

Universidade de Santiago de Compostela

Facultade de Física — Laboratorio de Física das Enerxías — Curso 2025-2026

---

# Física das Enerxías

---

Pedro Martínez Caamaño  
Fabio Prieto Guisande

Abril 2026

# Índice

<b>1. Instrumentación Electrónica Básica</b>	<b>3</b>
1.1. Introducción e obxectivos . . . . .	3
1.2. Material e montaxe experimental . . . . .	3
1.3. Resultados . . . . .	3
1.3.1. Resistencias individuais . . . . .	3
1.3.2. Lei de Ohm . . . . .	4
1.3.3. Resistencia nun Circuito . . . . .	5
1.3.4. Leis de Kirchhoff . . . . .	6
1.3.5. Teoremas de Thévenin e Norton . . . . .	7
1.3.6. Teorema de Transferencia de Máxima Potencia . . . . .	8
1.4. Discusión e conclusións . . . . .	10
<b>2. Diodo Semiconductor. Caracterización y Aplicación en Fuentes de Alimentación</b>	<b>11</b>
2.1. Introducción . . . . .	11
2.2. Material e métodos . . . . .	11
2.3. Diodo real . . . . .	11
2.4. Fontes de alimentación. . . . .	12
2.4.1. Rectificador de media onda. . . . .	13
2.4.2. Rectificador de onda completa. . . . .	14
2.4.3. Filtro . . . . .	15
2.4.4. Regulación de tensión. . . . .	17
2.5. Discusión e conclusións . . . . .	17
2.6. Anexo . . . . .	17
2.6.1. Datos medidos . . . . .	17
<b>3. Celdas Solares</b>	<b>19</b>
3.1. Introducción e obxectivos . . . . .	19
3.2. Material e montaxe experimental . . . . .	19
3.3. Resultados . . . . .	19
3.3.1. Medición de Intensidade de Radiación de Diferentes fontes de Luz .	19
3.3.2. Caracterización de Celdas Solares . . . . .	20
3.3.3. Parámetros das Celdas Solares en función da Intensidade de Radiación	22
3.3.4. Corrente de Celda Solar en función do ángulo de incidencia da Radiación . . . . .	23
3.3.5. Conexión de paneles en serie . . . . .	26
3.3.6. Conexión de paneles en paralelo. . . . .	27
3.3.7. Curva característica . . . . .	28
3.3.8. Potencia máxima e rendemento. . . . .	31
3.4. Discusión e conclusións . . . . .	31

# 1. Instrumentación Electrónica Básica

## 1.1. Introducción e obxectivos

Con esta práctica, buscamos familiarizarnos coa montaxe de circuitos electrónicos sinxelos así como o uso de sistemas de medición nelos. Os nosos obxectivos principais son a comprobación da Lei de Ohm, as Leis de Kirchhoff, o Teorema de Thévenin e Norton e o Teorema de Transferencia de Máxima Potencia.

## 1.2. Material e montaxe experimental

Usaremos os seguintes materiais:

- 4 Resistencias.
- Resistencia variable.
- Protoboard e conexións.
- Xerador de tensión.
- Polímetro.

A montaxe experimental irá variando según a sección a estudar no laboratorio; esta explicaráse a medida que a vaíamos facendo.

Anotaremos os valores correspondentes e representaremos en tablas estes datos así como os resultados. Nas circunstancias necesarias, tamén graficaremos a información necesaria.

## 1.3. Resultados

### 1.3.1. Resistencias individuais

Pídesenos obter catro resistencias de distinto valor de entre  $500\Omega$  e  $200k\Omega$ . Observamos o código propio das resistencias e a maiores comparamos coa medición obtida co polímetro. Na seguinte táboa sitúanse os datos:

Elemento	Resistencia teórica		Resistencia polímetro	
	Valor	Incertidumbre	Valor	Incertidumbre
R1	1 k $\Omega$	5 %	1.003 k $\Omega$	0.001 k $\Omega$
R2	100 k $\Omega$	5 %	100.0 k $\Omega$	0.01 k $\Omega$
R3	10 k $\Omega$	5 %	9.93 k $\Omega$	0.01 k $\Omega$
R4	150 k $\Omega$	5 %	145.5 k $\Omega$	0.1 k $\Omega$

Cuadro 1: Resistencias individuais

Vemos que en tódolos casos coinciden dentro das súas incertezas, unha é a incerteza de fábrica e outra a do polímetro, concuerdan.

### 1.3.2. Lei de Ohm

Tomamos agora unha das resistencias, no noso caso, R3, a de 10 k $\Omega$ , e na disposición do circuito mostrado na imaxe de a continuación, medimos a caída de potencial en bornes da resistencia (en paralelo co polímetro) e a intensidade que cruza dito elemento (en serie co polímetro), a medida que variamos dita tensión co xerador de tensión.

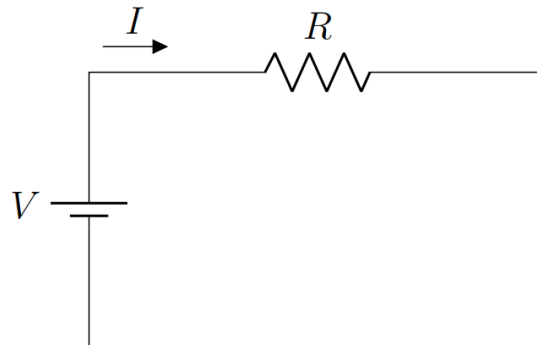


Figura 1: Circuito para comprobación da lei de Ohm.

Logo, os datos amósanse na seguinte táboa.

Voltaxe (V)	Intensidade (mA)
1.073	0.10
2.08	0.21
3.14	0.31
4.13	0.41
5.12	0.51
6.04	0.61
7.09	0.72
8.16	0.82
8.73	0.88
7.55	0.76

Cuadro 2: Caída de tensión e intensidade na resistencia de 10 k $\Omega$

Seguindo a lei de Ohm:

$$V = I \cdot R$$

Se representamos V fronte a I, debería darnos unha recta sen término independente con pendente R, así, representamos estes datos e axustamos á recta.

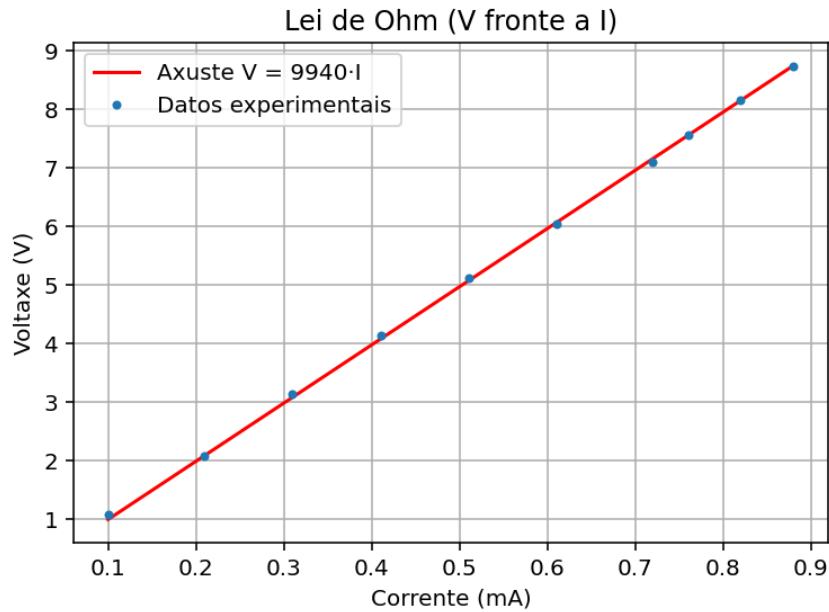


Figura 2: Gráfica e axuste de V frente a I

Cun axuste con coeficiente de correlación  $r=0.9999$ , achamos que

$$R = 9940\Omega$$

O que está moi preto do noso valor calculado co polímetro de  $9930 \pm 10\Omega$ ; verificamos así, a Lei de Ohm.

### 1.3.3. Resistencia nun Circuito

Coas catro resistencias coñecidas, montaremos o circuito mostrado na seguinte imaxe e calcularemos e compararemos o valor teórico da resistencia entre os puntos A e B, e a resistencia entre ditos puntos comprobada co polímetro.

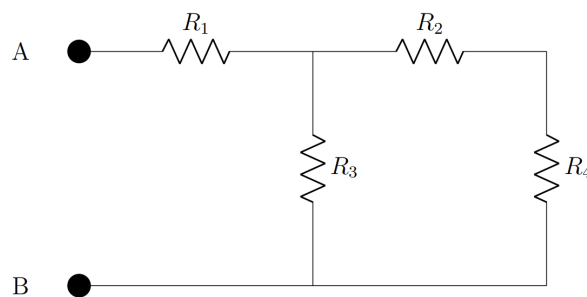


Figura 3: Resistencias en circuito.

O valor teórico ven dado pola ecuación:

$$R_{total} = R1 + \frac{R3 \cdot (R1 + R2)}{R2 + R3 + R4} \quad (1)$$

Cos valores aplicados das resistencias medidos co polímetro (máis preciso). Comparamos na táboa os valores teórico e experimental:

$R_{total}$ Teórica ( $k\Omega$ )	$R_{total}$ Experimental ( $k\Omega$ )
10.54	10.57

Cuadro 3: Resistencia total teórica e experimental.

Ambos valores son extremadamente parecidos, a resistencia total adécuase moi ben ó valor esperado.

#### 1.3.4. Leis de Kirchhoff

Usando a mesma montaxe que na figura 3, aplicamos entre os extremos A e B una diferenza de tensión de entre 5 e 10 V (no noso caso, 8.7 V), así, teríamos formado dúas mallas e tres ramas.

Estas ramas estarían compostas deste xeito:

- **Rama 1:** V (fonte de alimentación) e R1.
- **Rama 2:** R3.
- **Rama 3:** R2 e R4.

E as mallas serían:

- **Malla 1:** Rama 1 e Rama 2.
- **Malla 2:** Rama 2 e Rama 3.

Procedemos medindo a caída de tensión en bornes de cada elemento o polímetro en paralelo e a intensidade que cruza cada rama co polímetro en serie. Con estos datos, debemos verificar que se cuplen as Leis de Kirchhoff que son:

•**Lei de Correntes:** A suma de tódalas correntes que entran nun nodo é igual á suma de correntes que saen dese nodo.

•**Lei de Tensións:** Nunha malla, a suma de todas as caídas de voltaxe é igual ó voltaxe total suministrado

Os datos tomados móstranse nas seguintes táboas:

Elemento	Caída de Tensión (V)
V	8.7
R1	-0.835
R2	-4.68
R3	-8.00
R4	-3.23

Cuadro 4: Caídas de tensión en cada elemento do circuito con voltaxe 8.7V entre A e B.

	Rama	Intensidade (mA)
Entrada	1	0.80
Saída	2	0.77
	3	0.02

Cuadro 5: Caídas de tensión en cada rama do circuito con voltaxe 8.5V entre A e B.

Cos datos da primeira táboa, analizamos as tensións en cada malla:

$$\text{Malla 1 : } V + R1 + R3 = -0,14V$$

e

$$\text{Malla 2 : } R2 + R4 - R3 = 0,09V$$

Ambos resultados están moi pretos a 0V, o que, coa súa incerteza, permíte verifica que se cumpre a Lei de Tensións de Kirchhoff.

Coa segunda táboa, analizamos a corrente de entrada no nodo coa de saída, temos:

$$I_{Entrada} - I_{Sada} : I_{Rama1} - (I_{Rama2} + I_{Rama3}) = 0,01mA$$

Que, coa incerteza propia, é unha intensidade nula, tal como predice a Lei de Correntes de Kirchhoff.

### 1.3.5. Teoremas de Thévenin e Norton

O esquema do circuito nesta sección será distinta, seguimos o seguinte modelo:

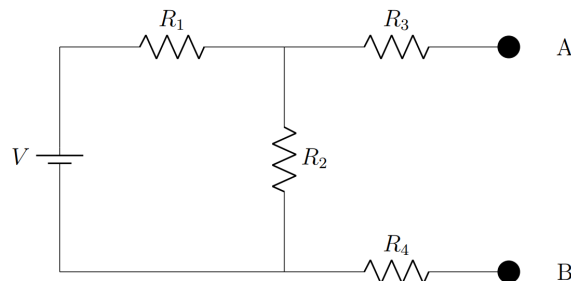


Figura 4: Circuito para a comprobación dos teoremas de Thévenin e Norton.

A nosa misión é: medir a caída de tensión entre A e B en circuito aberto; medir a corrente que circula por A e B en cortocircuito e medir a resistencia total por A e B con xerador de tensión en cortocircuito (0V).

Mediante a ecuación:

$$R_{eq} = \frac{V_T}{I_N} \quad (2)$$

calcularemos a resistencia equivalente teórica. Mentres, coa medida directa do polímetro en modo medidor de resistencia, mediremos a resistencia equivalente experimental.

Coa fonte seleccionada en 8.5 V, medimos en A e B 8.36 V de voltaxe e 0.07 mA das

formas previamente mencionada. Mostramos agora na seguinte táboa, as  $R_{eq}$  calculadas a partir de estos datos e medido co polímetro experimentalmente.

$R_{eq}$ teórica (k $\Omega$ )	$R_{eq}$ experimental (k $\Omega$ )
119	255

Cuadro 6:  $R_{eq}$  teórica e experimental.

Observamos que os valores distan moito un de outro. En espacial, como veremos no seguinte apartado, vemos que o valor experimental é o que está lonxe do teórico, estando máis preto da realidade o valor teórico. Isto pode deberse ou a algún erro na composición do circuito ou á hora de medir ou a que o polímetro fallou. Cabe mencionar que o polímetro que estivemos a usar xa dera valores moi extraños en outras medicións e tamén fundira o seu fusible que tivo que ser cambiado.

### 1.3.6. Teorema de Transferencia de Máxima Potencia

No circuito anterior, colocamos unha resistencia variable ( $R_L$ ) entre A e B. Esta debe tener de rango máximo aproximadamente  $\approx 2 \cdot R_{eq}$ . Agora, cunha Tensión constante no xerador de tensión, iremos variando a resistencia e medindo a caída de tensión en bornes desta, así como a intensidade que circula a través dela. A partir destes valores, calcularemos a potencia  $P = \frac{V^2}{R_L}$  a representaremos fronte a  $R_L$ . Na curva representada, debería confirmarse que o valor máximo da potencia coincide cando  $R_L$  é igual a  $R_{eq}$  calculado previamente.

Como os datos medidos foron tensión e intensidade, calcularemos a potencia como:

$$P = V \cdot I$$

e a resistencia como:

$$R_L = \frac{V}{I}$$

Os valores medidos de tensión e intensidade na resistencia  $R_L$  foron:

Caída de Tensión (V)	Intensidade ( $\mu$ A)
5.78	36.4
1.350	76.6
2.04	70.4
3.52	57.0
4.34	49.5
5.17	42.0
6.43	30.5
7.22	23.4
8.01	16.2
6.94	26.0

Cuadro 7: V e I na resistencia  $R_L$ .

E por tanto, podemos xerar una táboa coa Potencia e Resistencia:

Potencia ( $\mu\text{W}$ )	$R_L$ ( $\text{k}\Omega$ )
210.39	158.8
103.41	17.6
143.62	29.0
200.64	61.8
214.83	87.7
217.14	123.1
196.11	210.1
168.95	308.5
129.76	494.4
180.44	266.9

Cuadro 8: Potencia e  $R_L$  a partires dos datos da táboa anterior.

Agora, representamos  $P$  vs  $R_L$ . Tamén, faremos un axuste á ecuación:

$$P(R_L) = \frac{V_0^2 \cdot R_L}{(R_L + R_{eq})^2}$$

Aquí,  $P$  é máximo se  $R_L$  é igual a  $R_{eq}$ . Con este axuste, obteremos  $R_{eq}$  e tamén o  $V_0$ , que non nos importa pero o obtemos.

A gráfica dos nosos puntos co axuste:

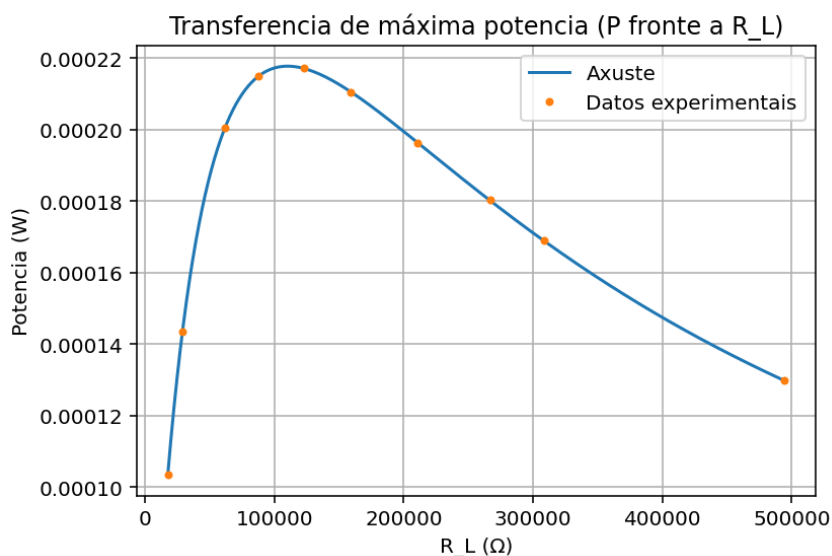


Figura 5: Gráfica de Potencia vs  $R_L$  con axuste.

E o resultado do axuste é que

$$R_L = 110,2 \text{ k}\Omega$$

e

$$V_0 = 9,8V$$

Verifícase así o Teorema de Transferecia de Máxima Potencia.

O valor de  $R_L$  é moi cercano ó previamente calculado de forma teórica no apartado anterior, e lonxano co obtido de forma experimental.

#### 1.4. **Discusión e conclusións**

Nesta práctica, familiarizámonos co material de laboratorio e a montaxe de circuitos sinxelos.

Comenzamos comprobando que o valor indicado das resistencias coincide co medido polo polímetro coa súa incerteza. Despois, verificamos a lei de Ohm co uso dunha regresión lineal sobre os valores de tensión e intensidade nunha resistencia. Tras isto, verificamos que o valor dunha resistencia total teórica dun circuito composto por resistencias, é igual ó experimental respectivo. A continuación, verificáramos as dúas leis de Kirchhoff con elementos dun circuito. Xa ao final, propuxéramos o Teorema de Thévenin e Norton que non dera igual os valores Teórico e Experimental, seguramente polo funcionamento do polímetro. Sen embargo, o valor esperado por este teorema, si se confirmara ao facer uso neste circuito dunha resistencia variable co Teorema de Transferencia de Máxima Potencia, o que confirmara tanto este teorema como o anterior.

En xeral, os resultados son moi cercanos ou idénticos (no rango de incerteza) ós valores teóricos esperados agás no da medición experimental do Teorema de Thévenin e Norton. Este último pode explicarse, seguramente, polo estado do polímetro.

## 2. Diodo Semiconductor. Caracterización y Aplicación en Fuentes de Alimentación

### 2.1. Introducción

### 2.2. Material e métodos

- 4 Diodos IN4001
- 2 Resistencias  $1k\Omega$
- Resistencia de  $330\Omega$
- Resistencia de 2 W de potencia
- Regulador de tensión LM317
- Fonte de tensión DC
- Fonte de tensión AC
- Transformador para reducir a voltaxe da tensión AC
- Osciloscopio

A medida que se fixo a práctica preparáronse múltiples circuitos disntintos que se explican mais adiante, levando a cabo distintos procedementos.

### 2.3. Diodo real

A curva característica do diodo real é:

$$I_d = I_s(e^{\frac{qV_d}{nkT}} - 1)$$

A cal pode medirse fácilmente usando unha resistencia de  $1k\Omega$  para montar o circuito. Obtemos  $I$  en función da voltaxe na resistencia  $V_R$  e  $V_d$  medimos directamente  $V_d$ .

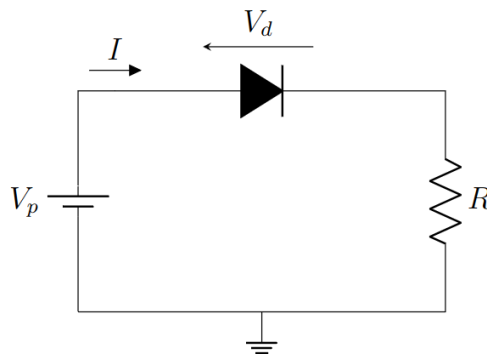


Figura 6: Circuito diodo real.

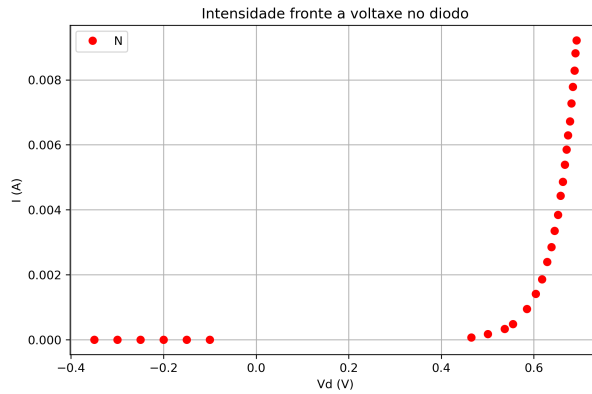


Figura 7: Curva característica do diodo.

O baleiro nos datos é debido á medición de  $I_d = 0$  para todas as  $V_d < 0,465V$ , incluídos os datos en configuración inversa. Non se mostran as barras de erros por claridade visual, pero as incertidumbres están calculadas nas táboas de datos.

Pódese axustar a rexión de crecemento exponencial á:

$$I_d \approx I_s e^{\frac{qV_d}{nkT}}$$

De forma que podemos aproximar á recta:

$$\ln(I_d) \approx \ln(I_s) + \frac{qV_d}{nkT}$$

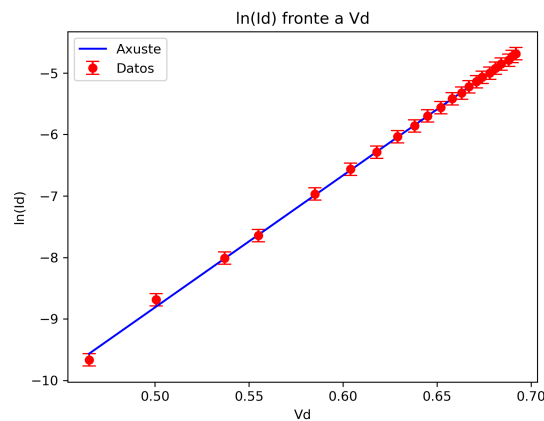


Figura 8: Recta axustada do  $\ln(I_d)$ , fronte a  $V_d$ .

Onde só se usaron os pares de datos con  $I_d > 0$ . Onde a pendente da recta é  $21,47 \pm 0,12V^{-1}$ , e a ordeada na orixe é  $-19,547 \pm 0,076$ .

## 2.4. Fontes de alimentación.

Entendido o diodo pasamos á elaboración de circuitos que sirvan como fontes de alimentación AC/DC, para isto usamos unha fonte AC e un transformador, para obter unha Voltaxe efectiva de 24 V. Para as seguintes medicións úsase o osciloscopio, utilizando

unha sonda para obter unha atenuación x10. En toda esta sección usouse como resistencia de unha resistencia de potencia de 2W.

O sinal de entrada dos circuitos, que ven do transformador, é da forma:

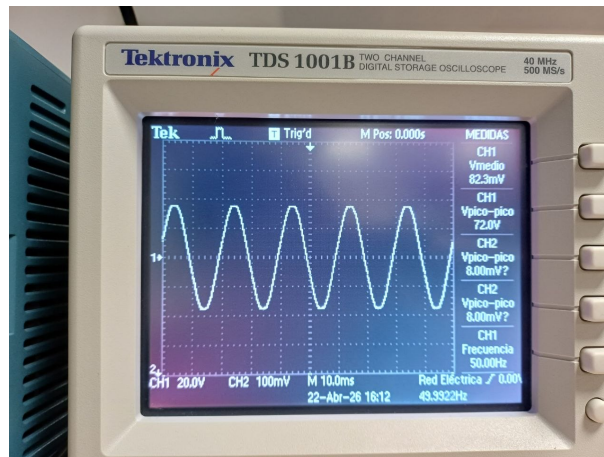


Figura 9: Sinal de entrada ao circuito

Onde podemos apreciar  $72V_{pp}$ , isto é consistente cos  $24V_{ef}$  que o transformador en teoría suministra xa que  $\frac{72}{2\sqrt{2}} = 25,46 \approx 24$ .

#### 2.4.1. Rectificador de media onda.

Facemos o seguinte circuito:

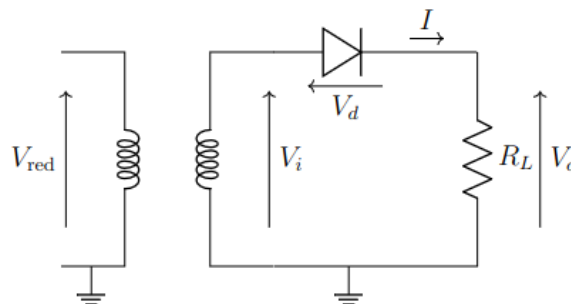


Figura 10: Circuito rectificador de media onda.

Usamos o diodo da parte anterior e unha resistencia de carga de potencia de 2 W. O sinal de saída medido co osciloscopio foi:

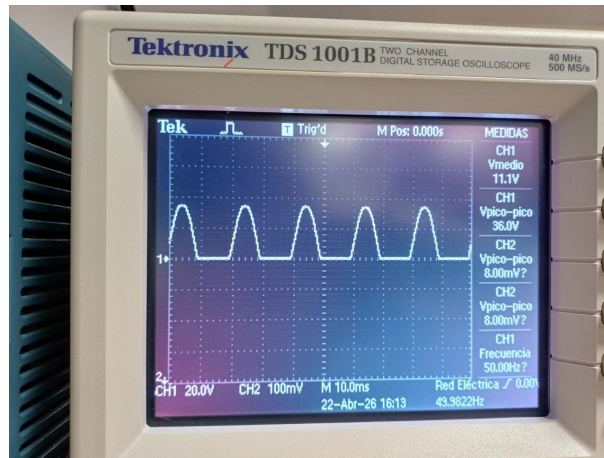


Figura 11: Sinal rectificado media onda

Podemos ver que o sinal de saída conserva as partes de tensión positiva e elimina as negativas, a tensión dos picos é de  $36V$ , a metade da de entrada, xa que antes estabamos a medir  $2A$  e agora medimos  $A$ , sendo  $A$  a amplitude da sinal,  $A = 36V$ , a voltaxe efectiva é de  $\frac{36}{2\sqrt{2}} = 12,73V$ , debido a que estamos perdendo a voltaxe das partes negativas.

#### 2.4.2. Rectificador de onda completa.

O circuito rectificador de onda completa usa unha ponte de diodos para solventar o problema do circuito anterior, e rectificar toda a onda:

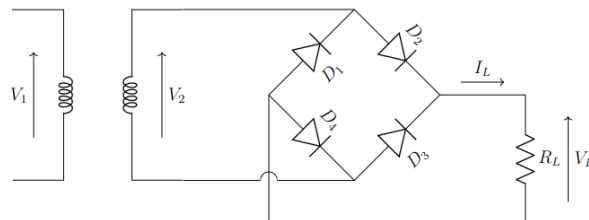


Figura 12: Circuito rectificador onda completa

Na ponte de diodos usamos 4 diodos idénticos ao primeiro. Obtivemos a seguinte señal de saída:

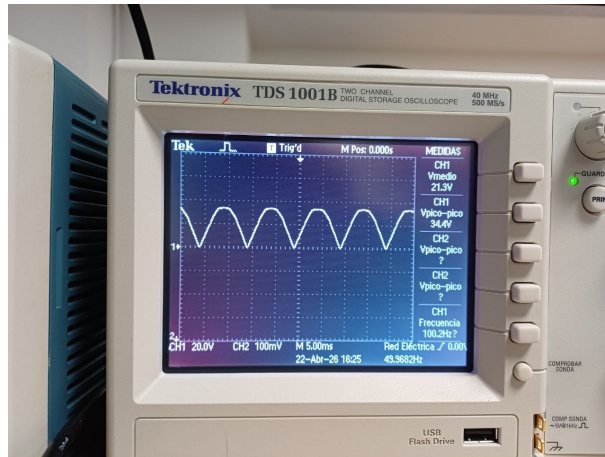


Figura 13: Sinal onda completa rectificada.

O novo circuito rectifica completamente a onda, ao custo de reducir lixeiramente  $V_{pp}$  a  $34,4V$ , dando un valor de voltaxe efectiva de  $24,32V$ .

### 2.4.3. Filtro

O seguinte paso é o filtrado do sinal, para isto usouse un condensador de  $33\mu F$  xunto coa resistencia.

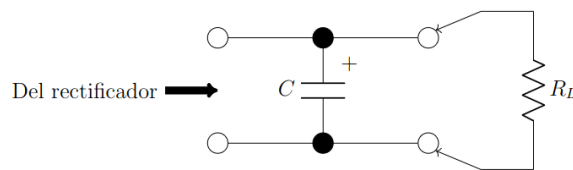


Figura 14: Circuito filtro

Obtendo un sinal:

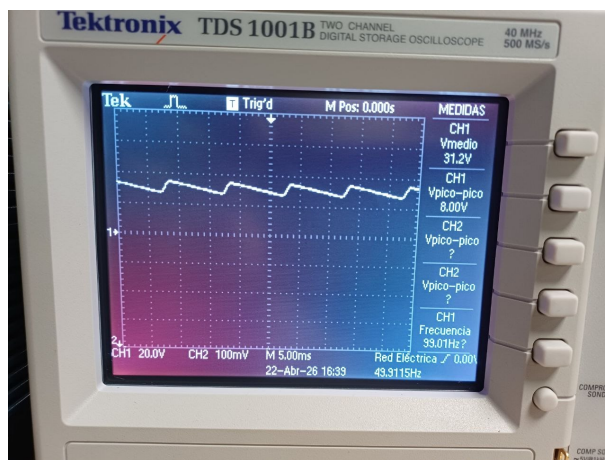


Figura 15: Sinal filtrado

O sinal filtrado dista moito de ser plano, cun valor medio de  $31,2V$  rizado e  $8V$ , despois utilizouse un condensador moito máis potente, de  $470\mu F$ , obtendo un sinal moito mellor:

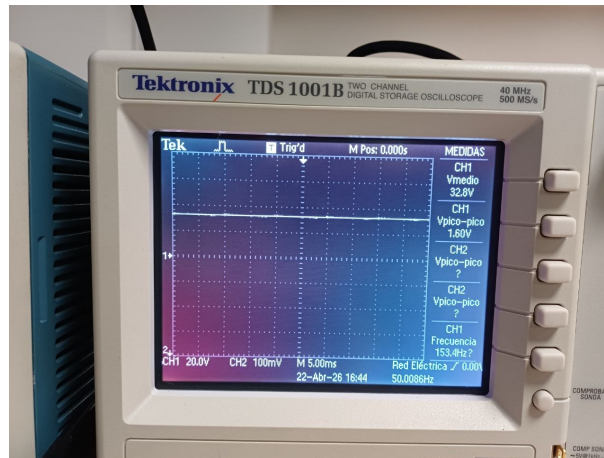


Figura 16: Sinal filtrado con  $470F$

Cun valor medio de  $32,8V$  e un rizado de  $1,6V$ .

#### 2.4.4. Regulación de tensión.

Na por último usouse un regulador de tensión para obter unha  $V$  de saída de  $5V$ :

$$V_{OUT} = 1,25\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

Elixíronse  $R_2 = 1k\Omega$  e  $R_1 = 330\Omega$ , obtendo o seguinte sinal de saída:

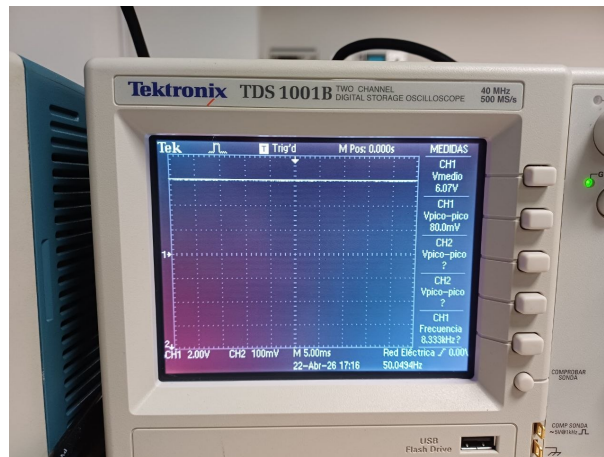


Figura 17: Sinal regulado

Onde  $V = 6,07 V$ , con rizado de  $80mV$ .

## 2.5. Discusión e conclusións

Nesta práctica foi posible construír a fonte de alimentación AC/DC cun rizado reducido, e incluso elixindo a voltaxe de saída. As fontes de erro principais foron as aproximacións en certos cálculos e a diferenza entre os valores reais e nominais das resistencias, pero en xeral os resultados foron bós dentro dun marxe.

## 2.6. Anexo

### 2.6.1. Datos medidos

Os datos de  $I_d$  e  $V_d$  do diodo real móstranse na seguinte táboa:

$V_d(V)$	$V_r (V)$	$I_s (A)$	$s(I) (A)$
0,465	0,0635	6,35E-05	6,35E-06
0,555	0,479	4,79E-04	4,79E-05
0,585	0,942	9,42E-04	9,42E-05
0,604	1,407	1,41E-03	1,41E-04
0,618	1,859	1,86E-03	1,86E-04
0,629	2,39	2,39E-03	2,39E-04
0,638	2,85	2,85E-03	2,85E-04
0,645	3,35	3,35E-03	3,35E-04
0,652	3,84	3,84E-03	3,84E-04
0,658	4,43	4,43E-03	4,43E-04
0,663	4,86	4,86E-03	4,86E-04
0,667	5,39	5,39E-03	5,39E-04
0,671	5,85	5,85E-03	5,85E-04
0,674	6,29	6,29E-03	6,29E-04
0,678	6,72	6,72E-03	6,72E-04
0,681	7,28	7,28E-03	7,28E-04
0,684	7,79	7,79E-03	7,79E-04
0,688	8,29	8,29E-03	8,29E-04
0,690	8,82	8,82E-03	8,82E-04
0,692	9,22	9,22E-03	9,22E-04
0,537	0,332	3,32E-04	3,32E-05
0,5006	0,1691	1,69E-04	1,69E-05
-0,101	0	0,00E+00	1,00E-07
-0,154	0	0,00E+00	1,00E-07
-0,213	0	0,00E+00	1,00E-07
-0,244	0	0,00E+00	1,00E-07
-0,309	0	0,00E+00	1,00E-07
-0,362	0	0,00E+00	1,00E-07

$I_d$  calcúlase como  $I_d = \frac{V_r}{1000\Omega}$ . Para calcular a súa incertidumbre úsase propagación:

$$s(I_d) = \sqrt{\left(\frac{1}{R}s(R)\right)^2 + \left(\frac{V_r}{R^2}s(V_r)\right)^2}$$

Onde  $s(V_r)$  é a sensibilidade da medida (distinto en cada medida), e  $s(R) = 100\Omega$ , un 10 % do valor de  $R$ .

## 3. Celdas Solares

### 3.1. Introducción e obxectivos

O obxectivo desta práctica é principalmente familiarizarnos co funcionamento das células solares así como observar os fenómenos estudados previamente en clase, os seus parámetros e as súas configuracións en función dos requisitos e necesidades en forma de voltaxe, intensidade eléctrica ou potencia.

### 3.2. Material e montaxe experimental

Os materiais usados nesta práctica son:

- 2 Polímetros.
- Sensor de Intensidade de Radiación.
- Celdas Solares.
- Chapas de Sombreado.
- Lámpada de intensidade regulable.
- Cables conectores.
- Banco de traballo.

A montaxe será específica, irá cambiando en función da materia de estudo. Por tanto, en cada sección mencionaremos como será a montaxe e que vai cambiando dunha parte a outra.

Iremos anotando os valores pedidos e representando tales datos en forma de táboas ou gráficas, tamén, nos casos requiridos, presentaremos resultados.

### 3.3. Resultados

#### 3.3.1. Medición de Intensidade de Radiación de Diferentes fontes de Luz

O primer apartado consiste en caracterizar a intensidade de radiación medida co sensor de diferentes fontes de luz. Buscaremos certas fontes de luz e, perpendicularmente e a distintas distancias subsectivas, iremos anotándoas. O sensor de intensidade de radiación xera una diferenza de tensión que deberemos medir co polímetro, esta se traduce as unidades de intensidade da seguinte forma:

$$1mV = 1 \frac{W}{m^2}$$

Na seguinte táboa encóntranse os datos obtidos.

<b>Fonte de Luz</b>	<b>Irradiancia Cerca (<math>W/m^2</math>)</b>	<b>Irradiancia Medio (<math>W/m^2</math>)</b>	<b>Irradiancia Lonxe (<math>W/m^2</math>)</b>
Lámpada Artificial	332	280	162
Linterna Teléfono Móvil	14	11	9
Iluminación Interior	15	10	6

Cuadro 9: Comparativa de intensidades según a distancia para diferentes elementos.

A información que de aquí sacamos é que canto máis cerca da fonte da luz, maior a irradiancia medida xa que máis luz incide no noso sensor e non noutras áreas.

### 3.3.2. Caracterización de Celdas Solares

As células solares traballan cunhas tensións e correntes determinadas pola súa natureza de circuito eléctrico. Nesta sección, determinaremos a tensión en circuito aberto e a corrente en cortocircuito dunha célula solar.

**Tensión en Circuito Aberto** A tensión en circuito aberto ou tensión en vacío é a máxima tensión producida nun circuito cando a intensidade é nula ( $I = 0A$ ).

Usando as chapas de sombreado, mediremos os distintos valores de tensión según a superficie da célula que si recibe luz (superficie irradiada), dende o 0% ata o 100%.

Os valores medidos foron:

Tensión (mV)	Superficie irradiada
93	0 %
511	50 %
526	75 %
535	100 %

Cuadro 10: Tensión en vacío respecto á superficie irradiada.

E, representando estes puntos de forma gráfica, obteríamos a seguinte imaxe.

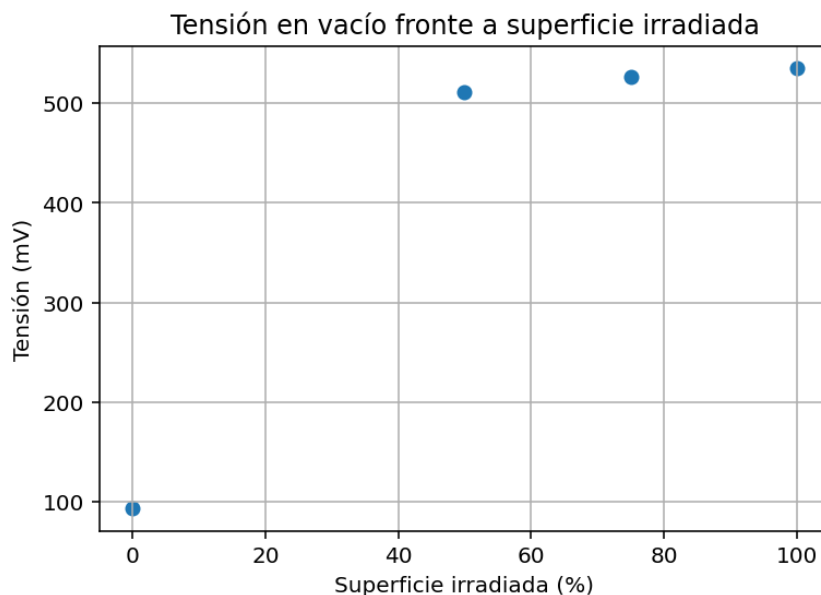


Figura 18: Tensión en vacío fronte á superficie irradiada.

Apreciase que de 0% a 50% o salto é enorme e despois crece dunha forma máis pausada buscando converxer en torno aos 550 mV. Tamén é de dicir que non vai haber tensión

máxima que no caso de 100 % superficie irradiada con 535 mV de voltaxe producida. É destacable tamén, que cando a superficie iluminada é do 0 %, a tensión mantén un valor non nulo, probablemente pola tensión de offset do equipo ou o calentamento térmico pois pode dar enerxía suficiente a certos electróns para superar o gap enerxético, isto é plausible xa que as chapas eran materiais condutores de cor negra é a fonte de luz xeraba bastante calor.

**Corrente en Cortocircuito** Dita corrente é a corrente que sae da celda cos dous terminais unidos, sendo a corrente máxima extraíble.

Ao igual que antes, mediremos co polímetro (en este caso intensidade) a unha intensidade da fonte de luz constante e variando, coas chapas de sombreado, a superficie irradiada.

Ditas medicións mostranse a continuación:

Corrente (mA)	Superficie irradiada
0.413	0 %
33.3	50 %
39	75 %
42	100 %

Cuadro 11: Corrente en cortocircuito respecto á superficie irradiada.

E a súa representación gráfica:

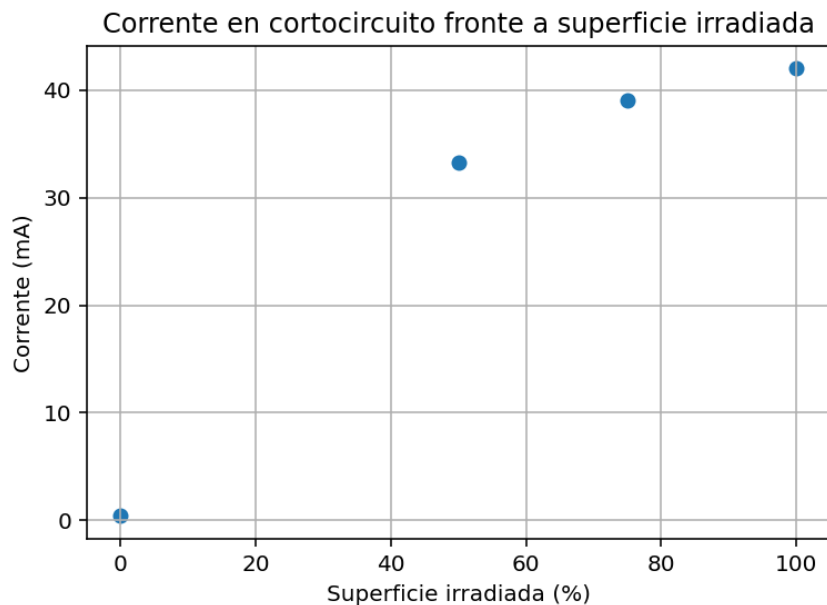


Figura 19: Corrente en cortocircuito fronte á superficie irradiada.

A gráfica é similar a presentada anteriormente da tensión fronte á superficie. Obsérvase un crecemento rápido dente o 0 % ata o 50 % de superficie e logo un estancamento que

parece levar á curva a converxer sobre os 45 mA. Ten sentido pois o valor máximo posible (cando a superficie iluminada é do 100 %) é, neste caso, duns 42 mA.

O valor da intensidade sen superficie iluminada está preto dos 0 mA tal como cabería esperar.

Mentres que a representación da tensión debería amosar una relación logarítmica (e o fai); a da tensión debería ser lineal pero non se aprecia una recta sen término independente no gráfico, parece unha recta distorsionada. Mostrase un comportamento cuasi-lineal pero claramente crecente, con cada punto de maior valor que o anterior. Isto pode ser pola xeometría do foco, que ao estar cerca, non reparte de forma equitativa a luz en cada diferencial de superficie, pesando máis se se tapa en certas rexións ou outras.

### 3.3.3. Parámetros das Celdas Solares en función da Intensidade de Radiación

Como acabamos de dicir no apartado anterior, a radiación solar non incide sobre o panel coa mesma intensidade, por tanto, nesta sección estudaremos a relación da tensión en circuito aberto coa corrente de cortocircuito en función da intensidade de radiación do foco. Usaremos dúas células consecutivas conectadas en paralelo, así, os niveis de corrente xerados señan superiores.

Así, medindo por cada intensidade de radiación regulada polo foco, a tensión e corrente das formas xa mencionadas, obtemos:

Tensión (mV)	Corrente (mA)	Intensidade de Radiación ( $\frac{W}{m^2}$ )
348	11.51	8
410	23.4	12
442	44.5	21
493	73.0	51
516	93.0	89
521	190	102
526	280	122
529	299	138
529	195	150

Cuadro 12: Tensión en circuito aberto e corrente en cortocircuito respecto á intensidade de radiación.

Graficando os datos da tabla:

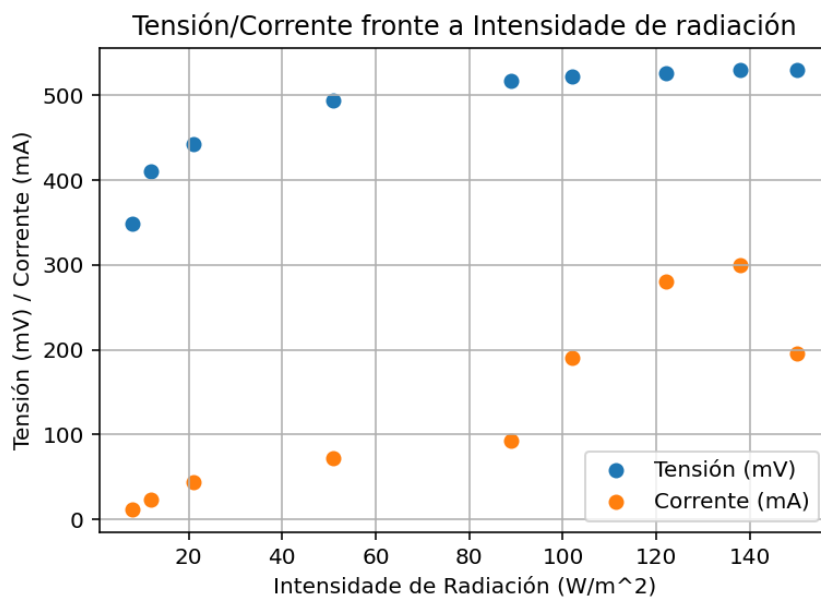


Figura 20: Tensión en circuito aberto e corrente en cortocircuito fronte á intensidade de radiación.

A tensión mostra o comportamento logarítmico esperado, saturando rapidamente a partir dos  $75 \text{ W/m}^2$ . Por outro lado, a corrente non mostra de boa forma a tendencia lineal que debería, perturbándose coas altas intensidades. Poden parecer malos datos os da corrente pero foron os realmente medidos na montaxe indicada, estas fluctuaciones poden atribuírse ao efecto da temperatura (que a maior intensidade, máis calor do foco, alterando a eficiencia da placa solar) ou a erros do polímetro ao traballar con altas correntes. Pode apreciarse o modelo de célula solar e compórtase como debería no aspecto da tensión pero non no da corrente.

### 3.3.4. Corrente de Celda Solar en función do ángulo de incidencia da Radiación

No sistema da Terra, onde a fonte natural de intensidade de radiación principal é o Sol, impórtannos estudar o aspecto da súa radiación, que varía con cada momento do día e con cada período do ano ao variar a súa posición. Así, nos seguintes apartados estudiaremos estes aspectos, medindo a intensidade eléctrica producida nun panel solar, en función do momento do día e da altura do Sol (estación).

**Ángulo de Inclinación do panel** Colocando o polímetro en modo amperímetro para medir correntes nos paneis, iremos variando a inclinación da carcasa dos paneis de  $15^\circ$  en  $15^\circ$  entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , e anotaremos os valores medidos.

A táboa cos datos queda:

Corrente (mA)	Ángulo ( $^{\circ}$ )
5.6	$0^{\circ}$
23	$15^{\circ}$
79	$30^{\circ}$
104	$45^{\circ}$
119.9	$60^{\circ}$
124.3	$75^{\circ}$
125.2	$90^{\circ}$

Cuadro 13: Corrente en cortocircuito respecto ao ángulo de inclinación.

Aquí,  $90^{\circ}$  de inclinación tradúcese en  $90^{\circ}$  de inclinación do eixe dos paneis solares respecto o chan, nestos casos, sería  $0^{\circ}$  entre a normal á superficie das placas ao foco (Sol). É natural, pois, que con  $90^{\circ}$  consigamos a máxima corrente no circuito.

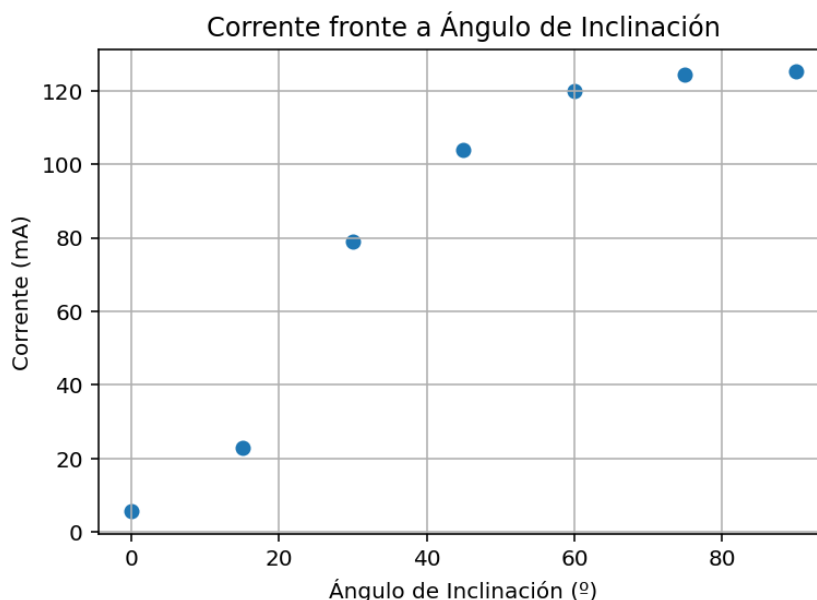


Figura 21: Corrente en cortocircuito respecto ao ángulo de inclinación.

Móstrase no gráfico que este máximo encóntrase en torno ós  $90^{\circ}$  de inclinación (apuntando de cara ao foco) e o mínimo en  $0^{\circ}$ . Tal como esperaríamos ao incidir os raios paralelos ao panel (e non incidir nel).

Así, a orientación óptima dun panel solar respecto a unha fonte de luz é apuntando a súa superficie cara ela. No caso de que poda moverse, que a placa vaia seguindo o sol, e no caso que non, que se sitúe apuntando á rexión de maior altura do Sol no día, é dicir, cara o Sur no hemisferio norte.

En Santiago de Compostela, nunha latitude duns  $42.5^{\circ}$ , á inclinación óptima do panel respecto o chan é duns  $42.5^{\circ}$ . Isto sae por trigonometría, pero pode observarse na seguinte imaxe que mostra que en latitudes próximas o ecuador o óptimo é inclinación  $0^{\circ}$  e nos polos (latitudes cercanas aos  $90^{\circ}$ ), inclinarlo  $90^{\circ}$ , por iso en santiago a inclinación óptima hai de ser a da súa latitude. Cabe dicir que a altura do Sol cambia coas estacións

e este razoamento constitúe unha mera aproximación para visualizar a inclinación óptima dun panel solar non móbil.

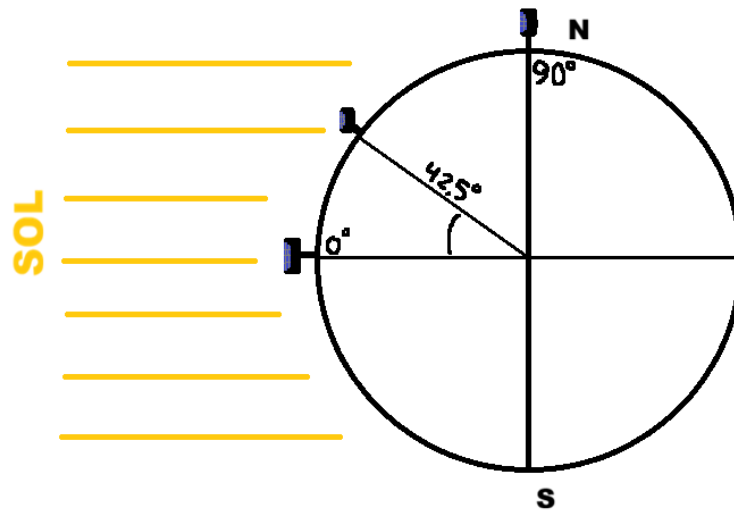


Figura 22: Ilustración representativa da inclinación óptima dunha placa solar respecto o Sol en Santiago de Compostela.

Esta inclinación óptima depende da latitude e do momento do ano, pois a terra está inclinada respecto o plano solar, uns  $23.5^\circ$ , así, a inclinación óptima variará entre os  $66^\circ$  (Inverno) e os  $19^\circ$  (Verán), sendo o seu promedio  $42.5^\circ$  (óptimos en Outono e Primavera).

A ecuación óptima da inclinación diaria do panel sería algo tal que así:

$$\text{Inclinación Óptima}^\circ = \text{Latitude}^\circ + \text{Inclinación da Terra}^\circ \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{T_{\text{ano}}} \cdot \left(\frac{T_{\text{ano}}}{4} + t\right)\right)$$

Onde  $t$  representa o día do ano sendo aproximadamente  $t = 0$  o día do solsticio de inverno e  $t = \frac{T_{\text{ano}}}{2}$  o solsticio de verán.  $T_{\text{ano}}$  é o período de translación da Terra ó redor do Sol en días.

**Imitación do transcurso do día** Mentres no apartado anterior, comparábase a enerxía eléctrica xerada en función da inclinación vertical do foco (proporcional ás estacións), agora imos facelo en función da inclinación horizontal (proporcional aos momentos do día).

Manteremos a inclinación dos paneis solares constante ( $90^\circ$ ), e iremos variando o ángulo do foco respecto aos paneis dende  $90^\circ$  (representando Este) ata  $270^\circ$  (representando Oeste) a intervalos de  $22.5^\circ$ . Así, simulamos as diferentes posicións que ten o Sol no transcurso dun día e mediremos a corrente da celda.

Obtivemos:

Corrente (mA)	Posición do Sol	Posición do Sol ( $^{\circ}$ )
6.7	Este	90.0 $^{\circ}$
39.3	Suresteeste	112.5 $^{\circ}$
55.4	Sureste	135.0 $^{\circ}$
85.5	Sursureste	157.5 $^{\circ}$
87.6	Sur	180.0 $^{\circ}$
90.5	Sursudoeste	202.5 $^{\circ}$
83.3	Sudoeste	225.0 $^{\circ}$
52.2	Sudoesteoeste	247.5 $^{\circ}$
8.5	Oeste	270.0 $^{\circ}$

Cuadro 14: Corrente nen cortocircuito en función da posición do foco. Simulación transcurso dun día.

Coa súa graficación quedaría:

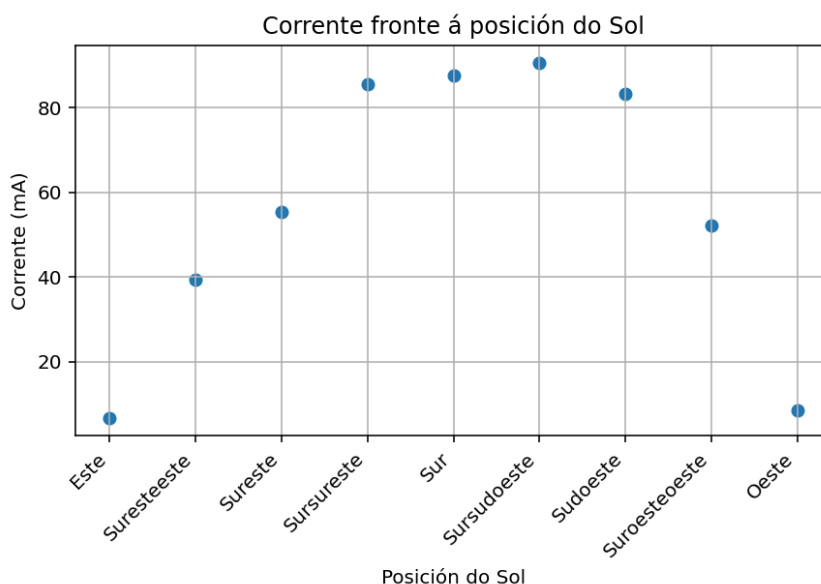


Figura 23: Corrente en cortocircuito en función da posición do foco. Simulación transcurso dun día.

Igual que no apartado anterior, medimos a maior cantidade de corrente cando o encóntrase perpendicular ó foco. Aquí o vemos porque a maior intensidade de corrente rexístrase en torno ao Sur.

Isto tradúcese en que o momento de maior produción de electricidade dunha placa solar é no mediodía solar, e ademáis, a súa posición óptima é apuntando cara o Sur xa que é onde pode rexistrarse este pico é á vez é onde pode xerar a maior cantidade de corrente ao longo dun día.

### 3.3.5. Conexión de paneles en serie

Nesta parte do experimento volveuse a cambiar a intensidade da fonte para non ter resultados moi altos ou baixos. Despois conectamos as celdas en serie, primeiro conectámolas de unha en unha para ver o efecto de cada unha:

Celdas en serie	V (mV)	I (mA)	P (W)
1	500	81	0,0405
2	1020	84,5	0,08619
3	1540	84,7	0,130438
4	2030	85,2	0,172956

Cuadro 15: Celdas en serie.

Podemos observar, a intensidade é básicamente constante, mentres que a Voltaxe aumenta en 500 mV por cada celda, este é o límite de voltaxe das celdas e polo tanto observamos que a intensidade é a de cada celda, mentres que as voltaxes súmanse.

Despois utilizáronse as chapas para escurecer as celdas solares, colocándose na segunda celda. Obtivéronse os seguintes datos:

Chapas en serie	V (mV)	I (mA)	P (W)
1/4	2010	85,5	0,171855
1/2	1920	60,6	0,116352
1	1575	3,85	0,00606375
1, 1/2, 1/4	1593	1,8	0,0028674

Cuadro 16: Celdas en serie con chapas.

Cando se usaron as 3 placas a completa usouse na segunda celda, a de 1/2 na terceira celda e a de 1/4 na cuarta.

Estes datos requiren unha análise coidadosa: pola parte da voltaxe observamos que sen chapa, con chapa de 1/4 e de 1/2 a voltaxe manténse bastante constante, que é o que observamos cando estudamos o comportamento individual das celdas. Por outra banda, a intensidade comeza en 85,2 mA, mantense case constante para a chapa de 1/4 e diminúe para as outras chapas. Este comportamento é similar ao comportamento da intensidade dunha celda individual.

O valor de intensidade de cada celda é maior a cando se fixo o estudo individual, isto se debe á maior intensidade de luz, aproximadamente o dobre. O comportamento no estudo inicial e no individual compárase na seguinte táboa:

Chapas	I (mA) Individual	I individual X2	I (mA) Serie
0	42	84	85,2
1/4	39	78	85,5
1/2	33,3	66,6	60,6
1	0,413	0,826	3,85

Cuadro 17: Celdas en serie con chapas vs celda individual.

Como se observa na táboa, o comportamento e o ritmo de diminución en ambos casos é similar. A conclusión é que cando as placas se conectan en serie a voltaxe total é a suma das voltaxes, mentres que a intensidade total é a intensidade da menor celda.

### 3.3.6. Conexión de paneles en paralelo.

Despois repetimos esta proba conectando as celdas en paralelo, obtendo os seguintes datos:

Celdas en paralelo	V (mV)	I (mA)	P (W)
1	500	79	0,0395
2	506	161,5	0,081719
3	509	240	0,12216
4	506	320,5	0,162173

Cuadro 18: Celdas en paralelo.

Neste caso observamos que a voltaxe mantéñse ao redor do límite de voltaxe máxima, mentres que a corrente aumenta linealmente con cada celda nuns 80mA.

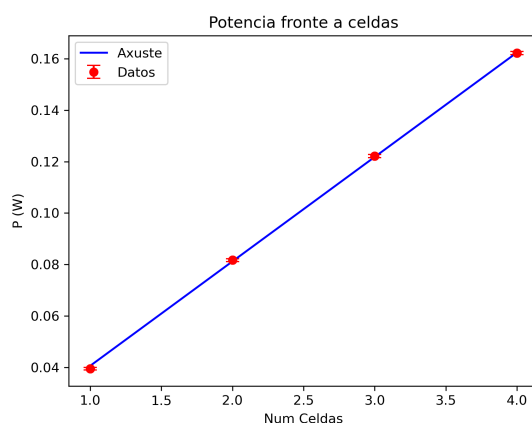


Figura 24: Potencia (W) fronte ao número de celdas.

Podemos ver que a potencia aumenta linealmente co número de celdas a un ratio de  $P = 0,04060 \pm 0,00014W$ , que con  $500mV$  corresponde a  $81,20 \pm 0,28mA$  por cada celda.

Antes de colocar as chapas reducimos de novo a potencia e volvimos medir sen e con chapas:

Chapas en paralelo	V (mV)	I (mA)	P (W)
0	506	280	0,14168
1/4	504	274	0,138096
1/2	500	257	0,1285
1	494	220	0,10868

Cuadro 19: Celdas en paralelo con chapas.

Vendo que con 4 celdas, 0 chapas obtemos 280 mA deducimos que cada celda aporta  $70mA$ . A tensión redúcese progresivamente ata chegar a aproximadamente  $3/4$  da máxima. Isto reflicte o efecto de reducir o aporte da celda específica que é chapada. Dedúcese que coas celdas en paralelo a tensión é constante mentres que a intensidade das celdas se suma.

### 3.3.7. Curva característica

Ao conectar as celdas solares a unha corrente de carga, a tensión e voltaxe xeradas varían de forma concreta. Para medir isto contruímos o seguinte circuito:

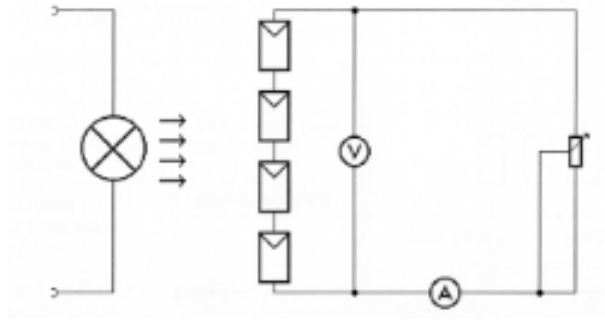


Figura 25: Circuito curva característica.

Usamos unha resistencia variable para observar como cambian V e I, repetimos o proceso para intensidades de luz de 10 e 8:  
 10 (Alta intensidade):

$V(V) \pm 0,01$	$I(mA) \pm 0,1$
2,06	20,3
2,02	50,1
1,97	80,0
1,90	110,1
1,82	130,1
1,73	140,5
1,43	150,9
1,20	150,2
1,02	150,5
0,546	151,1

Cuadro 20: Curva característica alta intensidade.

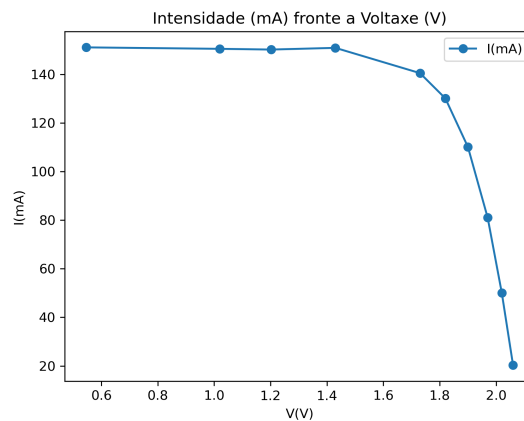


Figura 26: Curva alta intensidade.

8 (Baixa intensidade):

V (mV)	I (mA)
1994	20,1
1951	40,2
1888	60,6
1772	80,5
1500	93,3
1000	95,4
500	95,1
332	96

Cuadro 21: Curva característica baixa intensidade.

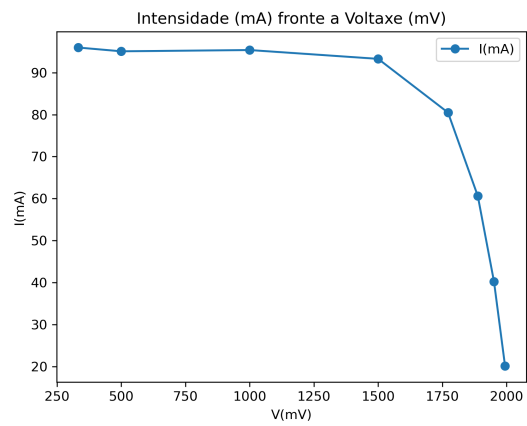


Figura 27: Curva baixa intensidade.

### 3.3.8. Potencia máxima e rendimento.

**Potencia máxima** Para achar a potencia máxima das celdas imos a curva de alta intensidade, calculamos a potencia e a representamos:

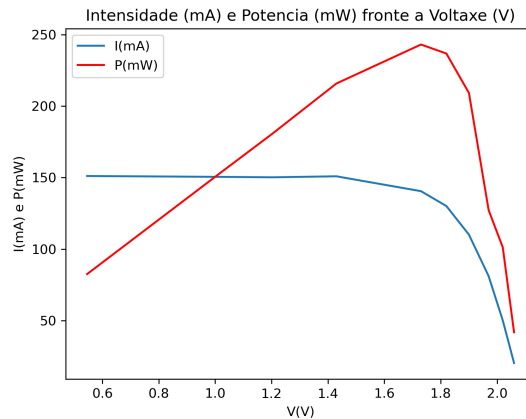


Figura 28: Potencia máxima.

Onde observamos que o punto de potencia máxima correspóndese con  $V = 1,73V$ ,  $I = 140,5mA$ ,  $P = 243,065mW$ , polo tanto  $P_{max} = 0,243065W$ . Para voltaxes menores, a intensidade aumenta, pero non tanto como para que a potencia incremente, mentres que para voltaxes maiores a intensidade diminúe tan rápido que a potencia cae. Este é o punto no que a combinación de Intensidade e Voltaxe son óptimas.

**Rendimento** O rendimento das celdas solares é o cociente entre a potencia recibida e emitida. Ao máximo de intensidade a potencia luminosa recibida é  $P_t = 150W/m^2$ . A superficie de unha celda é  $5 * 10 = 50cm^2 = 5 * 10^{-3}m^2$ , ao ter 4 celdas, a potencia luminosa total recibida é  $P_t = 3W$ .

Polo tanto o rendimento é igual a:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_t} = 8,1\%$$

## 3.4. Discusión e conclusións

Nesta experiencia pudimos caracterizar o comportamento das celdas solares en distintos aspectos e en función de diferentes parámetros:

- Observamos que a tensión dada polas celdas depende da superficie irradiada, tendo un máximo de  $500mV$ .
- Observamos que a intensidade depende da superficie irradiada, do ángulo de irradiancia e da intensidade da radiación, sen ter un máximo aparentemente.
- Observamos que ao combinarse en serie a Voltaxe das celdas se suma, mentres que a intensidade do conxunto se corresponde á intensidade da celda de menor intensidade.
- Observamos que ao combinarse en paralelo a Voltaxe das celdas manténese constante ao de cada celda, mentres que a intensidade das celdas súmase.

- Caracterizamos a curva característica das celdas, obtendo o punto de potencia máxima.
- Calculamos o rendemento das celdas, chegando a un resultado de un 8,1 % aproximadamente.

Con todo isto podemos comprender moi ben o funcionamento das celdas solares, e entender como poden ser utilizadas para a xeración de electricidade.