

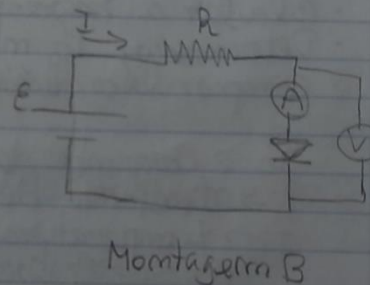
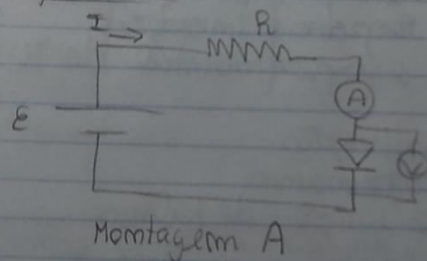
28/03/2022

Trabalho 3B Traçado da Curva Característica de Diodos

Objetivos

- Traçar a curva característica de diodos retificadores e zener referente à corrente em função da tensão
- Analisar e observar as resistências internas aparentes de diodos retificadores e zener, nas várias gamas de tensão.

Esquemas



Materiais:

- 2 multímetros para servir como amperímetro e volímetro
- Fonte de tensão variável
- Resistência de proteção
- Placa com diodos montados
- Fios eletrônicos

Procedimento

- Montar um dos circuitos acima representados para polarização direta
- Ligar os dois multímetros
- Ligar a fonte de tensão, depois de solicitado pelo docente.
- Conferir que a corrente e tensão lidas nos multímetros estejam praticamente nulas.

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eV}{m k T}} - 1 \right) \quad (1)$$

- Variar a tensão de saída da fonte (E) e registrar os valores lidos nos multímetros referentes à corrente e tensão.
- Fazer as medições para polarização inversa.
- Montar o outro circuito e registrar os mesmos valores.
- Usar o outro diodo e repetir todo o processo.
- Representar graficamente a curva $I_D(V_D)$.
- Calcular a resistência estática ($R = \frac{V}{I}$) do diodo em alguns pontos da curva.
- Estimar a resistência dinâmica ($R = \frac{\delta V}{\delta I}$) num ponto de condução direta.
- Representar graficamente $\ln(I_D)$ em função de V_D na gama em que a tensão se apresenta linear.
- Calcular a expressão linear de $\ln(I_D)$ em função de V_D .
- Determinar I_0 , n e respectivas incertezas.
- Comparar valor teórico e experimental de I_0 .

$I_0 \rightarrow$ Corrente de saturação

$k \rightarrow$ constante de Boltzmann

$T \rightarrow$ temperatura de junção de Kelvin

Curva característica de um diodo

$$\hookrightarrow I = I_0 \left(e^{\frac{eV}{m k T}} - 1 \right)$$

Incerteza Fonte $\Rightarrow 0,1 \text{ V}$

Incerteza Voltímetro $\Rightarrow 0,00001 \text{ V}$

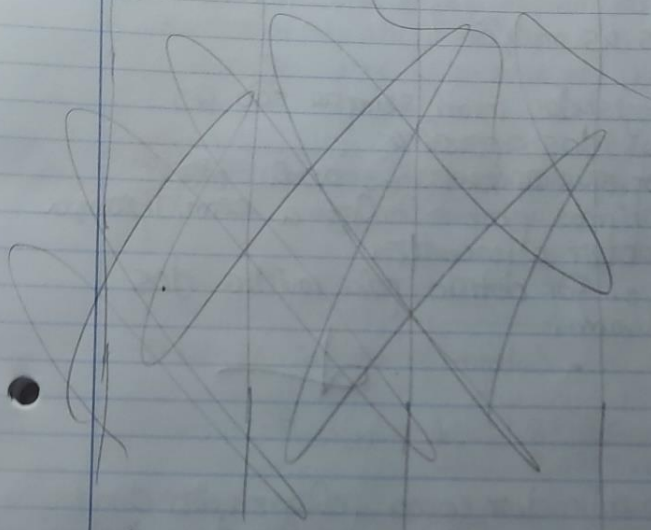
Incerteza amperímetro $\Rightarrow 0,0001 \text{ mA}$

Polarização Circuito A

Dieta

Diodo Retificador

~~Apresentar~~ ~~Gráfico~~ ~~Tempo~~



+

Os dados retirados estão no Excel!!

Vamos fazer as primeiras medições com o diodo Zener!

Está montado o circuito A.
Polarização Direta.

Atenção: Ter sempre a tensão da fonte nula quando se liga o aparelho.

Amperímetro \Rightarrow Temos em 1º lugar ativada a escala de 20 mA

Os valores registados nos multímetros são praticamente nulos, para 0V na fonte de tensão

Vamos começar com as medições!

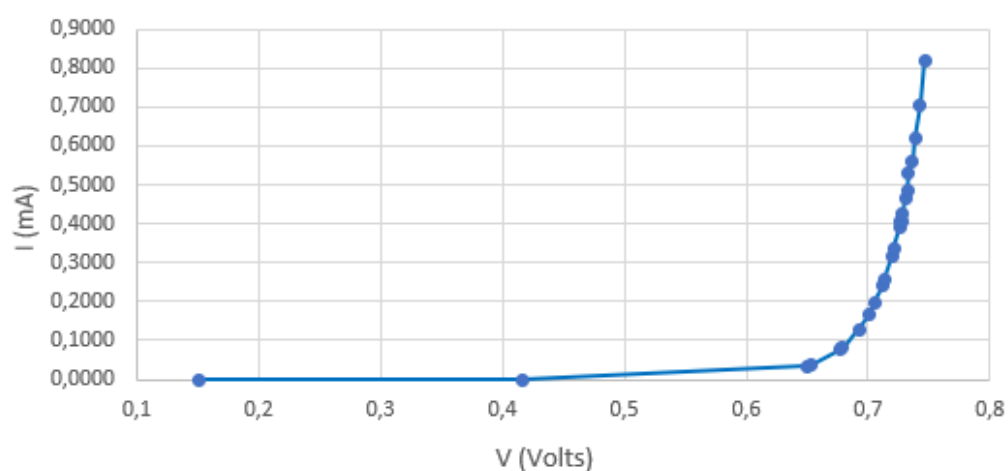
0,013 mA
9009 V

00

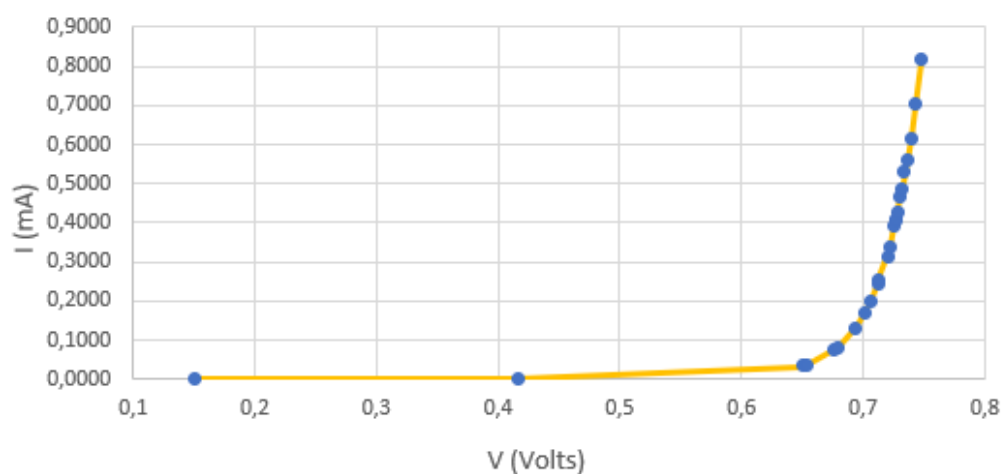
Díodo Zener (polarização direta)

Vf (±0,1V)	V volt. (±0,00001V)	I (±0,0001mA)	ln(I)	u(ln(I))	ln(I) aj.	Resíduos	exp(ln(I) aj.)
0,1	0,15077	0,0001	-9,0	0,8	-20,4	11,412	1,4E-09
0,4	0,41672	0,0001	-9,1	0,9	-11,4	2,337	1,1E-05
1,1	0,65057	0,0336	-3,395	0,003	-3,481	0,086	0,031
1,2	0,65300	0,0359	-3,327	0,003	-3,399	0,072	0,033
1,8	0,67632	0,0754	-2,585	0,001	-2,608	0,023	0,074
1,9	0,67903	0,0817	-2,505	0,001	-2,516	0,012	0,081
2,7	0,69279	0,1293	-2,045	0,001	-2,050	0,005	0,129
3,3	0,70128	0,1690	-1,778	0,001	-1,762	-0,016	0,172
3,7	0,70545	0,1971	-1,624	0,001	-1,621	-0,003	0,198
4,3	0,71219	0,2431	-1,4143	0,0004	-1,3923	-0,022	0,2485
4,4	0,71319	0,2552	-1,3657	0,0004	-1,3584	-0,007	0,2571
5,3	0,71983	0,3154	-1,1539	0,0003	-1,1333	-0,021	0,3220
5,7	0,72137	0,3374	-1,0865	0,0003	-1,0811	-0,005	0,3392
6,4	0,72563	0,3904	-0,9406	0,0003	-0,9367	-0,004	0,3919
6,7	0,72680	0,4065	-0,9002	0,0002	-0,8971	-0,003	0,4078
6,7	0,72728	0,4071	-0,8987	0,0002	-0,8808	-0,018	0,4145
7,0	0,72851	0,4260	-0,8533	0,0002	-0,8391	-0,014	0,4321
7,6	0,73076	0,4661	-0,7634	0,0002	-0,7628	-0,001	0,4663
7,8	0,73238	0,4860	-0,7215	0,0002	-0,7079	-0,014	0,4927
8,1	0,73293	0,5290	-0,6368	0,0002	-0,6893	0,053	0,5019
8,9	0,73601	0,5596	-0,5805	0,0002	-0,5849	0,004	0,5572
9,8	0,73885	0,6175	-0,4821	0,0002	-0,4886	0,007	0,6135
11,1	0,74260	0,7039	-0,3511	0,0001	-0,3615	0,010	0,6966
12,8	0,74693	0,8188	-0,1999	0,0001	-0,2147	0,015	0,8068

Curva característica de I(V)



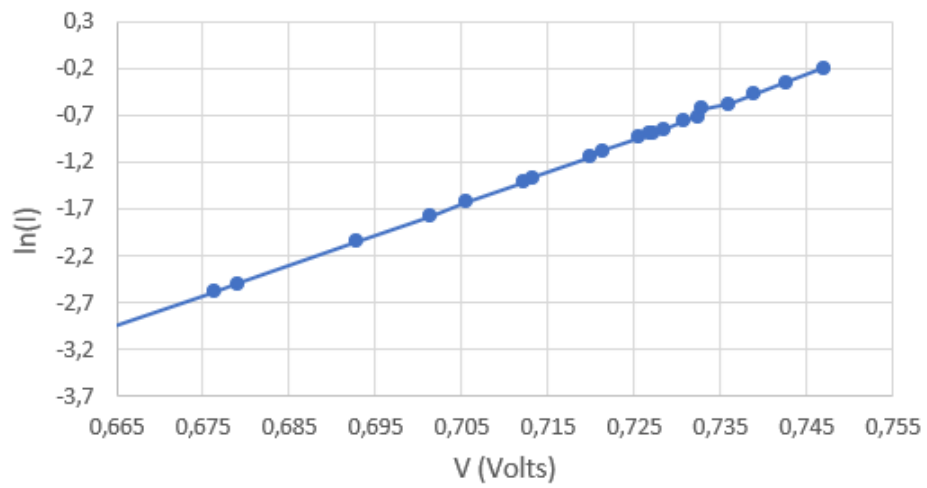
Curva característica de I(V) com ajuste



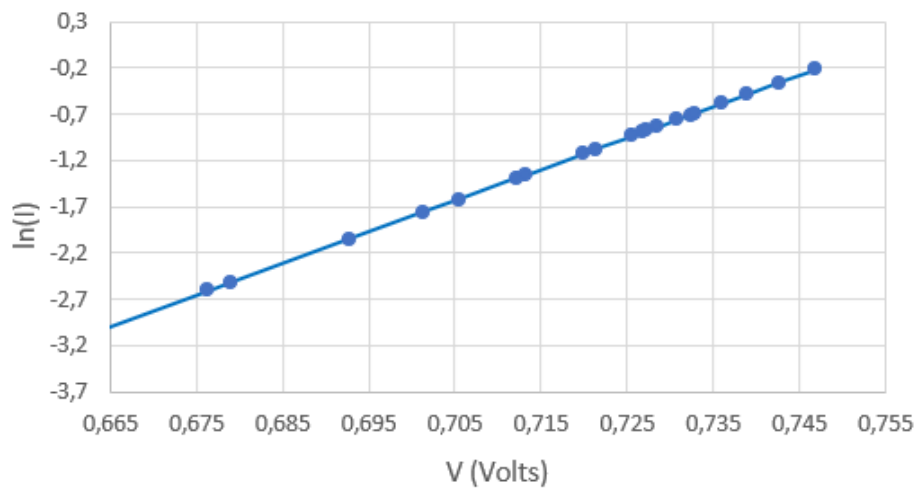
m	33,9	-25,5	b
u(m)	0,2	0,1	u(b)
r ²	0,9993	0,02	u(y)
V (V)	I (A)	R estática (Ω)	
0,65300	3,59E-05	18189,41504	
0,71219	0,000243	2929,617441	
0,74260	0,000704	1054,9794	

T(k)	292,65
e(C)	1,6E-19
k (J/k)	1,38E-23
lo (mA)	8E-12
η	1,17
u(lo)	1E-12
u(η)	0,03

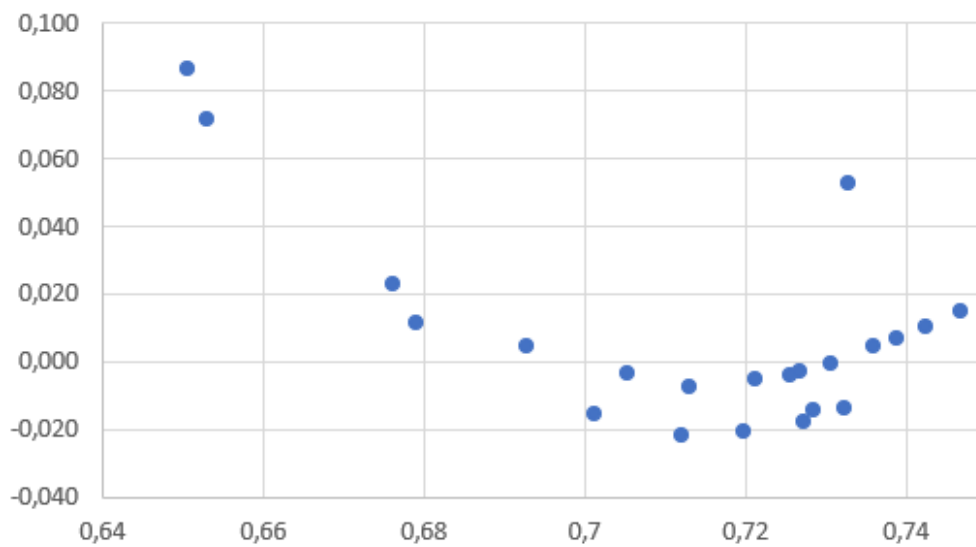
$\ln(I)$ em função de V



$\ln(I)$ após ajuste



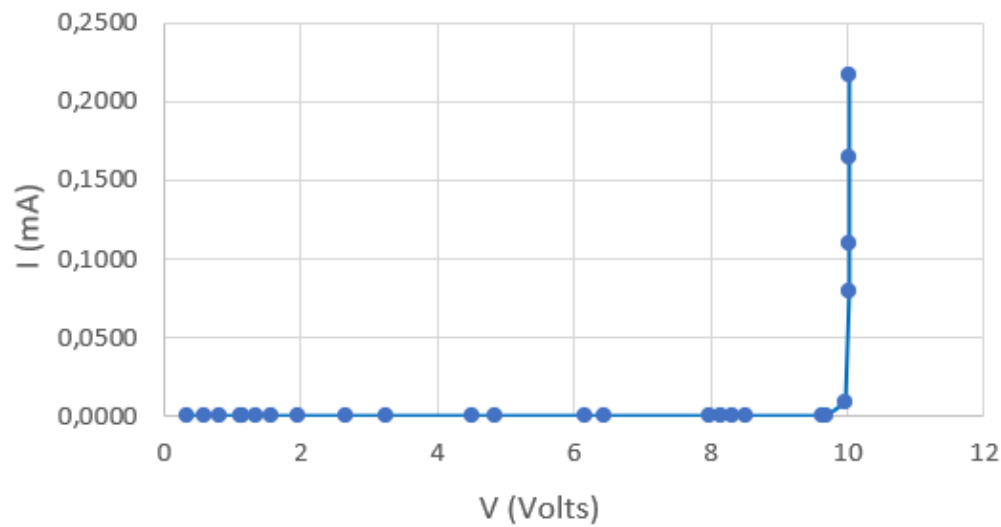
Resíduos



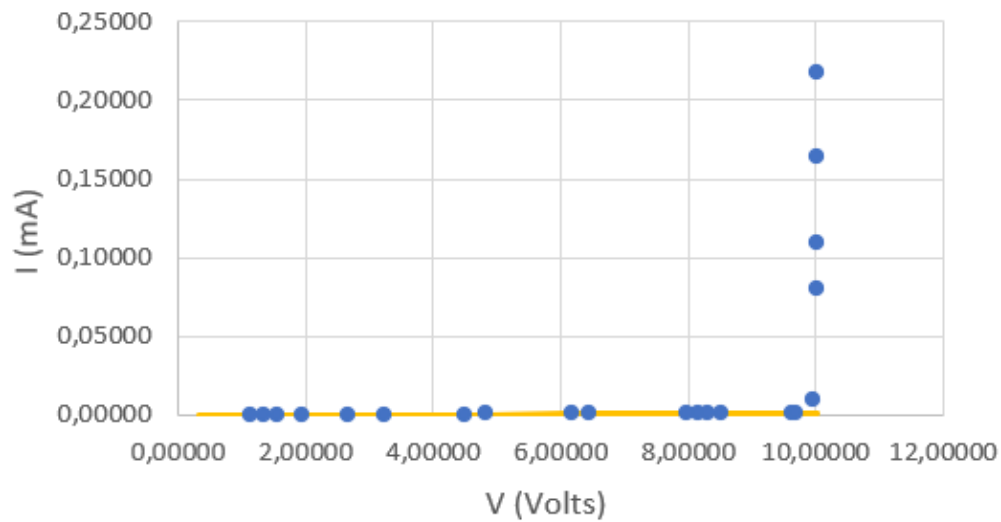
Díodo Zener (polarização inversa)

Vf (±0,1V)	V volt. (±0,00001V)	I (±0,0001mA)	ln(I)	u(ln(I))	ln(I) aj.	Resíduos	exp(ln(I) aj.)
0,3	0,33901	0,0001	-9	1	-9	0,142	0,0000893
0,5	0,59970	0,0001	-9	1	-9	-0,231	0,0000958
0,8	0,81860	0,0001	-10	2	-9	-0,613	0,0001015
1,1	1,12740	0,00003	-11	4	-9	-1,484	0,0001102
1,1	1,14990	0,00002	-11	4	-9	-1,573	0,0001109
1,3	1,34900	0,000003	-13	33	-9	-3,663	0,0001169
1,5	1,55850	0,00002	-11	5	-9	-1,873	0,0001237
1,9	1,94900	0,0001	-10	2	-9	-0,861	0,0001372
2,6	2,65730	0,0001	-9,0	0,8	-8,7	-0,251	0,0001657
3,2	3,24730	0,0002	-8,6	0,5	-8,5	-0,031	0,0001940
4,4	4,50410	0,0003	-8,1	0,3	-8,2	0,144	0,0002711
4,8	4,84040	0,0003	-8,0	0,3	-8,1	0,157	0,0002966
6,1	6,17410	0,0005	-7,6	0,2	-7,8	0,128	0,0004231
6,3	6,43740	0,0005	-7,6	0,2	-7,7	0,111	0,0004539
7,9	7,96980	0,0007	-7,3	0,2	-7,3	-0,033	0,0006829
8,0	8,15640	0,0007	-7,3	0,1	-7,2	-0,054	0,0007177
8,2	8,30950	0,0007	-7,3	0,1	-7,2	-0,073	0,0007476
8,4	8,52700	0,0007	-7,2	0,1	-7,1	-0,098	0,0007922
9,5	9,64300	0,0009	-7,1	0,1	-6,8	-0,214	0,0010666
9,6	9,68570	0,0009	-7,0	0,1	-6,8	-0,194	0,0010788
10,0	9,97200	0,0089	-4,73	0,01	-6,76	2,029	0,0011644
11,1	10,02500	0,0795	-2,532	0,001	-6,741	4,210	0,0011809
11,6	10,02400	0,1098	-2,209	0,001	-6,742	4,533	0,0011806
12,4	10,02400	0,1642	-1,807	0,001	-6,742	4,935	0,0011806
13,1	10,02600	0,2170	-1,5279	0,0005	-6,7412	5,213	0,0011812

Curva característica de I(V)

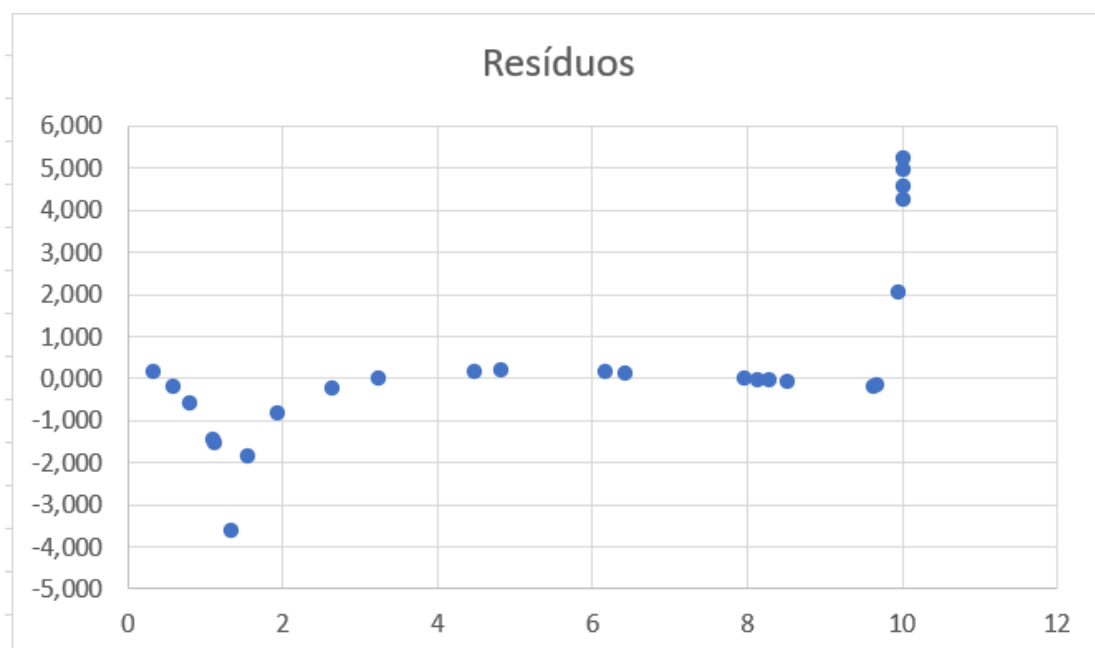
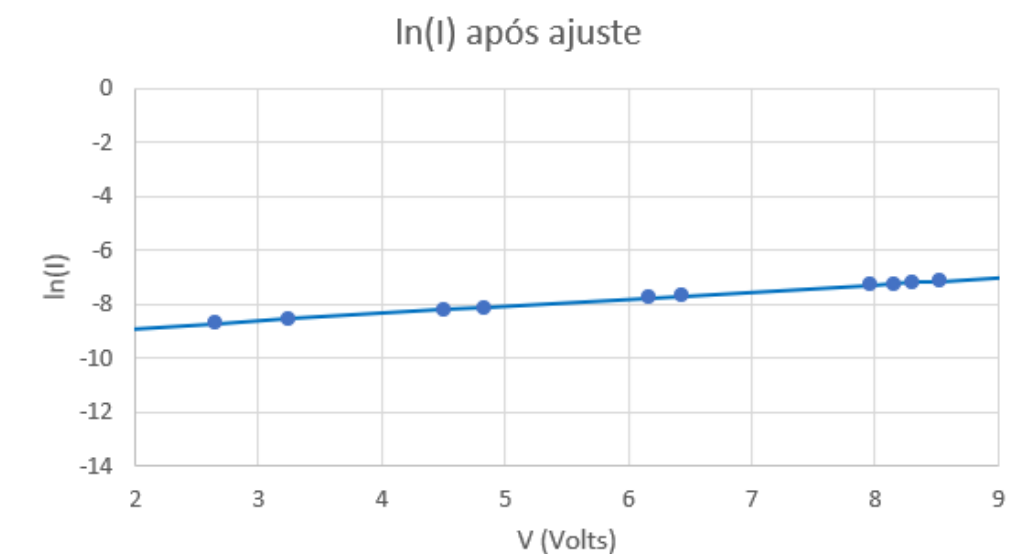
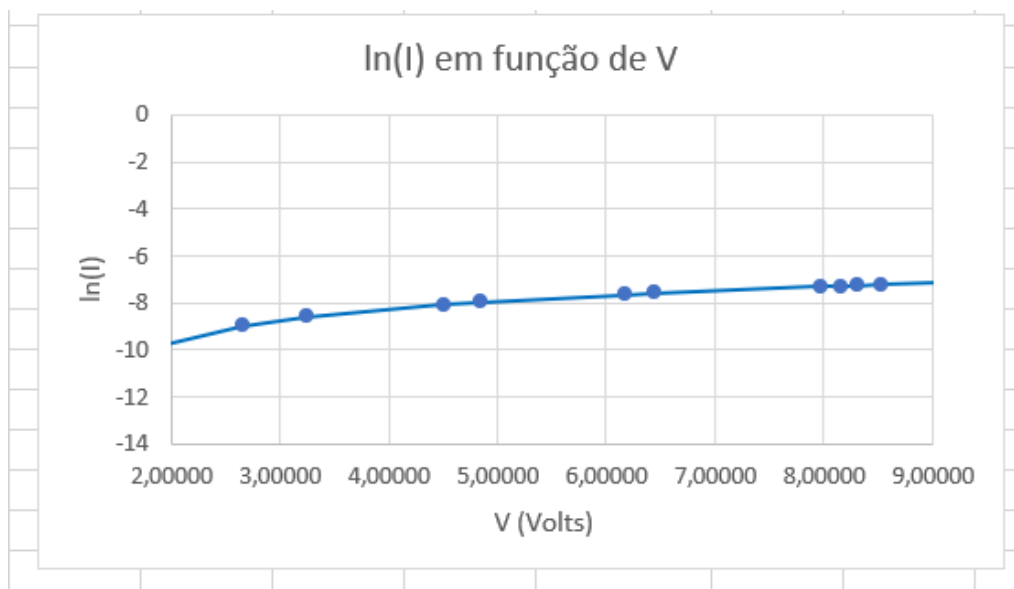


Curva característica de I(V) com ajuste



m	0,27	-9,4	b
u(m)	0,02	0,1	u(b)
r^2	0,95	0,1	u(y)
V (V)	I (A)	R estática (Ω)	
0,81860	5,50E-08	1,49E+07	
6,43740	5,07E-07	1,27E+07	
10,02400	0,00011	91260,01	

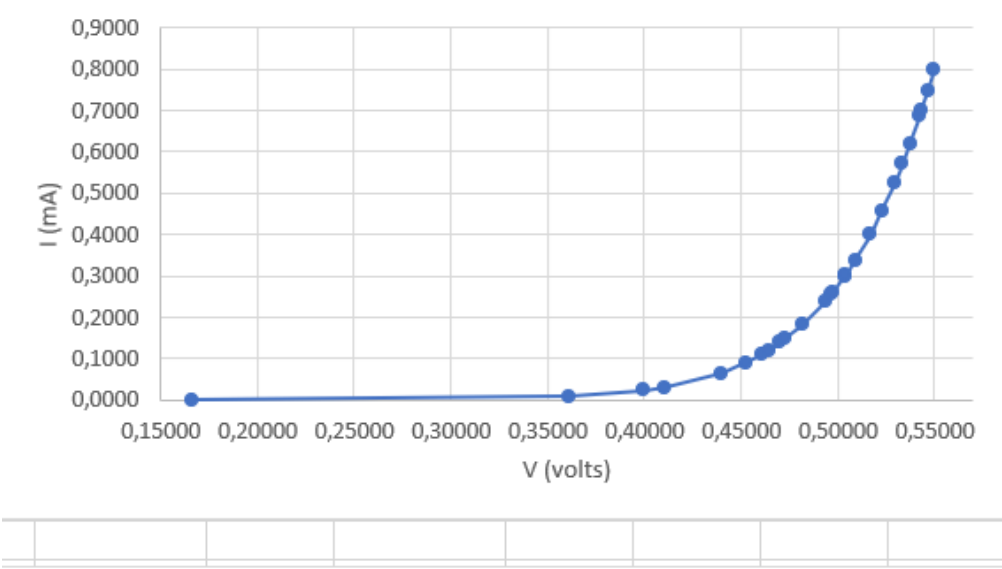
T(k)	292,65
e(C)	1,6E-19
k (J/k)	1,38E-23
Io (mA)	8E-05
η	148,6484
u(Io)	1E-05
u(η)	557,7354



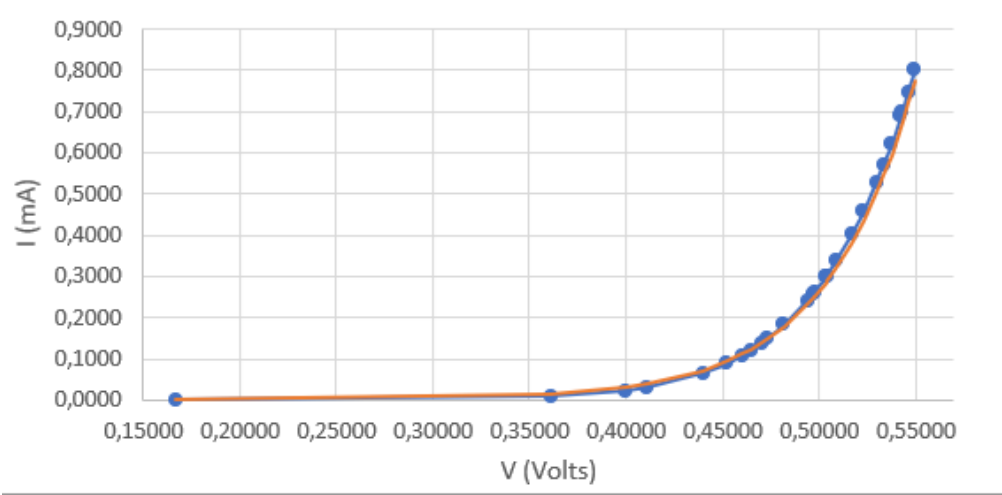
Díodo Retificador (polarização direta)

Vf (±0,1V)	V volt. (±0,00001V)	I (±0,0001mA)	ln(I)	u(ln(I))	ln(I) aj.	Resíduos	exp(ln(I) aj.)
0,1	0,16680	0,0003	-8,2	0,4	-8,6	0,344	0,000193
0,5	0,36150	0,0096	-4,64	0,01	-4,33	-0,309	0,013119
0,7	0,40009	0,0230	-3,771	0,004	-3,498	-0,273	0,030261
0,8	0,41106	0,0303	-3,496	0,003	-3,260	-0,236	0,038376
1,4	0,44007	0,0651	-2,732	0,002	-2,632	-0,099	0,071930
1,8	0,45243	0,0890	-2,420	0,001	-2,364	-0,055	0,094008
2,1	0,46050	0,1088	-2,2183	0,0009	-2,1896	-0,029	0,111961
2,3	0,46484	0,1208	-2,1136	0,0008	-2,0956	-0,018	0,122995
2,6	0,47047	0,1385	-1,9770	0,0007	-1,9737	-0,003	0,138944
2,7	0,47329	0,1490	-1,9037	0,0007	-1,9126	0,009	0,147694
3,3	0,48186	0,1826	-1,7003	0,0005	-1,7270	0,027	0,177815
4,0	0,49414	0,2398	-1,4280	0,0004	-1,4611	0,033	0,231990
4,2	0,49705	0,2559	-1,3630	0,0004	-1,3980	0,035	0,247081
4,3	0,49769	0,2615	-1,3413	0,0004	-1,3842	0,043	0,250529
4,9	0,50366	0,2990	-1,2073	0,0003	-1,2549	0,048	0,285108
4,9	0,50434	0,3011	-1,2003	0,0003	-1,2402	0,040	0,289338
5,4	0,50909	0,3371	-1,0874	0,0003	-1,1373	0,050	0,320687
6,4	0,51700	0,4009	-0,9140	0,0002	-0,9660	0,052	0,380610
7,2	0,52318	0,4581	-0,7807	0,0002	-0,8321	0,051	0,435117
8,2	0,52971	0,5272	-0,6402	0,0002	-0,6907	0,051	0,501215
8,9	0,53365	0,5718	-0,5590	0,0002	-0,6054	0,046	0,545861
9,6	0,53754	0,6212	-0,4761	0,0002	-0,5211	0,045	0,593841
10,7	0,54249	0,6896	-0,3716	0,0001	-0,4139	0,042	0,661040
10,8	0,54331	0,6987	-0,3585	0,0001	-0,3962	0,038	0,672884
11,5	0,54650	0,7470	-0,2917	0,0001	-0,3271	0,035	0,721014
12,3	0,54980	0,8005	-0,2225	0,0001	-0,2556	0,033	0,774430

Curva característica de I(V)



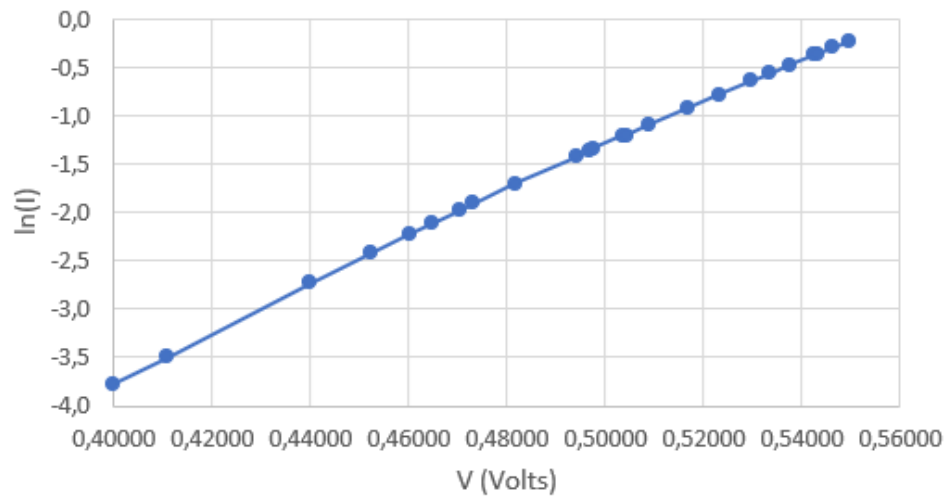
Curva característica de I(V) com ajuste



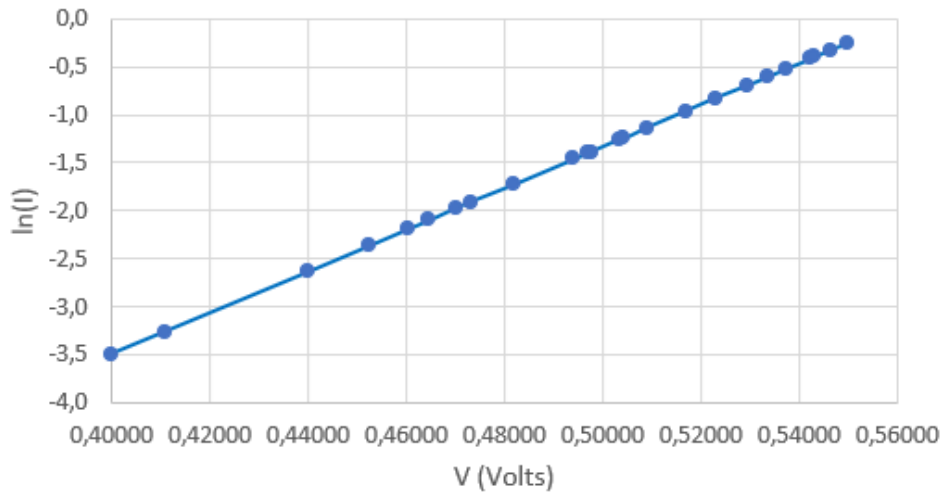
m	21,7	-12,2	b
u(m)	0,3	0,2	u(b)
r^2	0,995	0,1	u(y)
V (V)	I (A)	R estática (Ω)	
0,44007	6,5E-05	6757,8317	
0,51700	0,0004	1289,5984	
0,54980	0,0008	686,820737	

T(k)	292,65
e(C)	1,6E-19
k (J/k)	1,4E-23
Io (mA)	5E-06
η	1,83
u(Io)	8E-07
u(η)	0,08

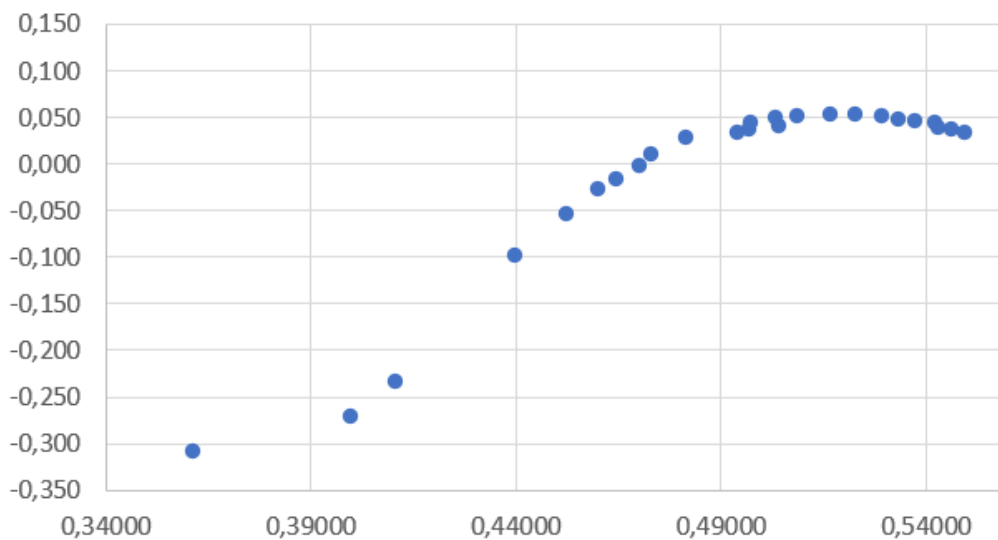
$\ln(I)$ em função de V



$\ln(I)$ após ajuste



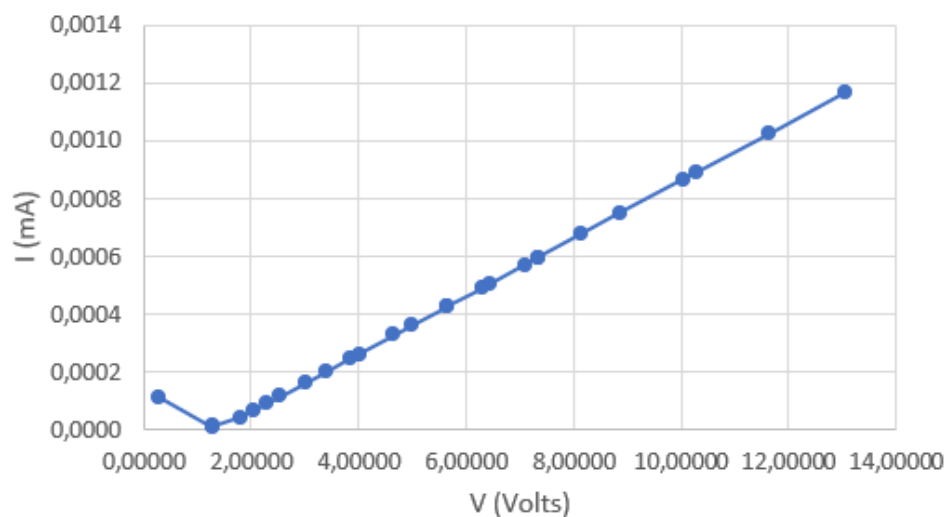
Resíduos



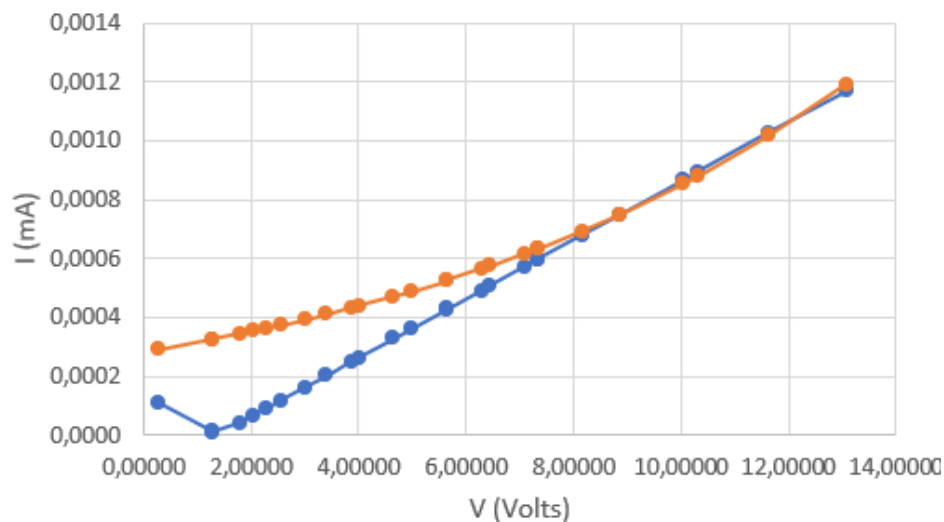
Díodo Retificador (polarização inversa)

Vf (±0,1V)	V volt. (±0,00001V)	I (±0,0001mA)	ln(I)	u(ln(I))	ln(I) aj.	Resíduos	exp(ln(I) aj.)
0,2	0,27559	0,0001	-9,1	0,9	-8,1	-0,951	0,000290
1,2	1,30100	0,00001	-12	11	-8	-3,585	0,000325
1,2	1,27600	0,00001	-11	8	-8	-3,215	0,000324
1,7	1,79850	0,00004	-10	2	-8	-2,100	0,000343
2,0	2,04840	0,00007	-10	2	-8	-1,675	0,000352
2,2	2,28930	0,00009	-9	1	-8	-1,392	0,000362
2,5	2,55270	0,0001	-9,1	0,9	-7,9	-1,167	0,000373
2,9	3,01500	0,0002	-8,7	0,6	-7,8	-0,884	0,000392
3,3	3,40150	0,0002	-8,5	0,5	-7,8	-0,711	0,000409
3,8	3,86900	0,0002	-8,3	0,4	-7,7	-0,549	0,000431
3,9	4,01130	0,0003	-8,2	0,4	-7,7	-0,514	0,000438
4,6	4,65960	0,0003	-8,0	0,3	-7,7	-0,361	0,000470
4,9	4,98230	0,0004	-7,9	0,3	-7,6	-0,303	0,000488
5,6	5,65130	0,0004	-7,8	0,2	-7,6	-0,207	0,000525
5,6	5,66410	0,0004	-7,8	0,2	-7,6	-0,206	0,000526
6,2	6,29380	0,0005	-7,6	0,2	-7,5	-0,138	0,000564
6,4	6,45870	0,0005	-7,6	0,2	-7,5	-0,124	0,000574
7,0	7,09300	0,0006	-7,5	0,2	-7,4	-0,075	0,000616
7,2	7,33710	0,0006	-7,4	0,2	-7,4	-0,061	0,000632
7,2	7,34320	0,0006	-7,4	0,2	-7,4	-0,060	0,000633
8,1	8,15800	0,0007	-7,3	0,1	-7,3	-0,021	0,000693
8,8	8,86780	0,0007	-7,2	0,1	-7,2	0,000	0,000749
9,9	10,02730	0,0009	-7,1	0,1	-7,1	0,016	0,000852
10,2	10,30200	0,0009	-7,0	0,1	-7,0	0,016	0,000878
11,5	11,62300	0,0010	-6,9	0,1	-6,9	0,009	0,001016
12,9	13,06800	0,0012	-6,75	0,09	-6,73	-0,019	0,001192

Curva característica de I(V)



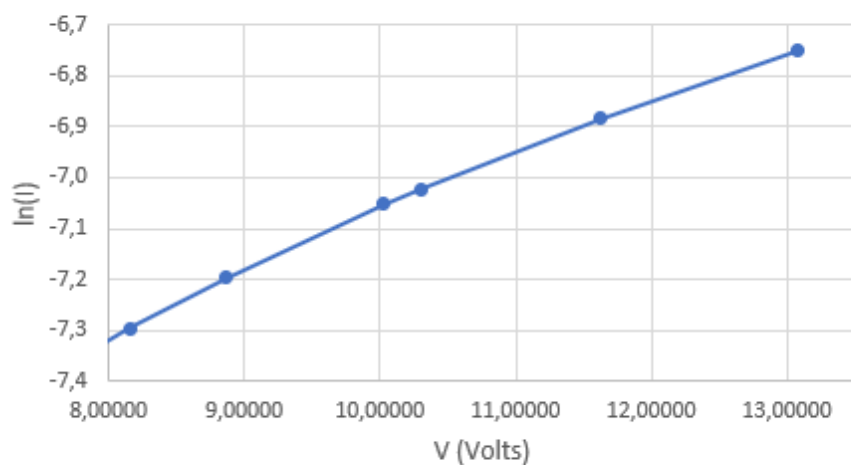
Curva característica de I(V) com ajuste



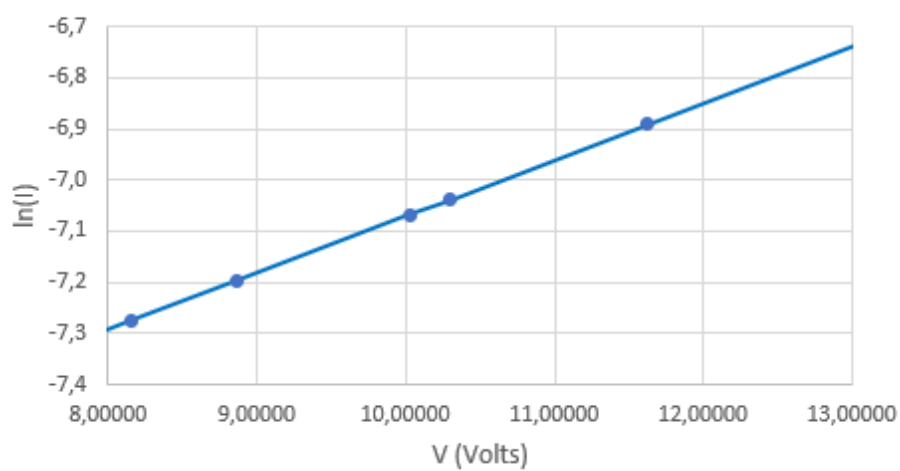
m	0,111	-8,18	b
u(m)	0,005	0,05	u(b)
r^2	0,993	0,02	u(y)
V (V)	I (A)	R estática (Ω)	
2,28930	9E-08	2,5E+07	
3,86900	2,5E-07	1,6E+07	
8,15800	6,8E-07	1,2E+07	

T(k)	292,65
e(C)	1,6E-19
k (J/k)	1,4E-23
lo (mA)	0,00028
η	358,382
u(lo)	1E-05
u(η)	3241,91

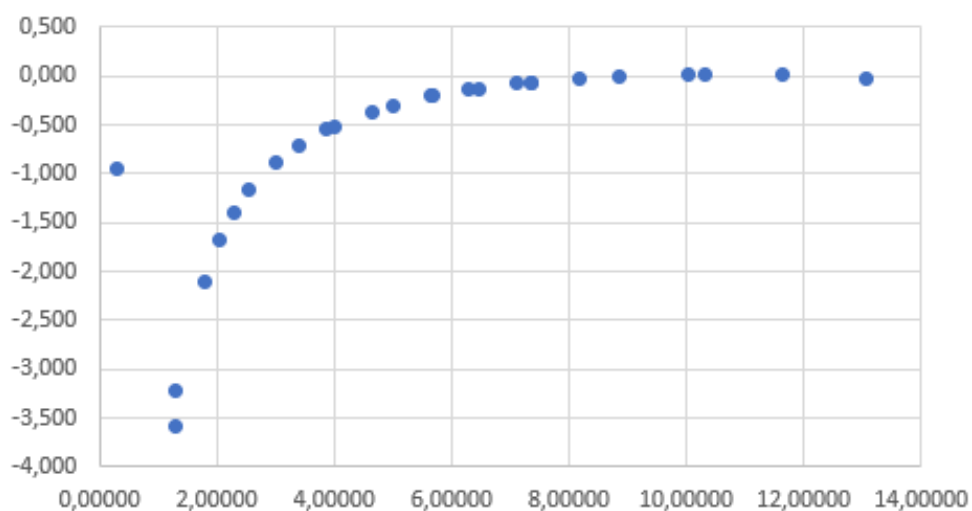
$\ln(I)$ em função de V



$\ln(I)$ após ajuste



Resíduos



~~Após o teste~~

Estão registadas as medições!

As incertezas registadas nem sempre são as próprias incertezas dos aparelhos.

Quando o valor que aparece no ecrã não era constante, optámos por calcular a semidiferença ~~para~~ e assim obter a incerteza.

O valor em si foi obtido pela média dos valores que oscilavam.

↓

- Para o diodo retificador com polarização directa, relativamente à corrente, foram utilizadas 3 diferentes escalas no amperímetro: 200 microamperes, 20 microamperes, 2 miliamperes.

Optou-se por deixar a corrente em miliamperes (mA).

A tensão ficou registada em Volts (V).

- Para o diodo retificador com polarização inversa, relativamente à corrente, foram utilizadas 2 escalas diferentes no amperímetro: 20 microamperes e 2 miliamperes. Optou-se por deixar a corrente em mA.

Para a tensão utilizou-se a escala de 10V e 100V e de facto, ficou registada em Volts (V).

- Para o diodo Zener com polarização inversa, relativamente à corrente, foram utilizadas 3 escalas:

200 microamperes, 2 miliamperes e 20 microamperes.

Optou-se por deixar a corrente em mA.

Para a tensão foram utilizadas 2 escalas:

10V e 100V. Tensão em Volts (V).

$$x = \lim_{y \rightarrow x} \frac{v(x)}{y}$$

• Para o diodo Zener com polarização direta, as escalas utilizadas foram as mesmas (referidas anteriormente).

Tensão em V e corrente em mA.

Cálculo da resistência estática do diodo em alguns pontos

$$R_{\text{est.}} = \frac{V}{I}$$

→ Diodo Zener (p. direta)

$$R_{\text{est.}(1)} = \frac{V}{I} = \frac{0,6530}{0,0354 \times 10^{-3}} \approx 18189,42 \, \Omega$$

$$R_{\text{est.}(2)} = \frac{V}{I} = \frac{0,71219}{0,2431 \times 10^{-3}} \approx 2929,62 \, \Omega$$

(...)

O resto encontra-se no Excel!

Estimar resistência dinâmica num ponto de condução frangea

A condução frangea só é encontrada quando um diodo atinge a ruptura elétrica (regime de avalanche).

O regime de avalanche, por sua vez, dá-se para polarizações inversas, acabando por destruir o diodo se este for retificador.

Pelos gráficos obtidos no Excel, está claro ~~que~~ a existência de condução frangea na curva característica do diodo Zener em polarização inversa.

Temos que
$$R_{\text{dim}} = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

$$V \rightarrow (V, I) \rightarrow \text{mA}$$

~~Os pontos~~ Os pontos (10,025; 0,0795) e (10,026; 0,2170) encontram-se em condução forward.

$$R_{\text{dim.}} = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{10,026 - 10,025}{(0,2170 \times 10^{-3}) - (0,0795 \times 10^{-3})} \approx 7,273 \, \Omega$$

valor estimado!

Curva característica de um diodo

$$\ln(1) = 0 \quad I = I_0 \left(e^{\frac{eV}{\eta kT}} - 1 \right) \quad (\text{Lei de Shockley})$$

$$\Leftrightarrow \ln(I) = \ln(I_0 \times e^{\frac{eV}{\eta kT}}) - \ln(1)$$

$$\Leftrightarrow \ln(I) = \ln(I_0 \times e^{\frac{eV}{\eta kT}})$$

$$\Leftrightarrow \ln(I) = \ln(I_0) + \ln(e^{\frac{eV}{\eta kT}})$$

$$\Leftrightarrow \boxed{\ln(I) = \ln(I_0) + \frac{eV}{\eta kT}} \quad \text{equação linearizada}$$

$$(y = mx + b) \quad \begin{matrix} \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ y & & b & & m & & x \end{matrix}$$

$$\begin{cases} \ln(I_0) = b \\ m = \frac{e}{\eta kT} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_0 = e^b \\ \eta = \frac{e}{m kT} \end{cases}$$

Os valores de I_0 e η para cada diodo encontram-se no Excel!

Atenção: O circuito A foi o único circuito utilizado na atividade experimental.

Foi priorizada a obtenção de bastantes valores em ambas as polarizações para cada um dos diodos.

- Os valores marcados a vermelho nas tabelas de Excel representam os pontos duvidosos obtidos.
- A temperatura de junção utilizada ($T = 299,9 \text{ K}$) corresponde a $19,5^\circ\text{C}$ e é uma estimativa da temperatura presente no laboratório 119.

Conclusões

- Para qualquer diodo analisado e qualquer que seja a polarização, a resistência estática diminui à medida que a tensão aumenta. (em geral!) (nem sempre acontece)
- Resistências estáticas são, em geral, muito maiores na polarização inversa do que na direta. Isto acontece porque a corrente registada na polarização inversa é inferior, já que o diodo apresenta baixa resistência à condução elétrica no sentido direto e elevada resistência à condução elétrica no sentido inverso.
- Na curva característica do diodo Zener, em polarização inversa foi possível observar uma rutura elétrica caracterizada pelo regime de avalanche. Tal sucede devido a uma tensão inversa elevada que provoca o aumento abrupto da corrente, para pequenas variações da tensão. Isto faz sentido porque, na verdade, a presença da zona de avalanche no diodo Zener em nada afeta a sua operação normal. O mesmo não acontece para diodos retificadores.

- Para as polarizações diretas, I_0 é muito inferior aos valores de I medidos, daí $I_0 + I_0 \sim I_0$.
- O método de determinação de I_0 pela regressão linear com aplicação da lei de Shockley é muito mais preciso e rigoroso do que o método através do qual se obtém I_0 pelo gráfico.
- Para as polarizações diretas, η apresentou valores entre 1 e 2, tal como se esperava.
- Para as polarizações inversas, η apresentou valores menores, não tendo ficado entre 1 e 2. Tal aconteceu provavelmente por o I_0 apresentar nestas polarizações um valor de ordem de grandeza semelhante aos das medições de I . Assim $I_0 + I_0 \sim I_0$ não se verifica e então a regressão linear talvez não tenha sido a mais adequada.
- De modo geral a curva característica de $I(V)$ corresponde sempre com o seu ajuste, embora não se sobrepõem. Tal só não aconteceu em duas situações:
 - na parte final da curva do diodo Zener (sentido inverso), o que faz completo sentido visto estarmos a falar de uma zona de avalanche;
 - na parte inicial da curva do diodo retificador (sentido inverso). Isto já não faz tanto sentido, tendo como causas aleatórias sido a causa de tal discrepância, provavelmente.
- Os ajustes aplicados a $\ln(I)$ em função de V foram bem conseguidos para todos os diodos.

Em suma, os objetivos iniciais foram alcançados com grande sucesso e a atividade experimental, em si, foi muito importante e relevante para ganhar uma maior familiarização com os diodos e com tudo o que lhes está relacionado.