

# Bom trabalho; completo 90%

## Prop. de integração na ark' bem

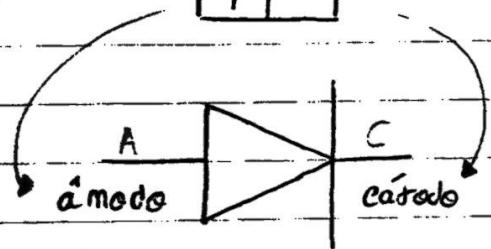
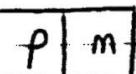
Trabalho 3B: Traçado da curva característica de diodos

- Objetivos:
- Traçar a curva característica de diodos rectificadores e Zener, efectuando a sua parametrização.
  - Avaliar as resistências internas (estática e dinâmica) para diferentes gamas de tensão, em diodos rectificadores e Zener.

dizer  
não?

- Algumas notas sobre diodos:

junção:



sentido direto →

sentido inverso ←

(símbolo: diodo rectificador)

o dispositivos constituídos pela junção de 2 materiais semicondutores, do tipo p e do tipo n

↓  
e carga maioritariamente transportada por lacunas

↳ e carga maioritariamente transportada por elétrons

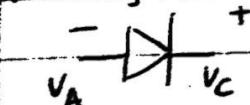
o rectificam corrente: baixa

resistência à condução no sentido

direto e elevada no sentido inverso

- Curva característica expectável de um diodo:

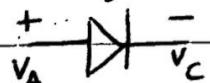
Polarização inversa:



$V_D < 0$

lancha

Polarização direta



$$V_0 = V_A - V_C > 0$$

zona de  
coidros  
física

regime  
de avalanche

↳ o diodo (rectificador) entra em ruptura elétrica;

SI

v

$I_0$

corrente de saturação

nota: o diodo zener funciona na zona da avalanche, sendo utilizado como referência de tensão  $\rightarrow$  varia pouco nessa zona, com a corrente;

A curva característica do diodo pode ser traduzida pela lei de Shockley:

$$I(V) \downarrow \Rightarrow I_D = I_0 \left( e^{\frac{eV_0}{kT}} - 1 \right)$$

Légena:  $I_D \rightarrow$  corrente que atravessa o diodo  $R \rightarrow$  carga de eletrão

$V_0 \rightarrow$  tensão aplicada

$K \rightarrow$  constante de Boltzmann

( $K_B$ )

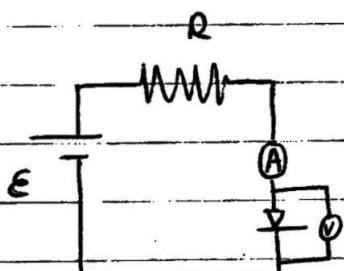
$T \rightarrow$  temperatura de junção

$I_0 \rightarrow$  corrente de saturação

$\Rightarrow$  Esta lei é válida para diodos longe da zona de avalanche e com correntes elevadas; (não se aplica à polarização inversa)

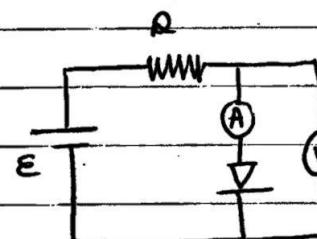
o Montagem experimental @ plano:

$\Rightarrow$  Sera utilizada o método amperímetro - voltímetro, que permite retirar um elevado número de pontos. A montagem experimental a utilizar depende da resistência interna do diodo, e a sua escolha é feita já em laboratório:



Montagem a

$$R_{\text{diodo}} \ll R_V$$



Montagem b

$$R_{\text{diodo}} \sim R_V$$

Légena:

A - amperímetro

V - voltímetro

R - resistência de proteção  
de proteção

$\rightarrow$  A  $R_V$  de um voltímetro típico, como o a utilizar, é da ordem  $\sim 10^7 \Omega$

o Material: Multímetro, a utilizar como voltímetro e amperímetro, diodos retificadores e zener, resistência de proteção, fonte de tensão variável, fio de ligação,

Plane:

- Tempo definido o circuito a utilizar, executar a sua montagem;
- Efectuar medição da tensão aplicada ao diodo,  $V_D$ , e da corrente que o atravessa,  $I_D$ , em cada polarização, variando a tensão da saída da fonte.
- Mudança de polarização → troca da ordem das ligações provenientes da fonte de tensão nos terminais, ânodo e cátodo, do diodo.
- Registar os dados obtidos numa folha de cálculo.
- Efectuar a análise de dados.

Importante: → escolher escalas que permitam a maior resolução possível,

→ anotar incertezas de medida,

Camp.

J

Bom plane

Quais são os aparelhos que uso?

• Montagem experimental, escalas dos aparelhos de medida e respetivas incertezas associadas.

Díodo	Polarização	Grandeza	Escalas	Incertezas
Retificador	Direta	ID	2 mA	0.001 mA
	Montagem (a)	VD	10 V e 100 V (mudança de escala)	0.001 V e 0.00001 V (respetivamente)
	Inversa	ID	2 mA	0.001 mA
	Montagem (b)	VD	100 V	0.00001 V
Zenner	Direta	ID	2 mA	0.001 mA
	Montagem (a)	VD	100 V	0.00001 V
	Inversa	ID	20 mA	0.0001 A
	Montagem (a) + (b)	VD	10 V e 100 V (mudança de escala)	0.001 V e 0.0001 V (respetivamente)

• Observação: Realizou-se a mudança do circuito (b) para o circuito (a), no estudo da polarização inversa, no diodo Zenner, quando se alcançou a zona de avalanche, sabendo que iria ocorrer um

aumento brusco de corrente.

- Análise de dados

→ Díodo Retificador

- Polarização direta.

• Iniciou-se o estudo do díodo retificador pela situação de polarização direta, obtendo-se o seguinte gráfico  $ID(VD)$ :



Em situação de polarização direta é aplicável a lei de Shockley para a descrição do comportamento do díodo. Esta pode ser linearizada através de uma transformação logarítmica:

$$ID > I_0$$

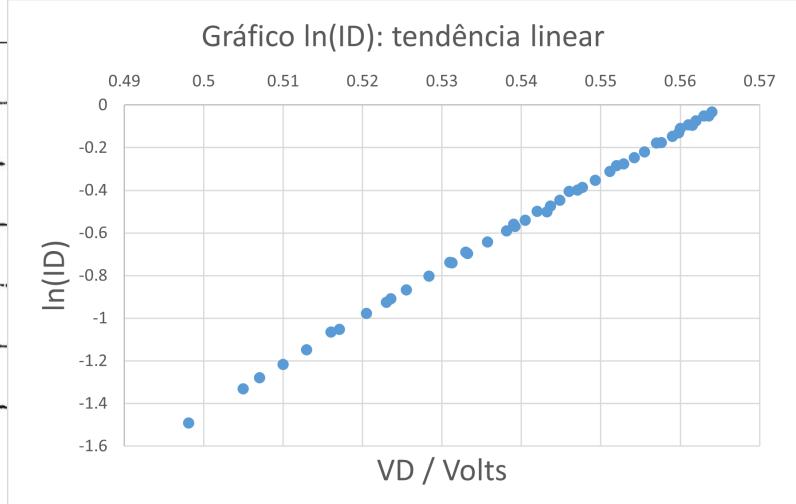
$$\ln(ID) = \ln(I_0) + \frac{eV}{kT}, \text{ mas qual:}$$

$$e = \text{carga elétrica} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$K = \text{constante de Boltzmann} = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$$

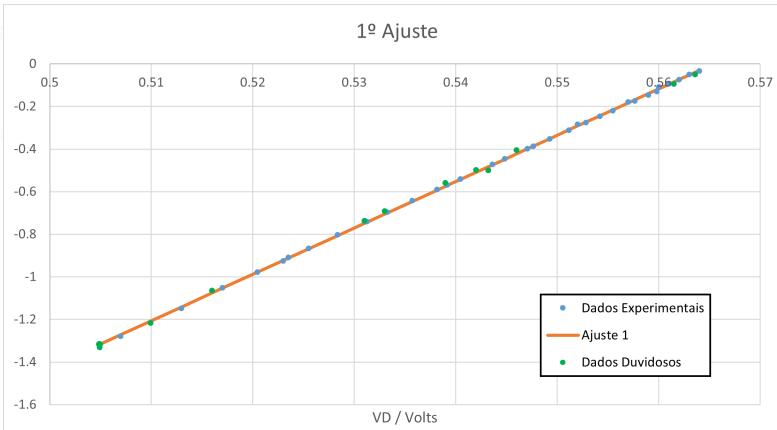
$$T = \text{temperatura da junção}$$

O cálculo de  $\ln(ID)$  permite a sua representação gráfica, em função de  $VD$ , na medida em que os dados apresentam uma tendência linear.

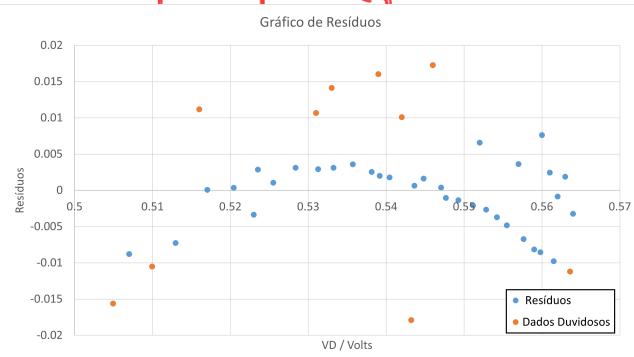


Efectuando o ajuste linear de  $\ln(I/D)$  em função de VD, foram obtidos os seguintes elementos:

m	21.8	-12.3	b
s_m	0.07	0.04	s_b
r^2	0.9996	0.01	s_y



2º desvio padrão

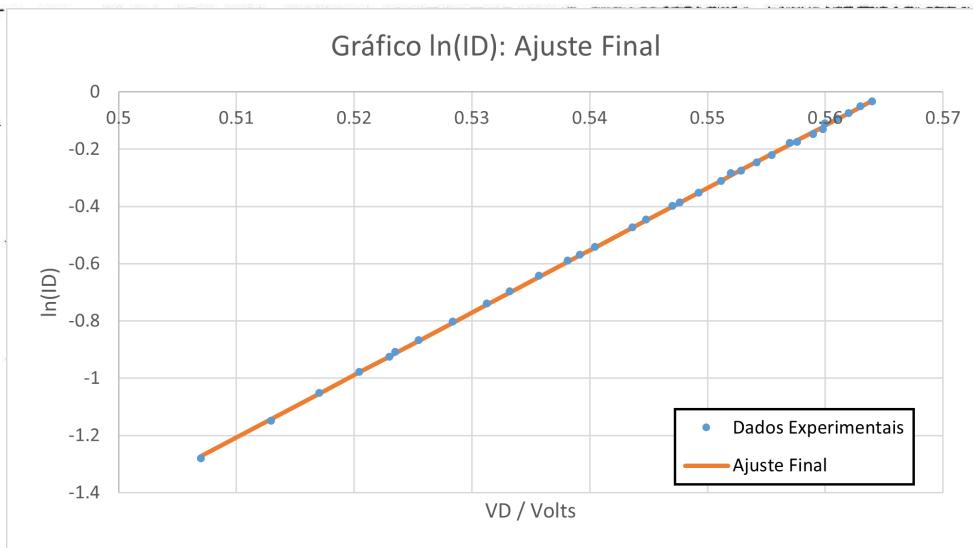


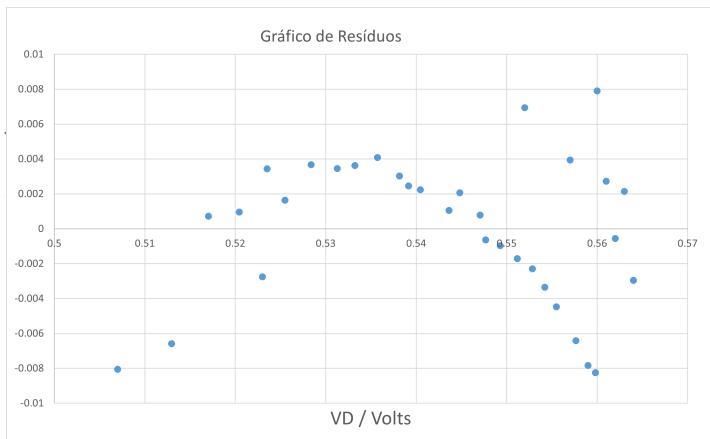
Atendendo ao afastamento de alguns dados da reta de ajuste e ao seu maior módulo nos resíduos, foi  $m \neq b \neq 0$  efectuado um novo ajuste, mudaram excluindo os dados duvidosos. Só mesmo duvidoso?

O gráfico de resíduos apresentava, igualmente, uma tendência aparentemente parabólica.

O Novo ajuste:

m	21.8	-12.3	b
s_m	0.05	0.03	s_b
r^2	0.9999	0.004	s_y





ramente  
uma  
tendência  
nos resíduos.

Atendendo ao valor reduzido dos resíduos e a um ligeiro aumento na sua aleatoriedade, bem como à manutenção dos parâmetros  $m$  e  $b$  de ajuste, considera-se o gráfico obtido aceitável, validando-se a linearização da lei de Shockley.

O Recorrendo à matriz de ajuste, é possível calcular os parâmetros caracterizadores do comportamento do diodo, tendo-se:

$$A = \frac{l}{T K m} \quad I_{0\text{ajuste}} = e^{\frac{b}{l}}$$

⇒ Considerou-se a temperatura de junção a temperatura ambiente no laboratório, na data 21/03,  $T \approx 291,15\text{ K}$  ( $18^\circ\text{C}$ )

$$l \approx 1,829 \quad e \quad I_{0\text{ajuste}} = 4,55 \times 10^{-6}\text{ mA}$$

Pela propagação de incertezas, obtém-se os resultados finais:

$$m = (1,829 \pm 0,004)$$

$$I_{0\text{ajuste}} = (4,55 \pm 1,68) \times 10^{-6}\text{ mA}$$

$$= (4,55 \pm 1,68)\text{ mA}; //$$

$$O_0 = e^{\frac{b}{l}}$$

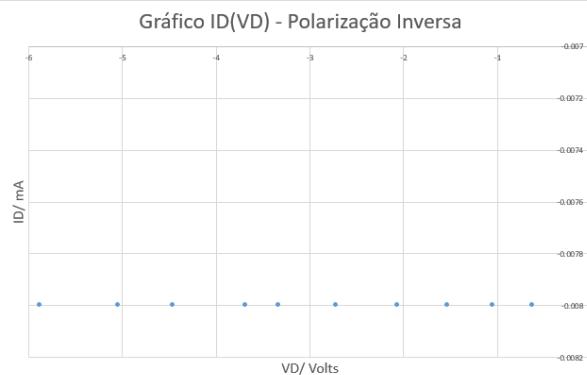
$$\frac{\Delta O}{O} = sb = 0,03$$

$$\Delta O/O = 3\% \text{ na } 37\%!$$

## Polarização inversa:

Nesta situação, não é aplicável a lei de Shockley, não havendo correntes elevadas.

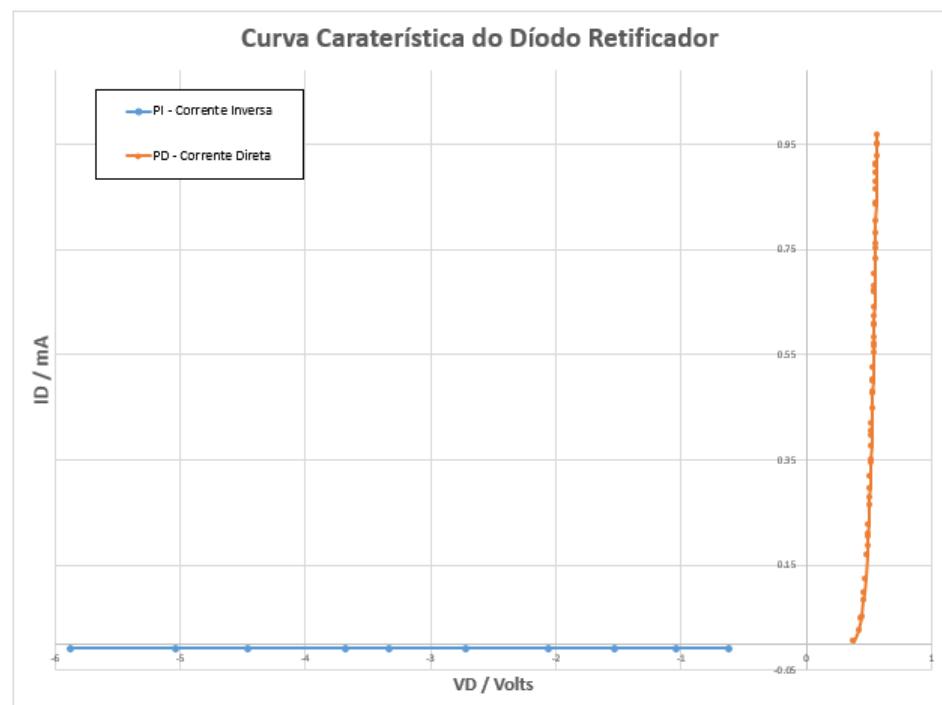
Os dados obtidos permitem traçar o seguinte gráfico:



A obtenção de valores constantes força a concluir  $I_0 = -0,008 \text{ mA}$   $= -8 \times 10^{-6} \text{ A} = -8 \mu\text{A}$ . Atendendo ao facto de que  $I_0 \approx 10^{-9} \text{ A}$ , constata-se que a escala utilizada (3 mA) não terá sido adequada, tendo limitado a medida a um último valor.

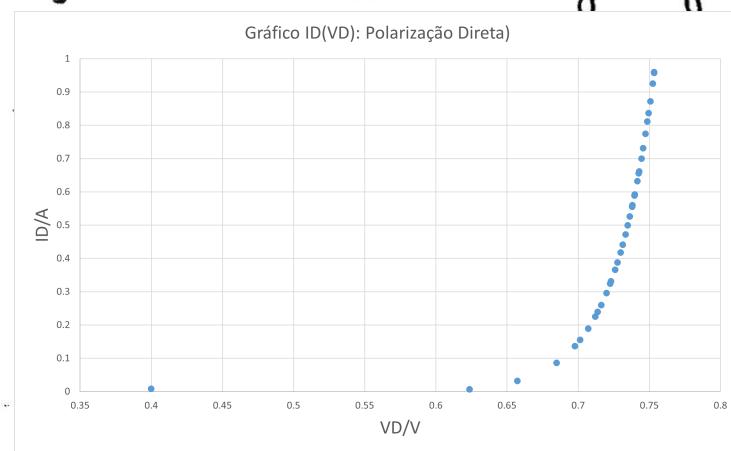
Não obstante,  $I_0$  experimental  $\approx 0$ , como é esperável

Curva característica do díodo retificador (juntão das duas de ambas as polarizações)



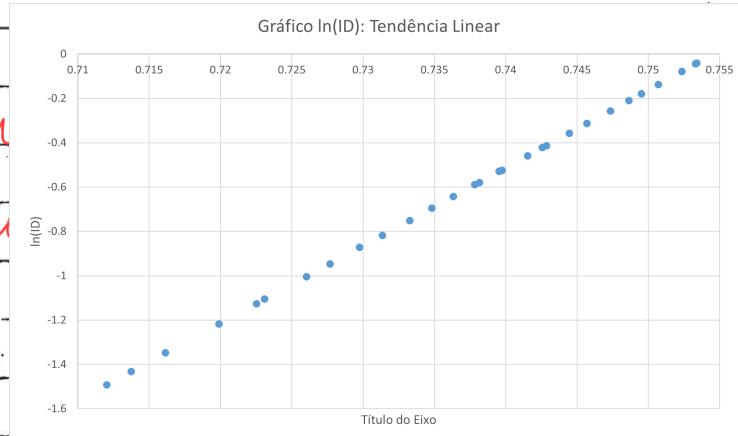
## Diodo Zener

- Polarização direta : Observe-se o seguinte gráfico  $ID(VD)$ :

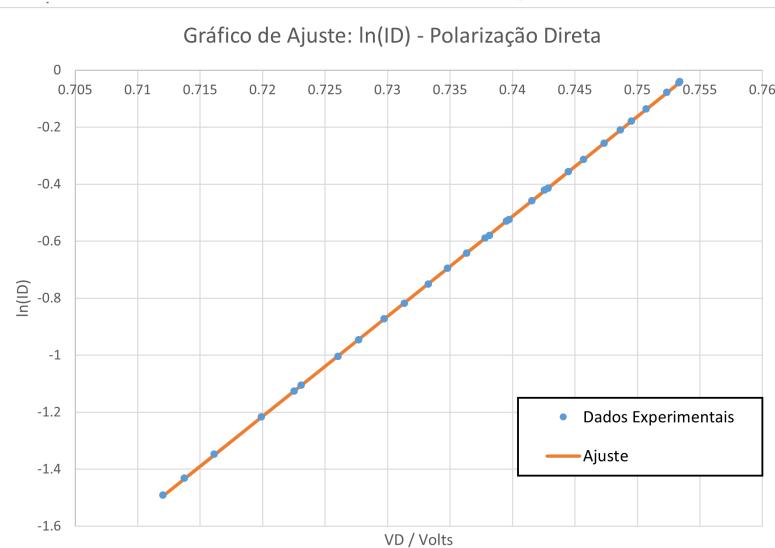


- Como realizado anteriormente, foi calculado  $\ln(ID)$  e, na gama de valores em que os dados apresentam uma tendência linear, obtemos o gráfico:

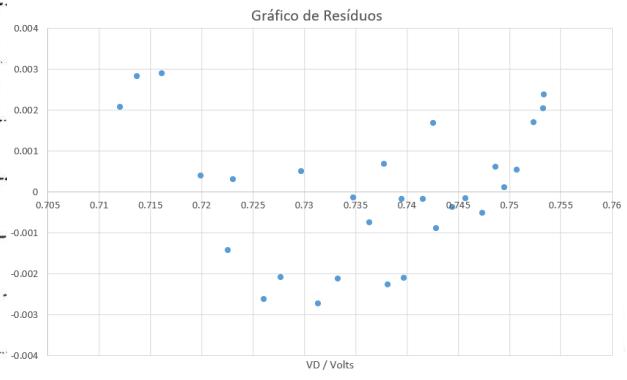
Não é pren  
dados c/ ay



Aplicando a linearização pela lei de Shockley (ajuste linear  $\ln(ID)$ ) em função de  $VD$ , obtemos:



$m$	35.1	$b$
$s_m$	0.03	$s_b$
$r^2$	0.99999	$s_Y$



- Dada a proximidade dos dados experimentais à reta de ajuste (e ao valor reduzido dos erros dos resíduos), dispensei-se a realização de um novo ajuste.

Atendendo à matriz de ajuste, obtém - se os parâmetros caracterizadores do comportamento do diodo:

$$m = 1,13453$$

$$I_0 = 3,10 \times 10^{-12} \text{ mA} = 3,10 \times 10^{-6} \text{ mA}$$

Pela propagação de incertezas:

$$m = (1,13453 \pm 0,00097)$$

$$I_0 = (3,10 \pm 1,04) \times 10^{-6} \text{ mA}$$

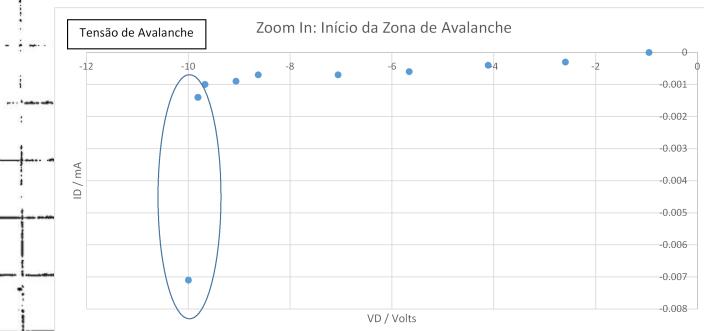
*e irado de novo!*

o. Polarização inversa

Observe-se o gráfico  $ID(VD)$ :

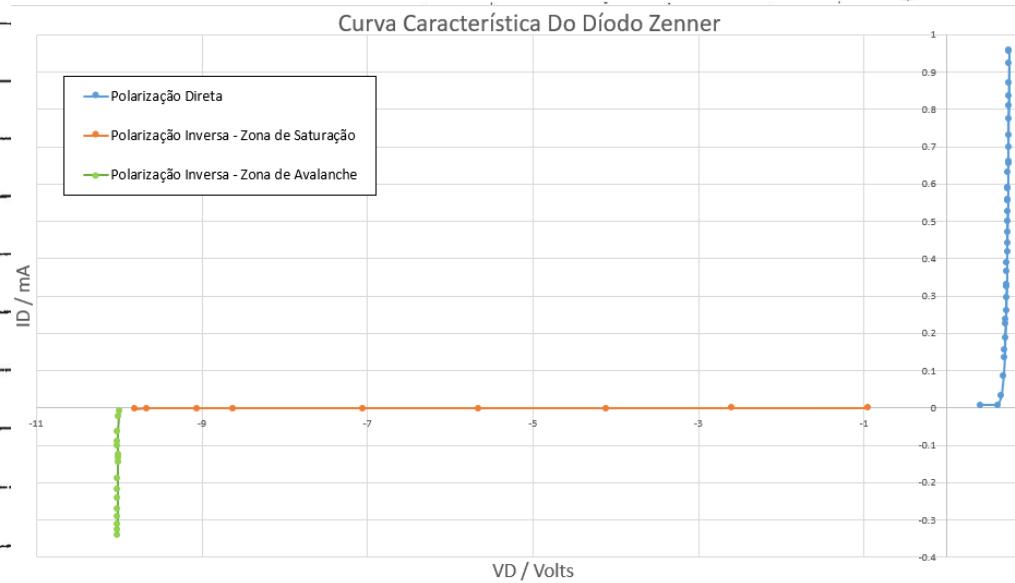


Evidente claramente a zona de avalanche do diodo Zener, o que permite considerar  $V_{\text{avalanche}} \sim 10V$ .



A média dos valores ID na zona de saturação permite obter  $I_0 \sim 0,002 \text{ mA}$

o Curva característica do diodo Zener:



## Resistência do diodo:

$$\hookrightarrow \text{Resistência estática: } R_{DC} = \frac{V}{I}$$

$$\hookrightarrow \text{Resistência dinâmica: } R_{AC} = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

Díodo	Zona da Curva	VD	Resistência	Valor / $\Omega$
Sentido Direto	Sentido Direto	Mínimo	Estática	9.53E+04
	Sentido Direto	Máximo		5.83E+02
	Sentido Inverso - Zona de Condução Fraca	Mínimo		7.78E+04
	Sentido Inverso - Zona de Condução Fraca	Máximo		7.34E+05
	Sentido Inverso - Zona de Condução Fraca	-----	Dinâmica	Não definida*
Zenner	Sentido Direto	Mínimo	Estática	5.00E+04
	Sentido Direto	Máximo		7.85E+02
	Sentido Inverso - Zona de Condução Fraca	Mínimo		8.66E+06
	Sentido Inverso - Zona de Condução Fraca	Máximo		7.01E+06
	Zona de Avalanche	Mínimo		7.14E+03
Zenner	Zona de Avalanche	Máximo	Dinâmica	2.95E+04
	Sentido Inverso - Zona de Condução Fraca	-----		9.90E+06

○ Para o cálculo da resistência estática, para cada zona significativa da curva, foram utilizados os valores de  $V_D$  máximo e  $V_D$  mínimo, para melhor ilustrar a gama de valores.

○ A estimativa de  $R_{AC}$  corresponde ao quociente  $\frac{\Delta V}{\Delta I}$ , tendo sido escolhidos dois pontos na zona de condução fraca para este efeito.

**Podia derivar a curva de ajuste!**

\* Como os valores de  $I_D$ , na zona de condução fraca, retirados para o díodo retificador, são constantes, não foi possível o cálculo de  $R_{AC}$ .

## Conclusão:

○ Obteve-se o perfil característico de ambos os diodos, Zenner e retificador.

○ Relativamente ao diodo Zenner, foi possível a identificação de Avalanche, que ocorre aproximadamente aos 10V. Verifica-se, graficamente, após esta marca, uma elevada variação de corrente, que corresponde a reduzidas alterações em  $V_D$ , comportando-se o diodo como o esperado.

o A escolha das montagens experimentais com base na resistência do diodo é confirmada pelos valores estimados de  $R_{DC}$  e  $R_{AC}$ . Como era esperável (e desejado, para o bom funcionamento do diodo) os valores obtidos para o rendimento inverso não claramente superiores aos da polarização direta.

o O fator  $m$  obtido experimentalmente encontra-se, em ambos os casos, compreendido entre 1 e 2, como era desejado, sendo acompanhado de uma reduzida incerteza:  $m_{\text{rectificador}} = 1,889$

$$e m_{\text{Zemmer}} = 1,1345 \pm 11$$

Porquê?

o Relativamente aos dados obtidos no estudo do diodo rectificador, na polarização inversa:

$\Rightarrow I_o$  experimental é da ordem dos  $10^{-3} \text{ A}$ , enquanto que  $I_o$  ajuste  $\sim 10^{-9} \text{ A}$ . Esta diferença pode ser explicada pela utilização de uma escala desadequada ( $2 \text{ mA}$ ), que limitou o valor lido ao valor constante -  $0,0008 \text{ mA}$ . Como tal, o valor obtido por ajuste encontra-se na ordem dos milio-ampéres, o que corresponde ao esperável. \*

De forma a registar os valores corretos e evitar esta discrepância, dever-se-ia ter utilizado uma escala que permitisse uma maior resolução na ordem dos  $\mu\text{A}$ .

No entanto, o valor obtido foi  $\sim 0 \text{ A}$ .

estudo do

$\Rightarrow$  O mesmo erro se verifica no diodo Zemmer, embora limitado, pela mudança de montagem, aos valores da zona de saturação.  $(-0,002 \times 10^{-3} \text{ A} = I_o$  experimental  $- I_o$  ajuste  $\sim 3,10 \times 10^{-15} \text{ A})$ .

\* Nota: Para esta conclusão, observaram-se os dados de outros grupos, tirados em circunstâncias semelhantes, concluindo-se que  $I_o$  rectificador experimental era da ordem de  $\sim 10^{-9} \text{ A}$ , tal como o ajuste.