamente  $\ln(I_D)$  vs  $V_D$

5. Calcula a resistência estática equivalente do diodo em alguns pontos experimentais da curva  $I_D(V_D)$ . Estima igualmente a resistência dinâmica num ponto de conduta fixa

6. Representa graficamente  $\ln(I_D)$  em função de  $V_D$  na gama adequada da curva  $I_D(V_D)$ , isto é, na gama em que a tensão é aparente linear

7. Verifica a validade da equação  $\ln(I_D + I_0) = \ln(I_0) + \frac{cV}{mK^T}$  com

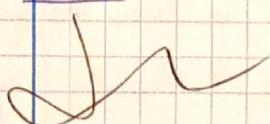
$I_0 + I_0 \approx I_D$ , calculando a regressão linear de  $\ln(I_D)$  em função de  $V_D$

8. Compara a qualidade do ajuste linear obtido. Determina os parâmetros  $I_0$  e  $c$  e as respectivas incertezas.

9. Considera o valor de  $I_0$  obtido pelo ajuste com o valor obtido no gráfico

(Nota: determinar  $I_0$  fazendo uma média dos pontos sobre a linha de seteig)

Dados



### Díodo retificador

Circuito (a)

Ende: +V	2mA	
	V (V)	I (mA)
0,36790	0,0079	
0,39020	0,0152	
0,46227	0,1070	
0,48667	0,1948	
0,50069	0,2688	
0,51240	0,3495	
0,51989	0,4118	
0,53145	0,5282	
0,53840	0,6126	
0,54436	0,6952	
0,54970	0,7773	
0,55410	0,8513	
0,55796	0,9233	

0,56448	1,0575
0,56936	1,1624
0,57176	1,2297
0,57625	1,3482
0,58052	1,4720
0,58450	1,5963
0,58821	1,7242
0,59023	1,7984
0,59194	1,8461
0,59275	1,8899
0,59354	1,9218
0,59507	1,9850

Circuit (B)

Endeckt IV	1V	2mA
	V(V)	I(mA)
	0,44135	0,0558
	0,47935	0,1261
	0,50722	0,2011
	0,51939	0,2622
	0,54080	0,3244
	0,55242	0,3749
	0,56154	0,4131
	0,57062	0,4605
	0,58322	0,5260
	0,59256	0,5761
	0,60415	0,6415
	0,61718	0,7178
	0,63027	0,7982
	0,64870	0,9170
	0,66723	1,0399
	0,68258	1,1483
	0,69580	1,2396
	0,70988	1,3417
	0,71687	1,3933
	0,72893	1,4830
	0,74477	1,6033
	0,75579	1,6880
	0,76925	1,7931
	0,78304	1,9016
	0,79355	1,9857



## Amônia de dedos

T (K)	291.15
e (C)	1.6E-19
k (J/K)	1.40E-23

Tabela ~~de constantes~~: temperatura do laboratório no momento da experiência ( $T$ ), carga do elétrodo ( $e$ ) e constante de Boltzmann ( $k$ )

### ① Circuito (a) - Diodo retificador

V (V) $\pm E-05$	I (mA) $\pm E-04$	ln(I)	Ajuste	Resíduos	Ajuste EXP
0.36790	0.0079	-4.8409	---	---	---
0.39020	0.0152	-4.1865	---	---	---
0.46227	0.1070	-2.2349	---	---	---
0.48667	0.1948	-1.6358	---	---	---
0.50069	0.2688	-1.3138	---	---	---
0.51240	0.3495	-1.0513	---	---	---
0.51989	0.4118	-0.8872	---	---	---
0.53145	0.5282	-0.6383	---	---	---
0.53840	0.6126	-0.4900	---	---	---
0.54436	0.6952	-0.3636	-0.3614	-0.0022	0.6967
0.54970	0.7773	-0.2519	-0.2511	-0.0009	0.7780
0.55410	0.8513	-0.1610	-0.1601	-0.0008	0.8520
0.55796	0.9233	-0.0798	-0.0804	0.0006	0.9227
0.56448	1.0575	0.0559	0.0543	0.0016	1.0558
0.56936	1.1694	0.1565	0.1551	0.0014	1.1678
0.57176	1.2297	0.2068	0.2047	0.0020	1.2272
0.57625	1.3482	0.2988	0.2975	0.0013	1.3465
0.58052	1.4720	0.3866	0.3857	0.0009	1.4707
0.58450	1.5963	0.4677	0.4679	-0.0003	1.5967
0.58821	1.7242	0.5448	0.5446	0.0002	1.7239
0.59023	1.7984	0.5869	0.5863	0.0006	1.7974
0.59154	1.8461	0.6131	0.6134	-0.0003	1.8467
0.59275	1.8899	0.6365	0.6384	-0.0019	1.8934
0.59354	1.9218	0.6533	0.6547	-0.0015	1.9246
0.59507	1.9850	0.6856	0.6863	-0.0007	1.9864

$$R_{DC} (K\Omega) \\ 46.5696$$

$$0.6500$$

$$0.2998$$

Tabela 1.1.: Medição de dados e constante elétrica e  $R_{DC}$  determinada  
para ~~alguns~~ alguns valores

Ajuste linear		
m	20.661	-11.608
s(m)	0.020	0.012
	0.999986876	0.001315107
	1066700.853	14
	1.844864772	2.42131E-05

	Resultado	Incerteza
$I_0$ (mA)	9.0895E-06	1.046E-07
n	1.90	0.09

Tabela 1.3.: Determinar  $I_0$  e  $n$   
e respectivas incertezas

Tabela 1.2.: Dados ajuste linear

Curva característica  $I(V)$

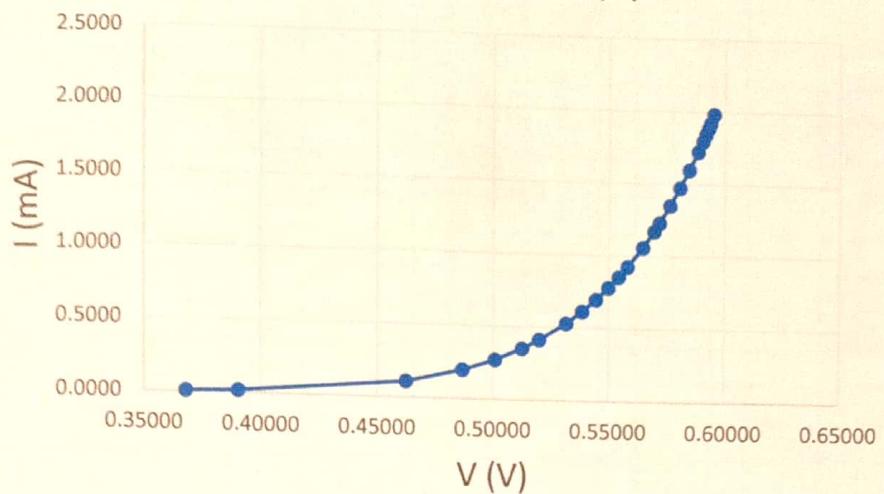


Gráfico 1.1.

$\ln(I)$  em função da tensão  $V$

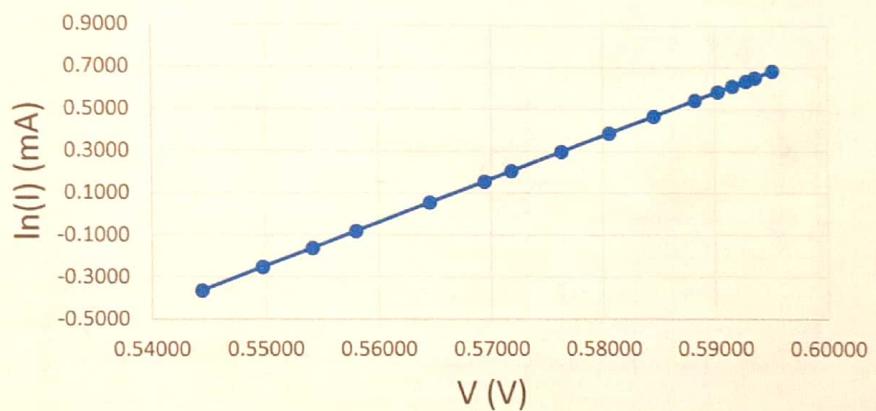


Gráfico 1.2.

Resíduos de  $\ln(I)$  em função da tensão  $V$

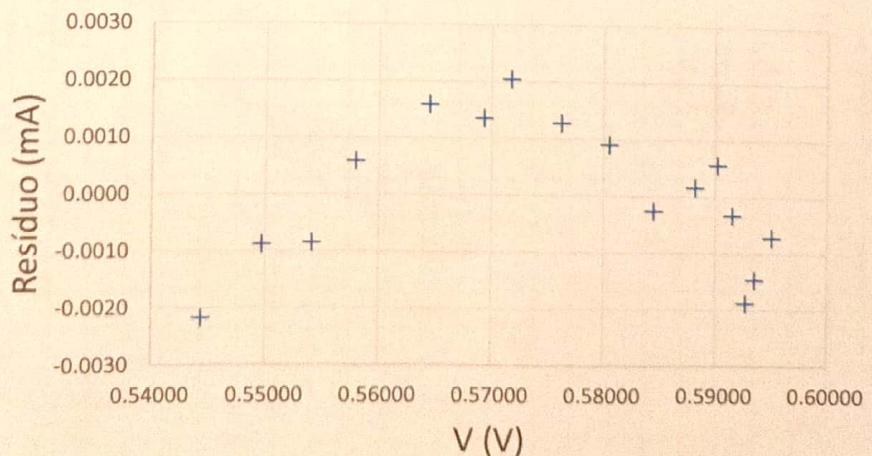


Gráfico 1.3.

### $\ln(I)$ e ajuste linear em função da tensão V

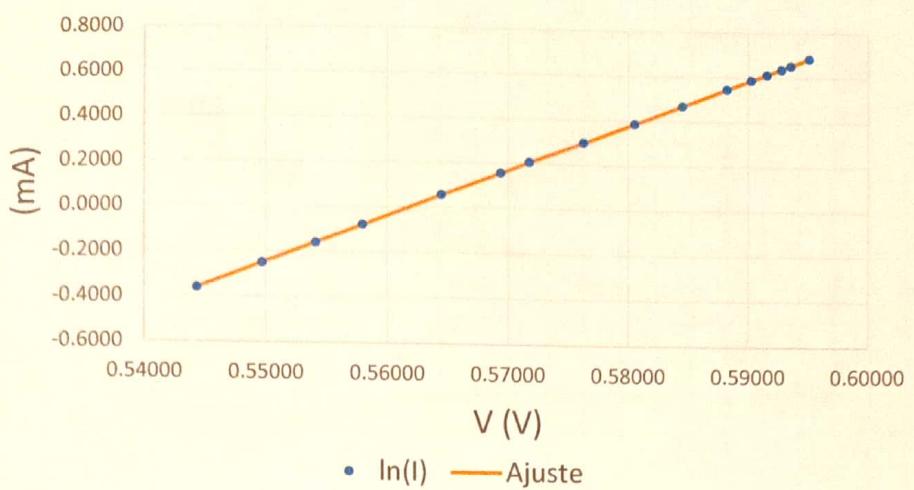


Grafico 1.4.

### Curva característica I(V) com ajuste exponencial

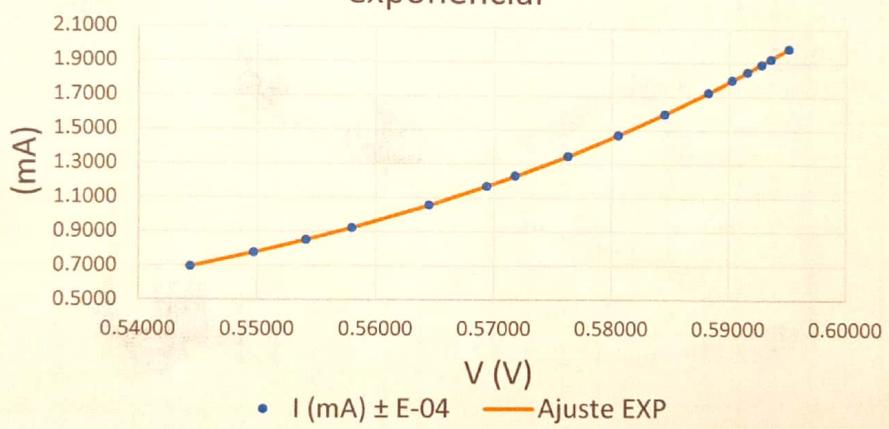


Grafico 1.5.

2) Circuito (b) - Diodo retificador

V (V) $\pm E-05$	I (mA) $\pm E-04$	ln(I)	Ajuste	Resíduos	Ajuste EXP
0.44135	0.0558	-2.8860	---	---	---
0.47935	0.1241	-2.0867	---	---	---
0.50722	0.2011	-1.6040	---	---	---
0.51939	0.2422	-1.4180	---	---	---
0.54080	0.3244	-1.1258	---	---	---
0.55242	0.3749	-0.9811	---	---	---
0.56154	0.4171	-0.8744	---	---	---
0.57062	0.4608	-0.7748	---	---	---
0.58322	0.5260	-0.6425	---	---	---
0.59256	0.5761	-0.5515	---	---	---
0.60415	0.6415	-0.4439	---	---	---
0.61718	0.7178	-0.3316	---	---	---
0.63027	0.7982	-0.2254	-0.1703	-0.0551	0.8434
0.64890	0.9170	-0.0866	-0.0681	-0.0186	0.9342
0.66723	1.0399	0.0391	0.0325	0.0066	1.0331
0.68298	1.1483	0.1383	0.1190	0.0193	1.1263
0.69580	1.2396	0.2148	0.1893	0.0255	1.2084
0.70988	1.3417	0.2939	0.2666	0.0273	1.3055
0.71687	1.3933	0.3317	0.3050	0.0267	1.3566
0.72893	1.4830	0.3941	0.3711	0.0229	1.4494
0.74477	1.6033	0.4721	0.4581	0.0140	1.5810
0.75579	1.6880	0.5235	0.5186	0.0050	1.6796
0.76925	1.7931	0.5839	0.5924	-0.0085	1.8084
0.78304	1.9016	0.6427	0.6681	-0.0254	1.9506
0.79355	1.9857	0.6860	0.7258	-0.0398	2.0664

R<sub>de</sub> (kΩ)

7.9095

0.8598

0.3996

Tabela 2.1: Medidas de tensão e corrente térmica e R<sub>de</sub>  
determinadas para ~~alguns~~ alguns valores

Ajuste linear			
m	5.4883	-3.6294	b
s(m)	0.1603	0.1153	s(b)
	0.990697562	0.02853175	
	1171.485755	11	
	0.95366067	0.00895467	

Tabela 2.2: Dados ajuste linear

	Resultado	Incerteza
I <sub>0</sub> (mA)	2.6531E-02	3.060E-03
n	7.15	1.30

Tabela 2.3: Determinação de I<sub>0</sub> e n com as medições inseridas

Curva característica I(V)

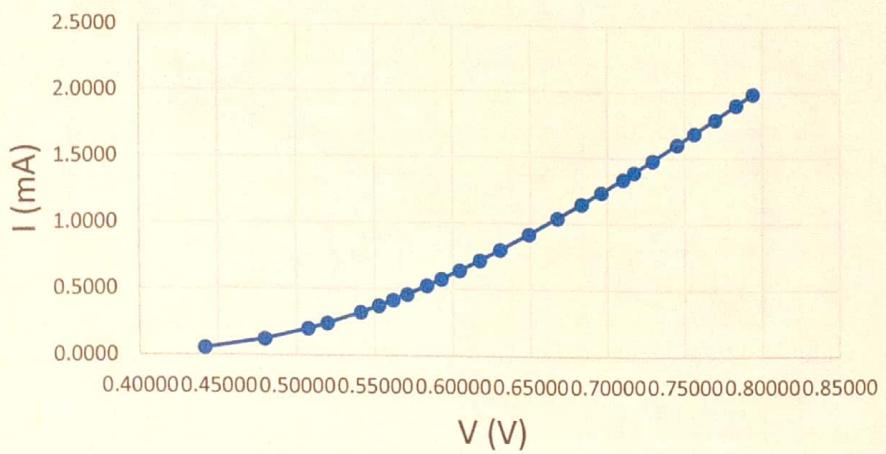


Gráfico 2.1.

$\ln(I)$  em função da tensão  $V$

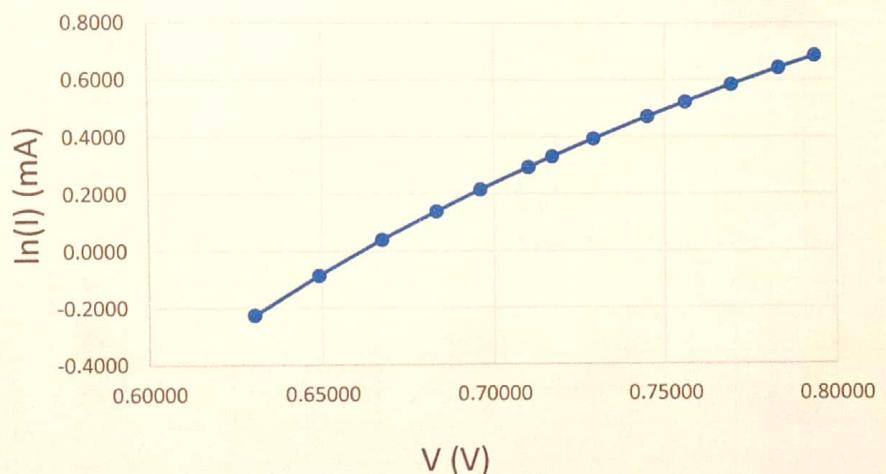


Gráfico 2.2.

Resíduos de  $\ln(I)$  em função da tensão  $V$

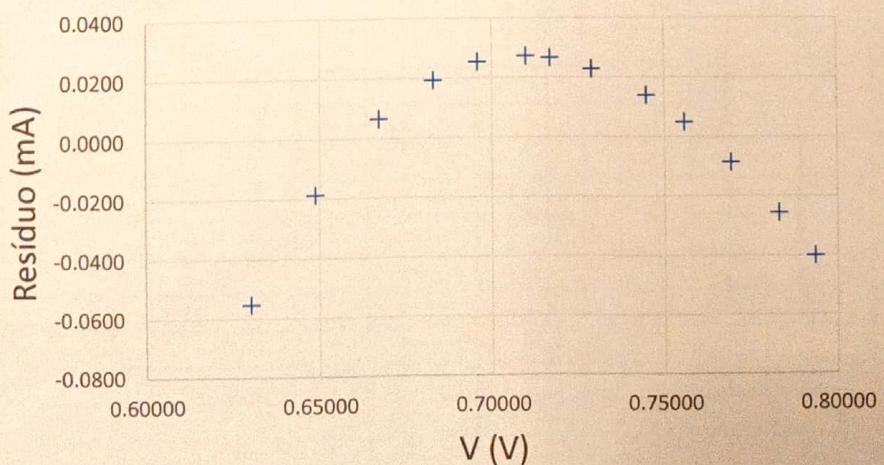
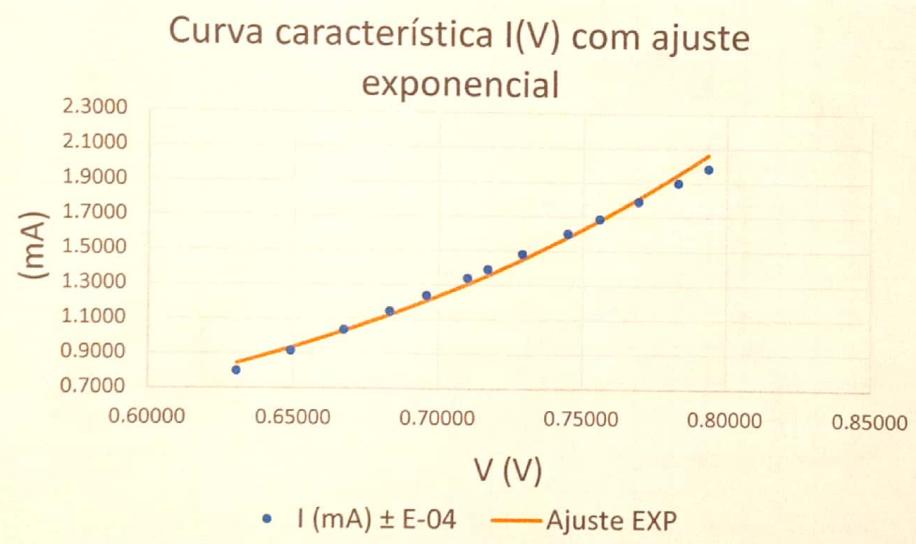
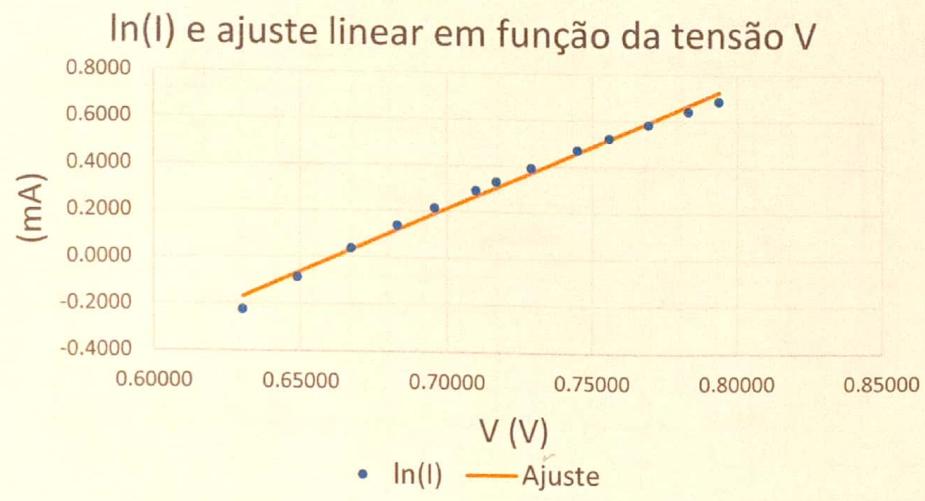


Gráfico 2.3.



③ Circuito (c) - Diodo Zener

V (V) $\pm E-05$	I (mA) $\pm E-04$	In(I)	Ajuste	Resíduos	Ajuste EXP
0.59117	0.0048	-5.3391	---	---	---
0.63350	0.0187	-3.9792	---	---	---
0.65652	0.0394	-3.2340	---	---	---
0.67458	0.0711	-2.6437	---	---	---
0.68702	0.1072	-2.2331	---	---	---
0.71390	0.2642	-1.3310	---	---	---
0.72383	0.3711	-0.9913	-0.9976	-0.0063	0.3688
0.73073	0.4700	-0.7550	-0.7563	-0.0013	0.4694
0.73570	0.5587	-0.5821	-0.5826	-0.0004	0.5585
0.74192	0.6929	-0.3669	-0.3651	0.0018	0.6941
0.74602	0.7992	-0.2241	-0.2217	0.0024	0.8011
0.75016	0.9217	-0.0815	-0.0770	0.0046	0.9259
0.75384	1.0495	0.0483	0.0517	0.0034	1.0531
0.75626	1.1434	0.1340	0.1363	0.0023	1.1460
0.75777	1.2049	0.1864	0.1891	0.0027	1.2082
0.76101	1.3481	0.2987	0.3024	0.0037	1.3531
0.76318	1.4578	0.3769	0.3783	0.0013	1.4598
0.76528	1.5717	0.4522	0.4517	-0.0005	1.5710
0.76721	1.6819	0.5199	0.5192	-0.0007	1.6806
0.76808	1.7381	0.5528	0.5496	-0.0032	1.7325
0.76916	1.8013	0.5885	0.5874	-0.0012	1.7992
0.76986	1.8464	0.6132	0.6118	-0.0014	1.8438
0.77040	1.8827	0.6327	0.6307	-0.0020	1.8789
0.77097	1.9206	0.6526	0.6506	-0.0020	1.9168
0.77173	1.9747	0.6804	0.6772	-0.0032	1.9684

$R_{DE}$  ( $K\Omega$ )

123.1604

0.8139

0.3908

Tabla 3.1. Medidas de tensão e corrente díptica e  $R_{DE}$  determinados para

Algunos valores

Ajuste linear			
m	34.965	-26.306	b
s(m)	0.047	0.035	s(b)
0.999969865	0.0029071		
564108.0307	17		
4.767326861	0.0001437		

Tabla 3.2. Dados ajuste linear

	Resultado	Incerteza
$I_0$ (mA)	3.7620E-12	1.325E-13
$\eta$	1.12	0.03

Tabla 3.3. Determinar de  $I_0$ ,  $\eta$  e respectivas incertezas

### Curva característica $I(V)$

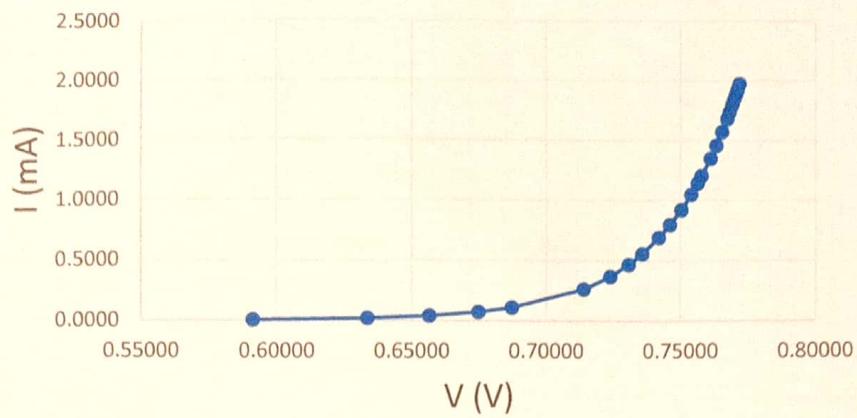


Gráfico 3.1.

### $\ln(I)$ em função da tensão $V$

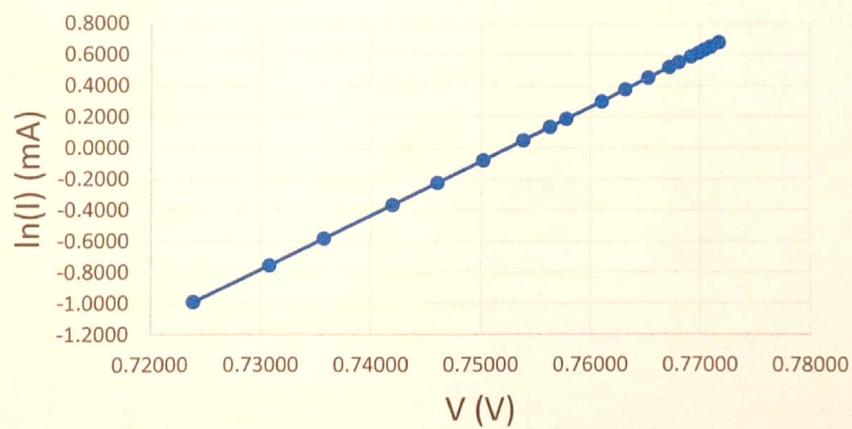


Gráfico 3.2.

### Resíduos de $\ln(I)$ em função da tensão $V$

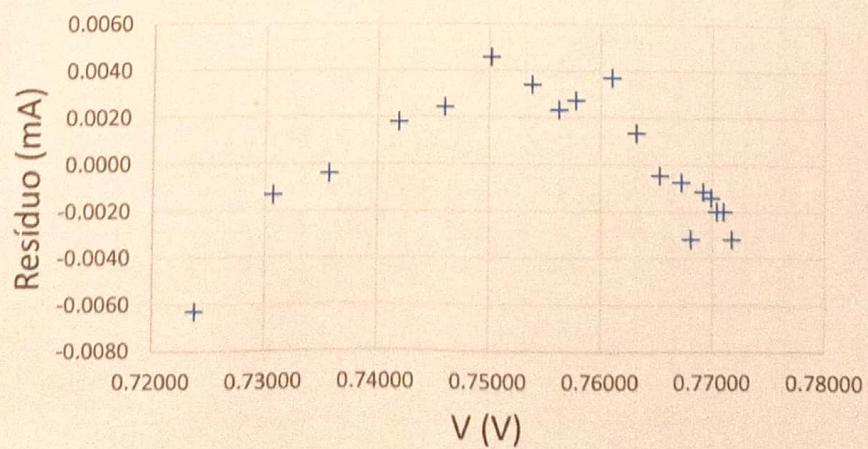


Gráfico 3.3

### $\ln(I)$ e ajuste linear em função da tensão V

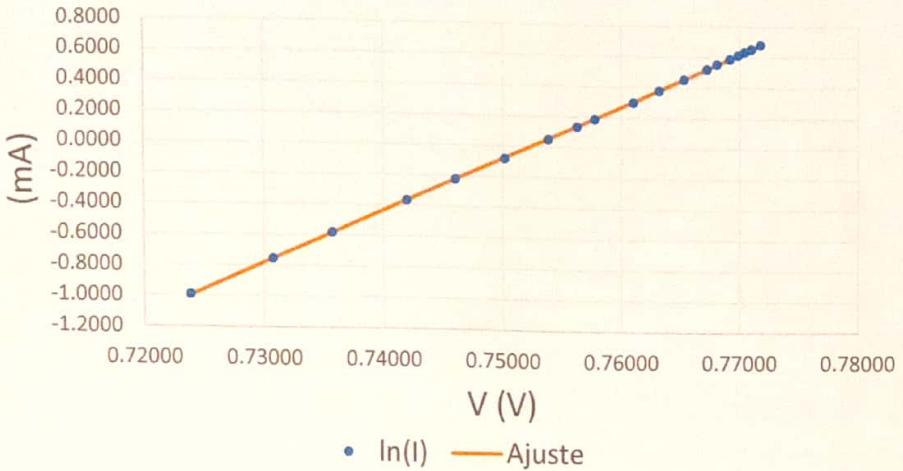


Gráfico 3.4.

Curva característica  $I(V)$  com ajuste exponencial

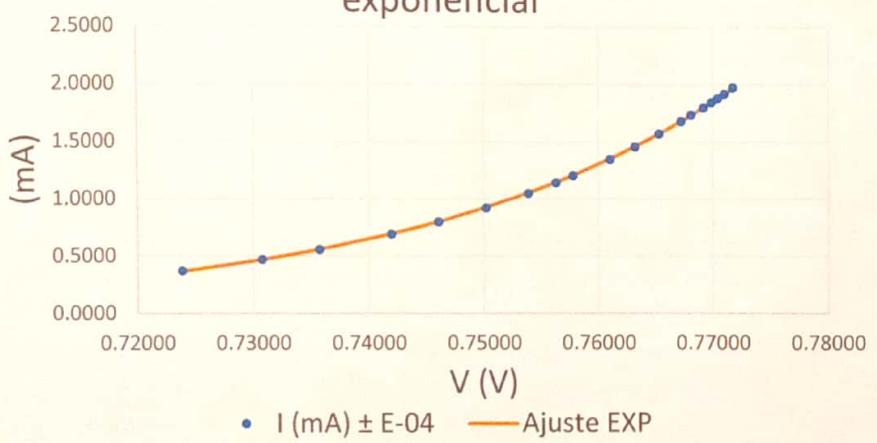


Gráfico 3.5.

(4) Circuito (b) - Diodo Zener

V (V) ± E-05	I (mA) ± E-04	ln(I)	Ajuste	Resíduos	Ajuste EXP
0.65003	0.0289	-3.5439	---	---	---
0.67499	0.0592	-2.8268	---	---	---
0.70226	0.1191	-2.1278	---	---	---
0.72440	0.1944	-1.6378	---	---	---
0.73966	0.2602	-1.3463	---	---	---
0.76020	0.3659	-1.0054	---	---	---
0.76519	0.3939	-0.9317	---	---	---
0.77846	0.4730	-0.7487	---	---	---
0.79062	0.5500	-0.5978	---	---	---
0.80618	0.6550	-0.4231	---	---	---
0.81562	0.7219	-0.3259	---	---	---
0.82827	0.8136	-0.2063	---	---	---
0.85249	0.9970	-0.0030	---	---	---
0.86431	1.0896	0.0858	---	---	---
0.88009	1.2160	0.1956	---	---	---
0.89086	1.3037	0.2652	---	---	---
0.90038	1.3822	0.3237	0.3319	-0.0082	1.3936
0.90949	1.4579	0.3770	0.3785	-0.0015	1.4600
0.92020	1.5475	0.4366	0.4332	0.0034	1.5422
0.92948	1.6258	0.4860	0.4806	0.0054	1.6171
0.93851	1.7035	0.5327	0.5268	0.0059	1.6935
0.94788	1.7835	0.5786	0.5747	0.0039	1.7765
0.95504	1.8451	0.6125	0.6113	0.0013	1.8427
0.96400	1.9232	0.6540	0.6570	-0.0031	1.9291
0.96999	1.9749	0.6805	0.6877	-0.0071	1.9891

R<sub>D</sub> (kΩ)

22.4924

1.0180

0.4912

Tabela 4.1.: Medidas de tensão e corrente elétrica e R<sub>D</sub>

determinados para alguns valores

Ajuste linear		
m	5.1107	-4.2696 b
s(m)	0.0823	0.0772 s(b)
	0.998188016	0.005641962
	3856.169087	7
	0.122748544	0.000222822

Tabela 4.2.: Dados ajuste linear

	Resultado	Incerteza
I <sub>0</sub> (mA)	1.3987E-02	1.079E-03
n	7.68	1.50

Tabela 4.3.: Determinações de I<sub>0</sub> e n e respectivas incertezas

### Curva característica I(V)

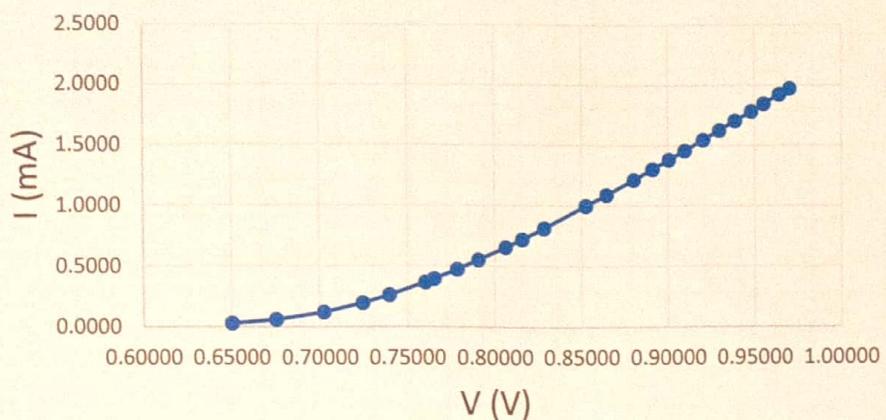


Gráfico 4.1.

### $\ln(I)$ em função da tensão $V$

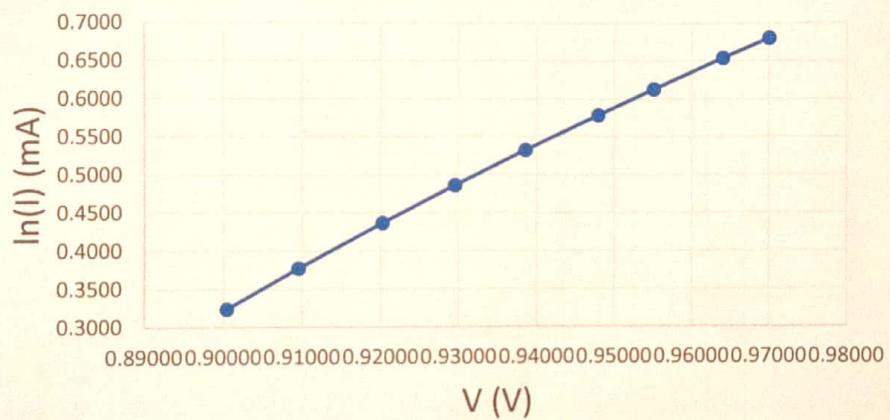


Gráfico 4.2.

### Resíduos de $\ln(I)$ em função da tensão $V$

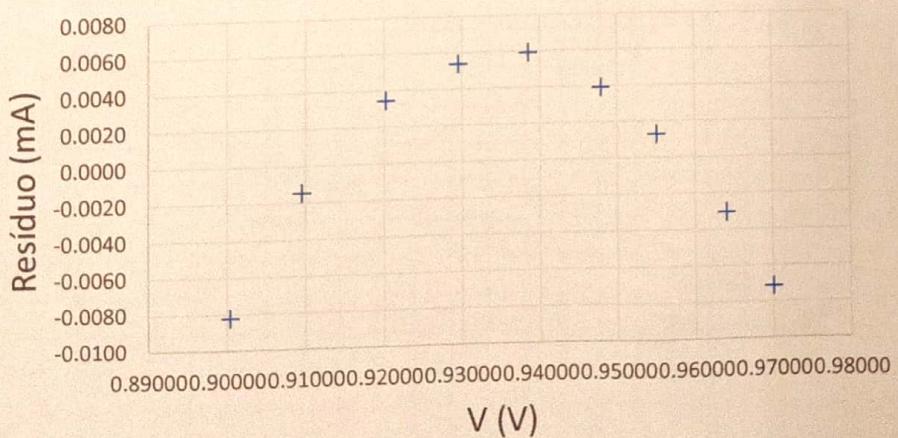


Gráfico 4.3.

### $\ln(I)$ e ajuste linear em função da tensão V

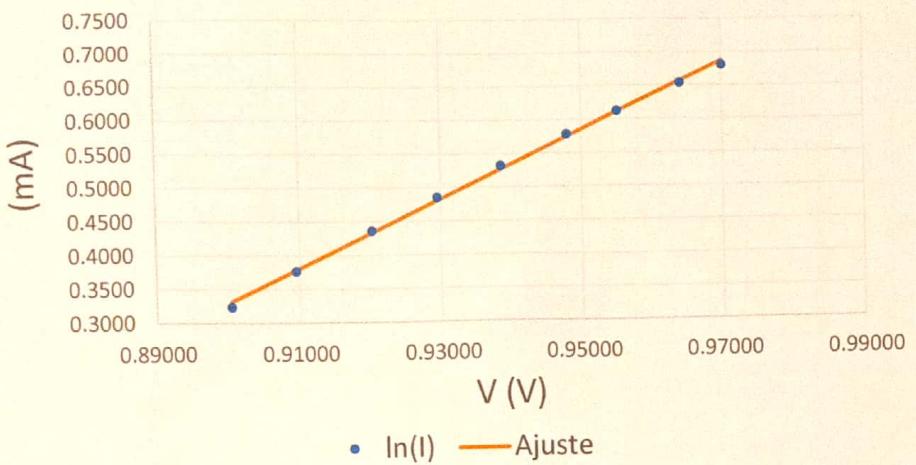


Gráfico 4.4.

### Curva característica I(V) com ajuste exponencial

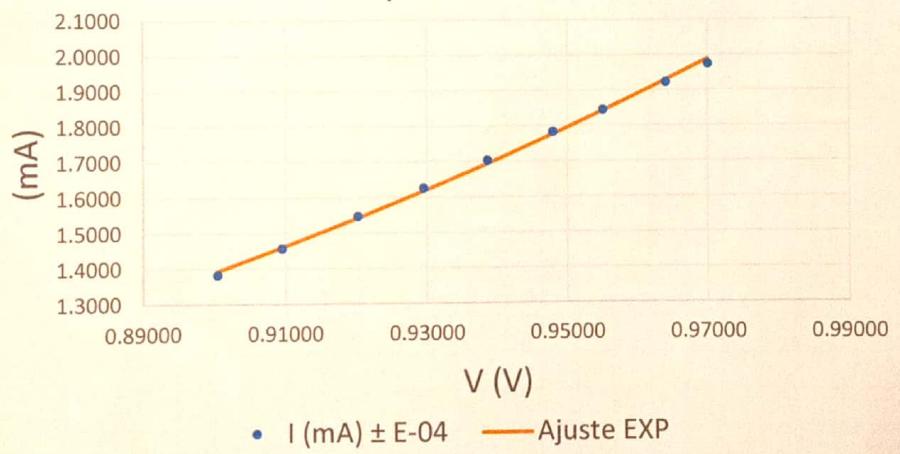


Gráfico 4.5.

Notas:

- O valor de  $T$  (temperatura) corresponde a  $18^\circ\text{C}$ , uma estimativa de temperatura do laboratório no momento de realização da experiência.
- De acordo com a fórmula (1) do procedimento,  ~~$\ln(I_0)$~~  em (declin.) corresponde a  $\frac{e}{mkT}$  e  $b$  corresponde a  $\ln(I_0)$ , pelo que  $I_0$  é calculada por  $\exp(b)$  e  $m$  por  $\frac{e}{mkT}$ . A incerteza de  $I_0$  é dada

$$\text{por } \sqrt{\left(\frac{\partial I_0}{\partial b} \Delta(b)\right)^2 + \left(\frac{\partial I_0}{\partial m} \Delta(m)\right)^2}$$

## Discussões

### Círcuito (a) - Diodo retificador

- Observe o gráfico 1.1., a curva é linear e aponta evidente a partir da volta 0.54936 do gráfico 1.1., pelo que apenas esses valores são apresentados nos instantes gráficos. Além disso, ~~apenas esses valores~~
- Observe o gráfico 1.1. e a Tabela 1.1. a curva característica  $I(V)$  não apresenta tendência linear a partir dos valores 0.54936 V e 0.6952 mA, pelo que apresentam ~~os~~ ~~apenas~~ apresentados nos instantes gráficos e apenas esses são os mais adequados para realizar o ajuste linear. Além disso, a ~~s~~ apresenta de todos os valores no gráfico 1.3 (resíduos) resultaria num ~~o~~ tendencial parabólico.
- De acordo com as tabelas 1.1 e 1.3,  $I_0$  tem uma ordem de grandeza ~~maior~~ menor do que a ordem de grandeza dos valores de ~~corrente~~ corrente de diodo medidos ~~no gráfico~~, pelo que a equação ~~do procedimento~~ (1) do procedimento experimental não é válida, dado que é possível considerar que  $I_0 + I_0 \approx I_0$ .
- Temos que o valor de  $M$  encontra-se entre 1 e 2 (fisicamente o diodo não constitui um gerador).
- Pelos dois ~~parâmetros~~ parâmetros ~~encontrados~~ referidos acima, temos que a regressão linear realizada foi adequada.

### Círcuito (b) - Diodo retificador

- Observe o gráfico 2.1 e a tabela 2.1., a curva característica  $I(V)$  não apresenta tendências lineares a partir dos valores 0.63027 V e 0.7982 mA, pelo que apenas esses são apresentados nos instantes gráficos e apenas estes são os mais adequados para realizar o ajuste linear. Ainda assim, o gráfico 2.2 tem uma ligera curvatura e o gráfico 2.3 (resíduos) tem uma tendência parabólica.
- De acordo com as tabelas 2.1. e 2.3,  $I_0$  tem uma ordem de grandeza praticamente coincidente com as ordens de grandeza dos valores de corrente de diodo medidos, pelo que

a equação (1) do procedimento não é válida, sustentando assim o valor de  $m$  tomado anteriormente. Assim, temos que a regressão linear baseada na equação (1) não é mais adequada para analisar os dados experimentais.

### Círcuito (a) - Dióxido Zinco

→ Observando o gráfico 3.1. e a Tabela 3.1., a curva característica IV) não apresenta tendência linear a partir dos valores 0.72383 V e 0.3711 mA, pelo que apenas esses são apresentados no respetivo gráfico e apenas estes são os mais adequados para realizar o ajuste linear. Além disso, a apresentação de todos os valores no gráfico 3.3 (resíduos) mostra uma tendência parabólica.

3.1. 3.3.

→ De acordo com as tabelas ~~3.1.~~ e ~~3.3.~~,  $I_0$  tem um valor de grandeza muito menor que os valores de grandeza dos valores de corrente de dióxido medida, pelo que a equação (1) do procedimento experimental não é válida, dado que é falso considerar que  $I_0 + I_0 \approx I_0$ .

→ Temos que o valor de  $m$  se encontra entre 1 e 2 (fornecido o dióxido zinco constituído por Germanio), sendo um valor válido.

→ Pelos dois parâmetros referidos acima, temos que a regressão linear feita ~~no~~ é bastante adequada.

### Círcuito (b) - Dióxido Zinco

→ Observando o gráfico 4.1. e a Tabela 4.1., a curva característica IV) não apresenta tendência linear a partir dos valores 0.90038 V e 1.3822 mA, pelo que apenas estes são apresentados no respetivo gráfico e apenas estes são os mais adequados para realizar o ajuste linear. Assim, o gráfico 4.2 tem uma ligeira curvatura e o gráfico ~~4.3.~~ (resíduos) tem uma tendência parabólica.

→ De acordo com as tabelas 4.1. e 4.3.,  $I_0$  tem um valor de grandeza praticamente ~~0~~ coincidente com os valores de grandeza dos valores de

conforme os dados medidas, pelo que a equação (1) do procedimento não é válida, resultando num valor da  $\eta$  totalmente incorrecto. Assim, tem-se que ~~a equação (1)~~ a regressão linear obtida na equação (1) não é a mais adequada para analisar os dados experimentais.

Análise geral

→ Em todos os circuitos e diodos, verifica-se que a resistência estática,  $R_{DC} = \frac{V}{I}$  ~~do diodo~~

~~do diodo~~, diminui drasticamente com o aumento de tensão, o que pode ser explicado pelo efeito Zener. Esta observação justifica também a tendência curva / parabólica no ajuste linear  $\ln(I)$  e nos ~~valores~~ resultados do ajuste (o diodo é um condutor mais óhmico).

→ Nos circuitos (a), comparativamente aos circuitos (b), para ambos os diodos, tanto os resultados como o ajuste linear  $\ln(I)$  apresentam uma ~~maior~~ menor tendência parabólica, resultando em valores de  $I_0$  e  $\eta$  muito mais adequados (aliás, o circuito (a) como diodo Zener resultou em valores mais certos). Assim, verifica-se que quando

$R_{DC} \ll R_V$  ~~Fazendo de~~ ~~que~~ ~~o resultado~~ (tal como têm os valores de tensão e corrente elétrica mais elevados, que se utilizados para o ajuste linear), o circuito (a) é o mais adequado — o que se comete na medida de corrente é muito desprecível. Para  $R_{DC} \approx R_V$ , ( $R_{DC} \gg R_A$ ), o circuito (b) não é o mais adequado — o que se comete na medida de tensão é muito desprecível —; no entanto, os valores certos devidos de  $R_{DC}$  ~~correspondem~~ aos valores de  $V$  e  $I$  iniciais, que não apresentam uma tendência linear e por isso não são utilizados na experiência. Assim, conclui-se que o circuito (a) é o mais adequado a este experimento.

→ Nós fomos concedidos valores de polarização imposta, pelo que, para o diodo Zener, não foi estabelecida a zona avalanche, tal que não foi possível determinar a resistência dinâmica,  $R_{AE}$ , do diodo, nem fonte de corrente fixa. Como tal, nos fontes anteriores, para a resistência do diodo comodore — em ação a resistência estática,  $R_{DC}$ .

(\*) (diminui mais, ~~mais~~ drasticamente no circuito (a) do que no circuito (b))

## Conclusão

- A experiência só bem mede a polarização direta ( $I(V)$ ), mas que não permite parametrizar a curva característica  $I(V)$  dos diodos e eliminam as tendências parabólicas dos dados resultantes do feito. Sabe-se que o circuito (b) não é adequado para a parametrização da curva, mas ainda é útil para esta experiência.
- No foi realizada a experiência para uma polarização inversa (apenas para polarização direta), tal que não foi obtida a curva características do diodo Zener na sua totalidade. Além disso, não foi possível cumprir o segundo objetivo do procedimento, uma vez que não se calculou a resistividade dinâmica dos diodos.