

# Taller de prototipos de módulos fotovoltaicos

Laboratorio de Innovación Fotovoltaica y Caracterización  
de Celdas Solares (**LIFYCS**)  
Proyecto APOYO LNC-2023-33

Desarrollo local de infraestructura de  
caracterización fotovoltaica

**PRESENTA:**

Dr. Jesús Capistrán Martínez

Posdoctorante en CIDS-ICUAP

Octubre 15, 2024

# Contenido

## 1. Open source: Hardware

$\mu$ SMU para caracterización fotovoltaica

## 2. Open source: Software

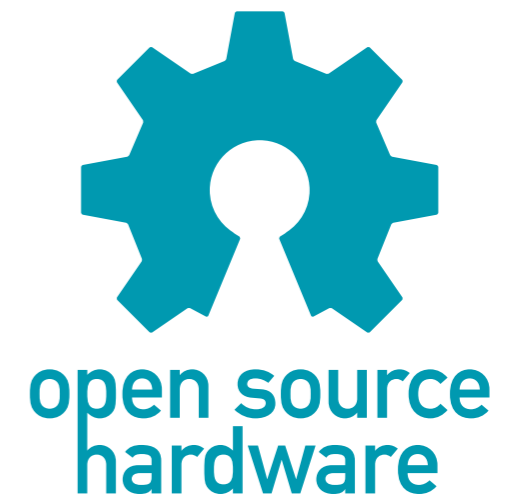
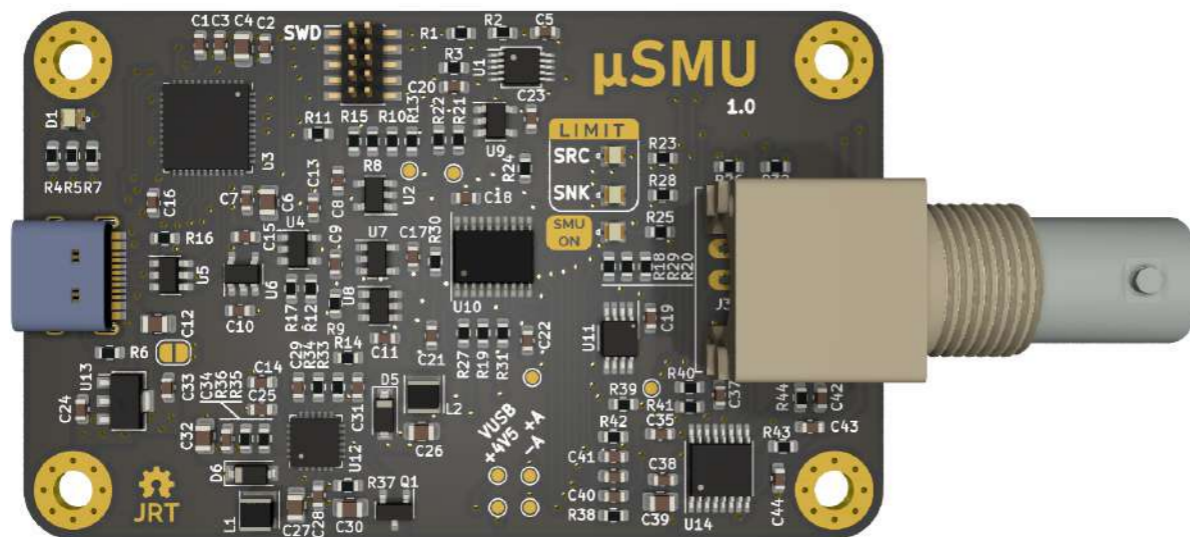
Python para ciencia de materiales

# 1. Open-source Hardware

## $\mu$ SMU by Joel Troughton

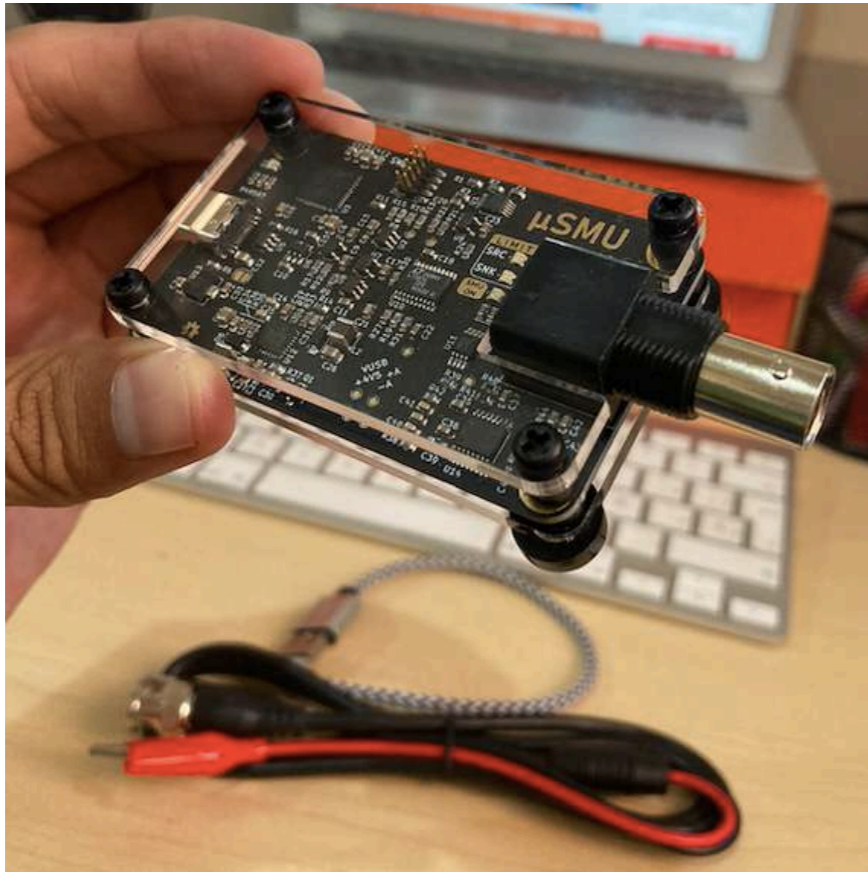


جامعة الملك عبد الله  
للعلوم والتقنية  
King Abdullah University of  
Science and Technology



Hardware y firmware: <https://github.com/joeltroughton/uSMU>

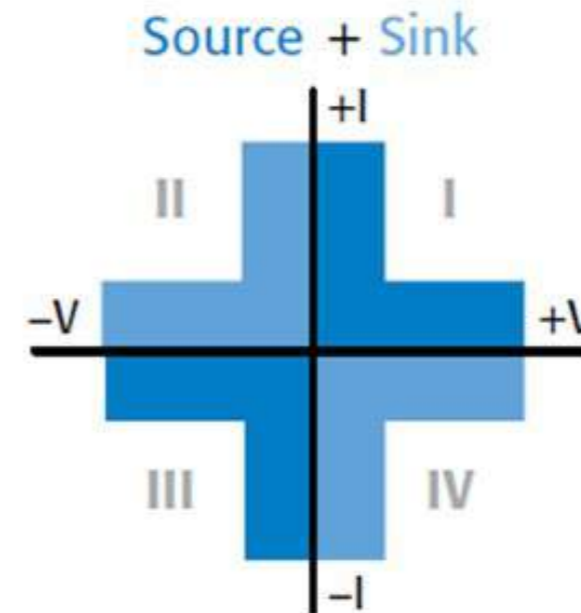
# $\mu$ SMU - micro Source Measurement Unit



$\mu$ SMU fue diseñado para la caracterización eléctrica de dispositivos semiconductores en investigación y educación.

Rangos de medición del  $\mu$ SMU vs Keithley 2400

| Parametro               | $\mu$ SMU     | Keithley 2400   |
|-------------------------|---------------|-----------------|
| Rango de voltaje        | -5 a 5 V      | 100 nV - 1100 V |
| Resolución de voltaje   | $\sim 0.6$ mV | High precision  |
| Rango de corriente      | -50 a 50 mA   | 1 pA - 5 A      |
| Resolución de corriente | $\sim 10$ nA  | High precision  |

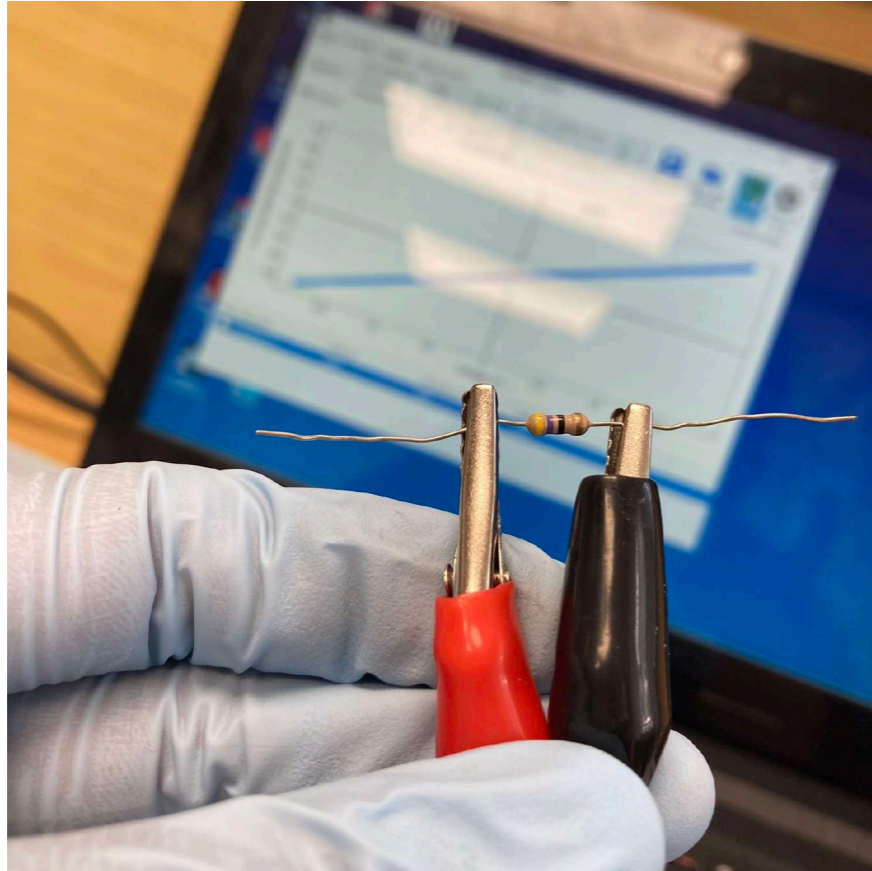


Un SMU es capaz de medir dispositivos semiconductores no lineales como Diodos, LED, Transistores y Celdas Solares

Hardware y firmware: <https://github.com/joeltroughton/uSMU>



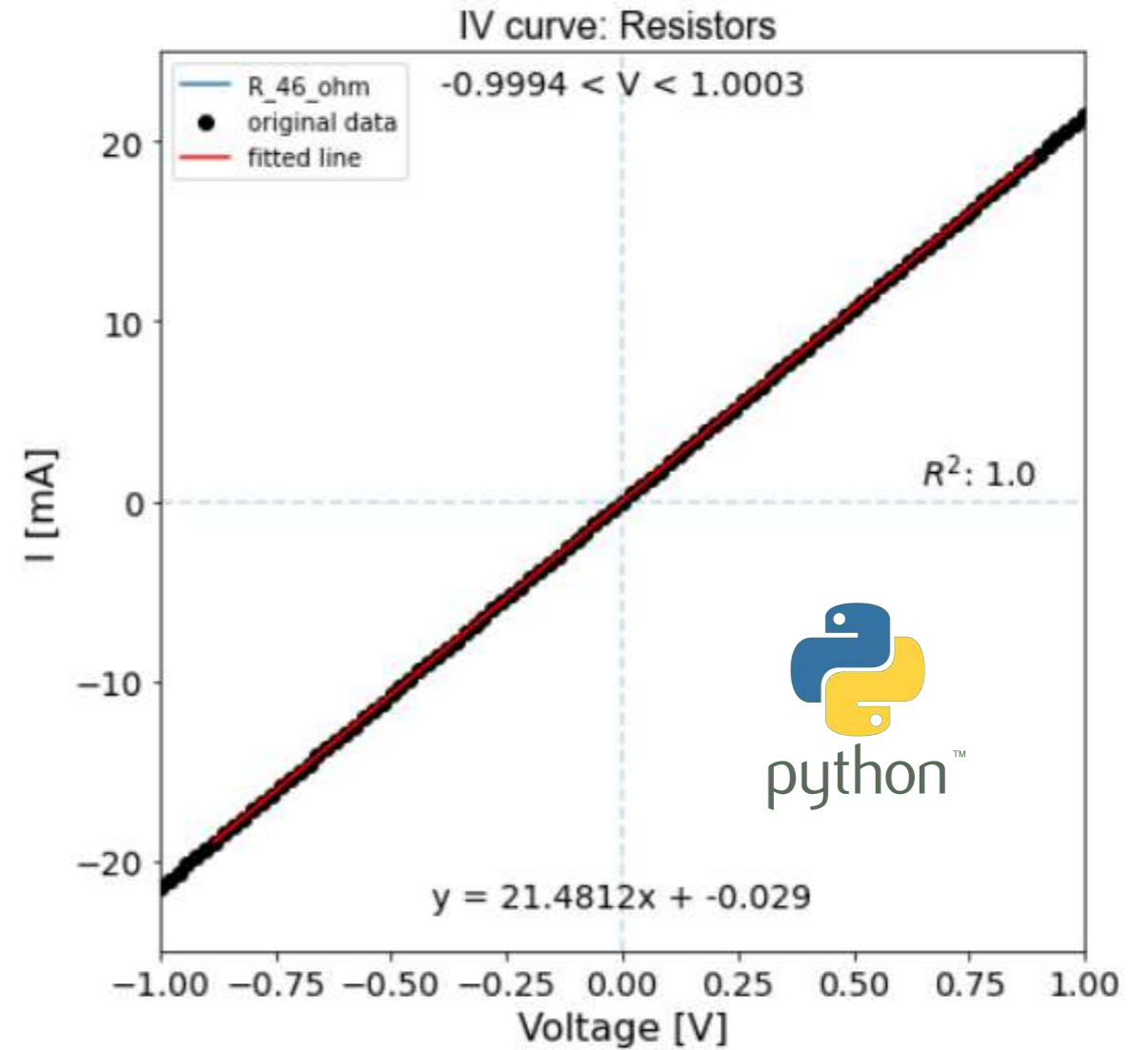
# Dark I-V: Resistencia eléctrica



Medición de resistencia eléctrica en  $\mu$ SMU para confirmar la funcionalidad del equipo (baseline)



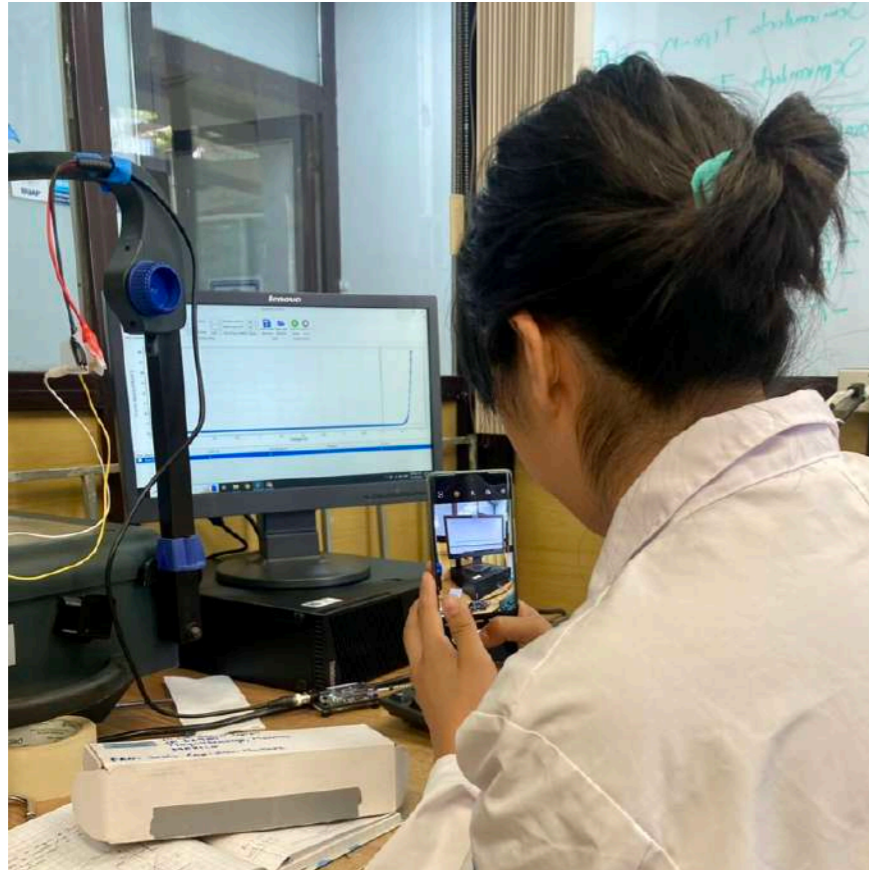
Código de colores de resistencia eléctrica:  
amarillo, morado, negro, dorado



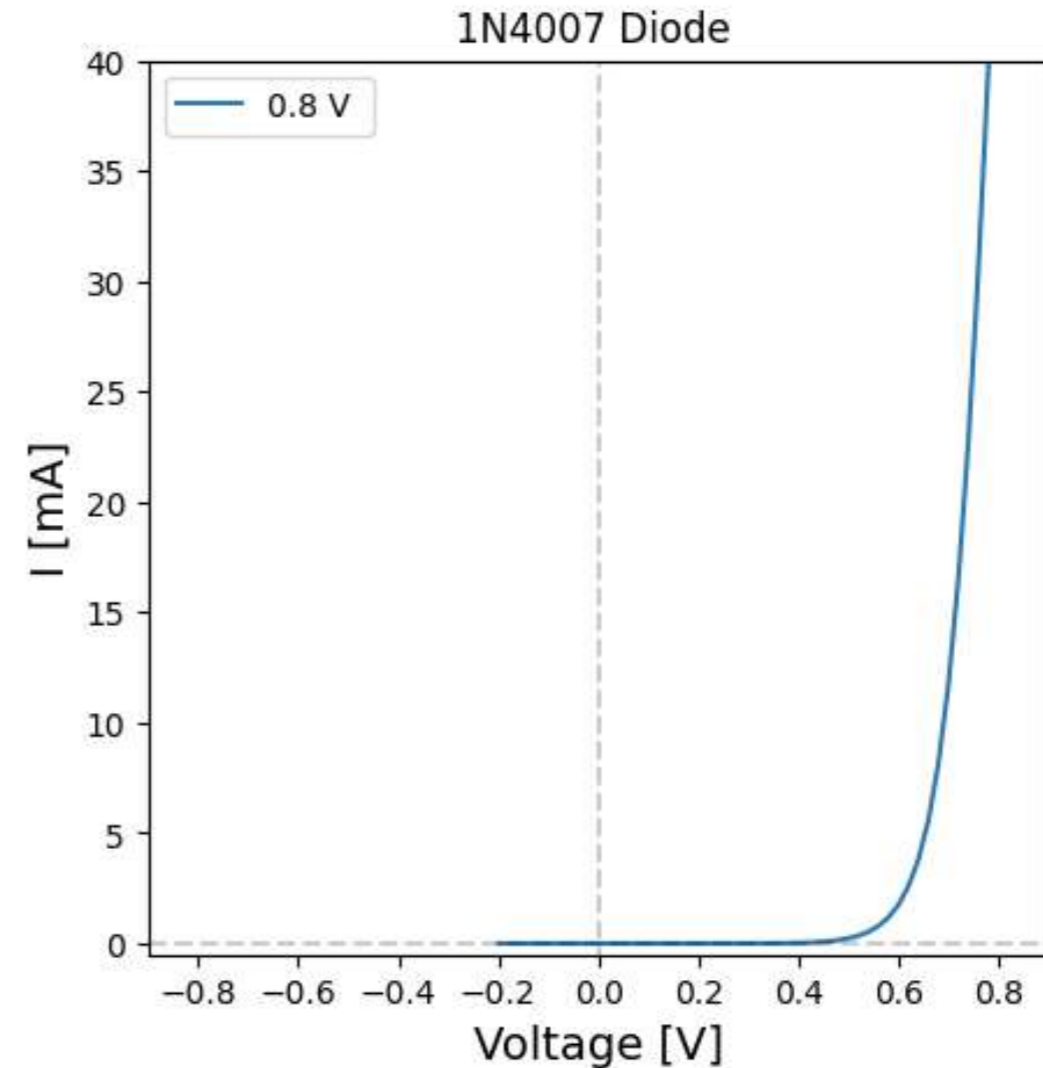
```
1 R = (1/(float(model.coef_.round(4))))*1e3  
2 print(f' R = {round(R,1)} ohms')
```

R = 46.6 ohms

# Dark I-V: Diodo rectificador



Alumna de servicio social BUAP (Mariana) realizando su primer curva I-V de un diodo 1N4007 con el  $\mu$ SMU



Curva I-V de un diodo silicio 1N4007

$$I = I_o \exp \left( \frac{qV}{nk_B T} - 1 \right)$$

Ecuación del diodo ideal

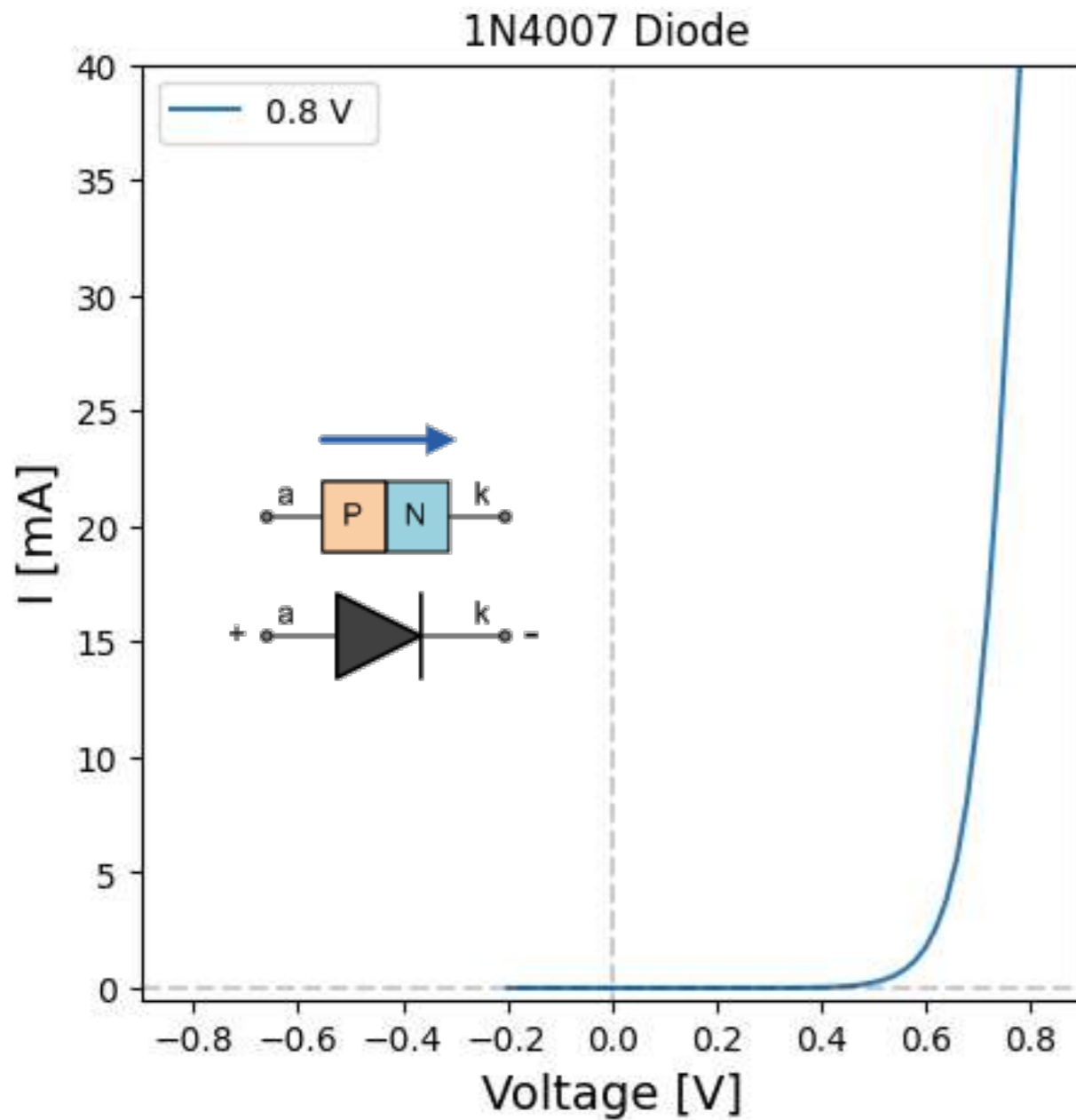
# 1. Open-source Software

Python para ciencias de materiales

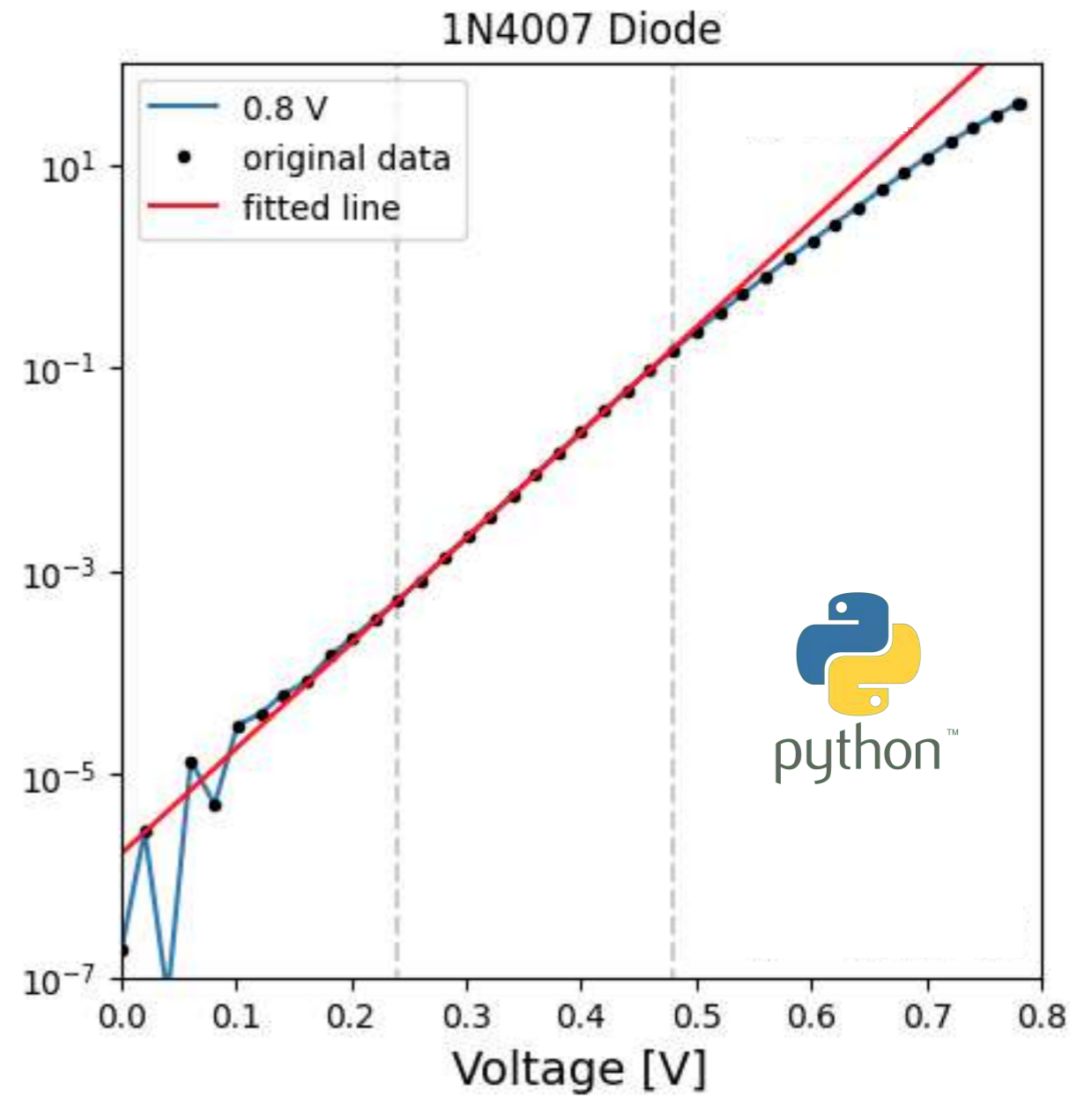


Hardware y firmware: <https://github.com/joeltroughton/uSMU>

# Extracción de parámetros: $n$ , $I_0$



Curva I-V de un diodo silicio 1N4007



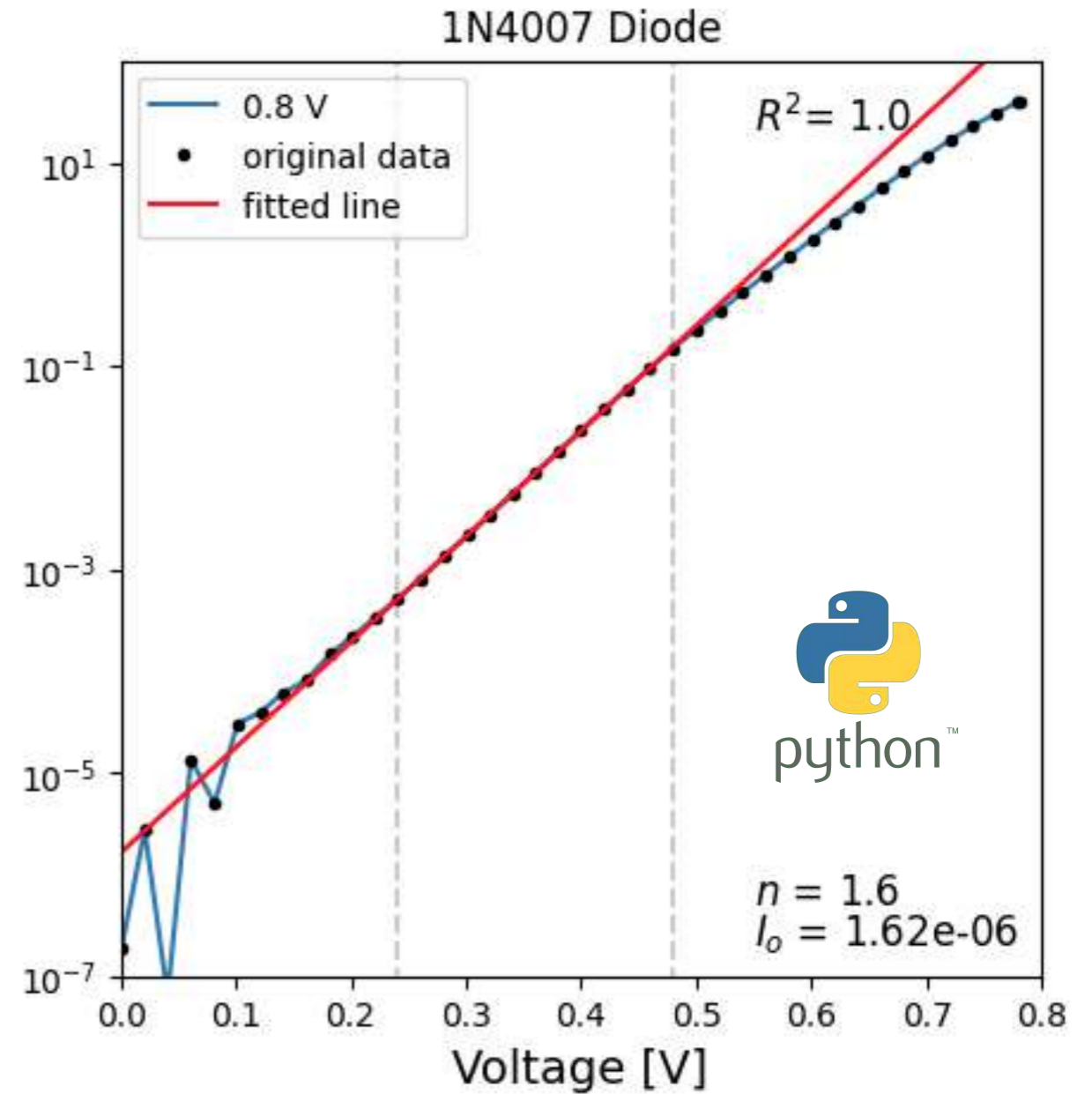
Curva I-V semi-logaritmica de un diodo 1N4007



# Extracción de parámetros: $n$ , $I_o$

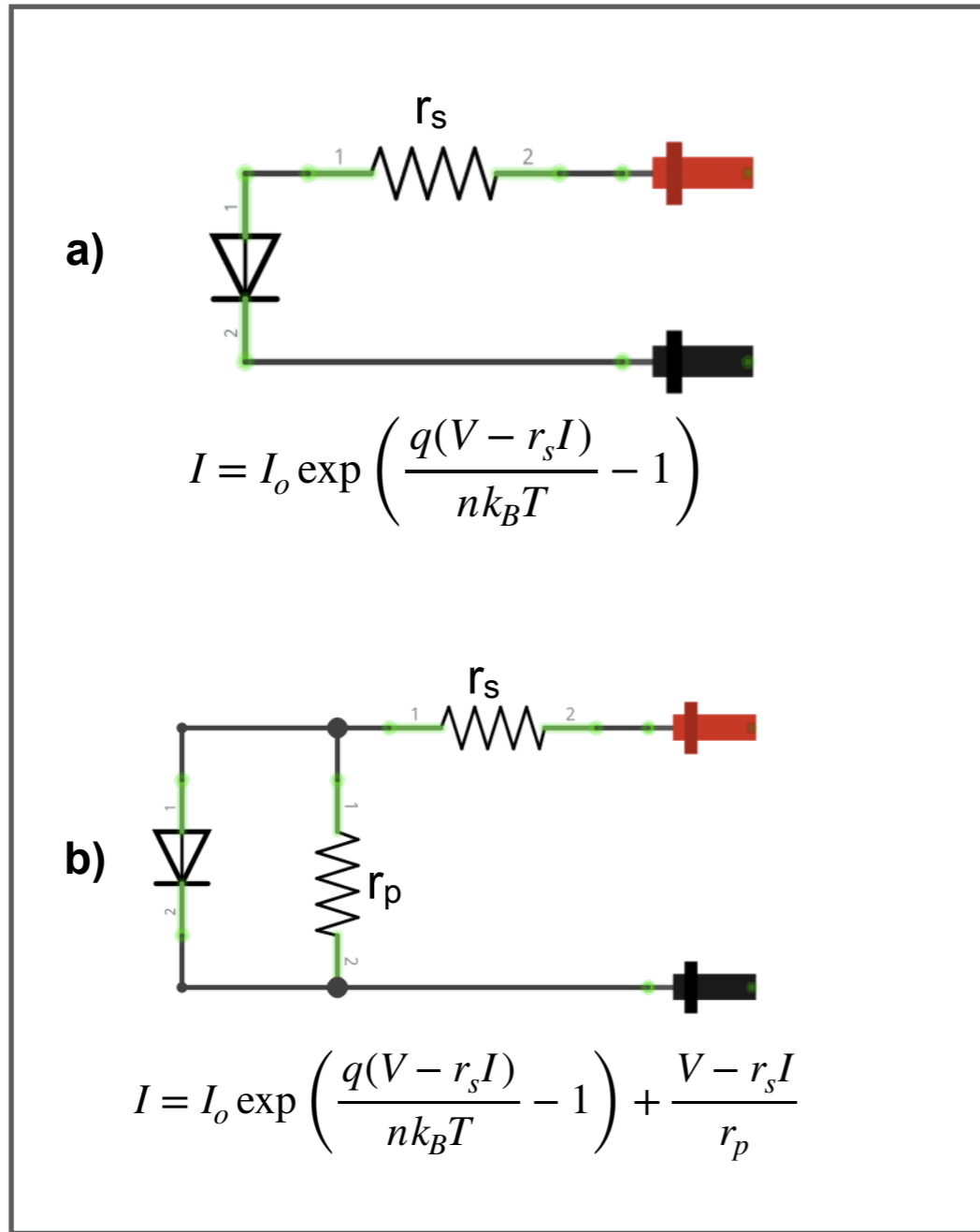
$$I = I_o \exp\left(\frac{qV}{nk_B T}\right)$$
$$\log(I) = \frac{qV}{nk_B T} + \log(I_o)$$
$$m = \frac{q}{nk_b T} \quad b = \ln(I_o)$$

Extracción de parámetros para  $V > 0.1$  V

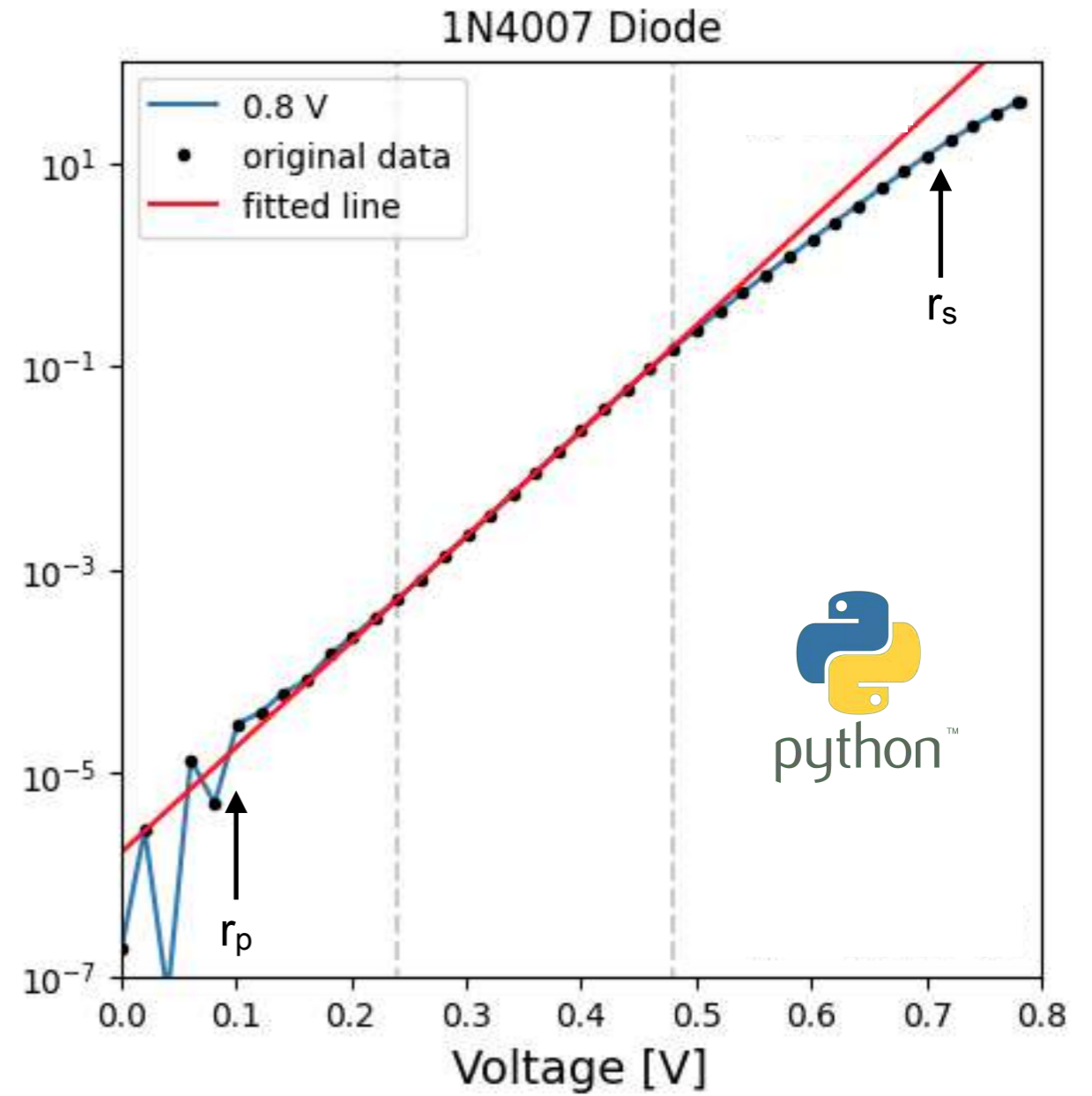


Curva I-V semi-logarítmica de un diodo 1N4007

# Resistencia eléctrica serie y paralelo

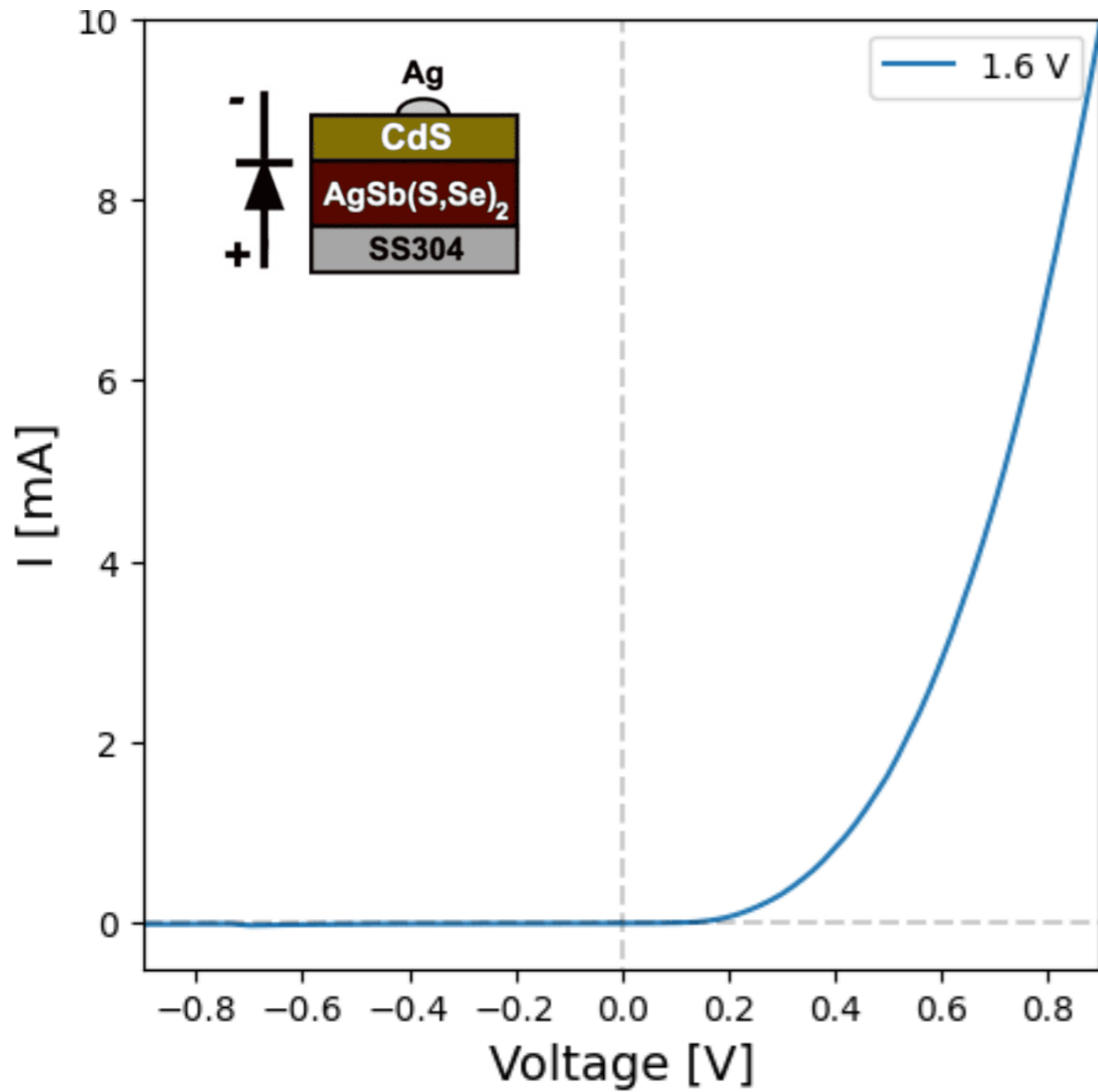


Circuito eléctrico equivalente de un diodo: a) con resistencia serie, b) con resistencia serie ( $r_s$ ) y paralelo ( $r_p$ )

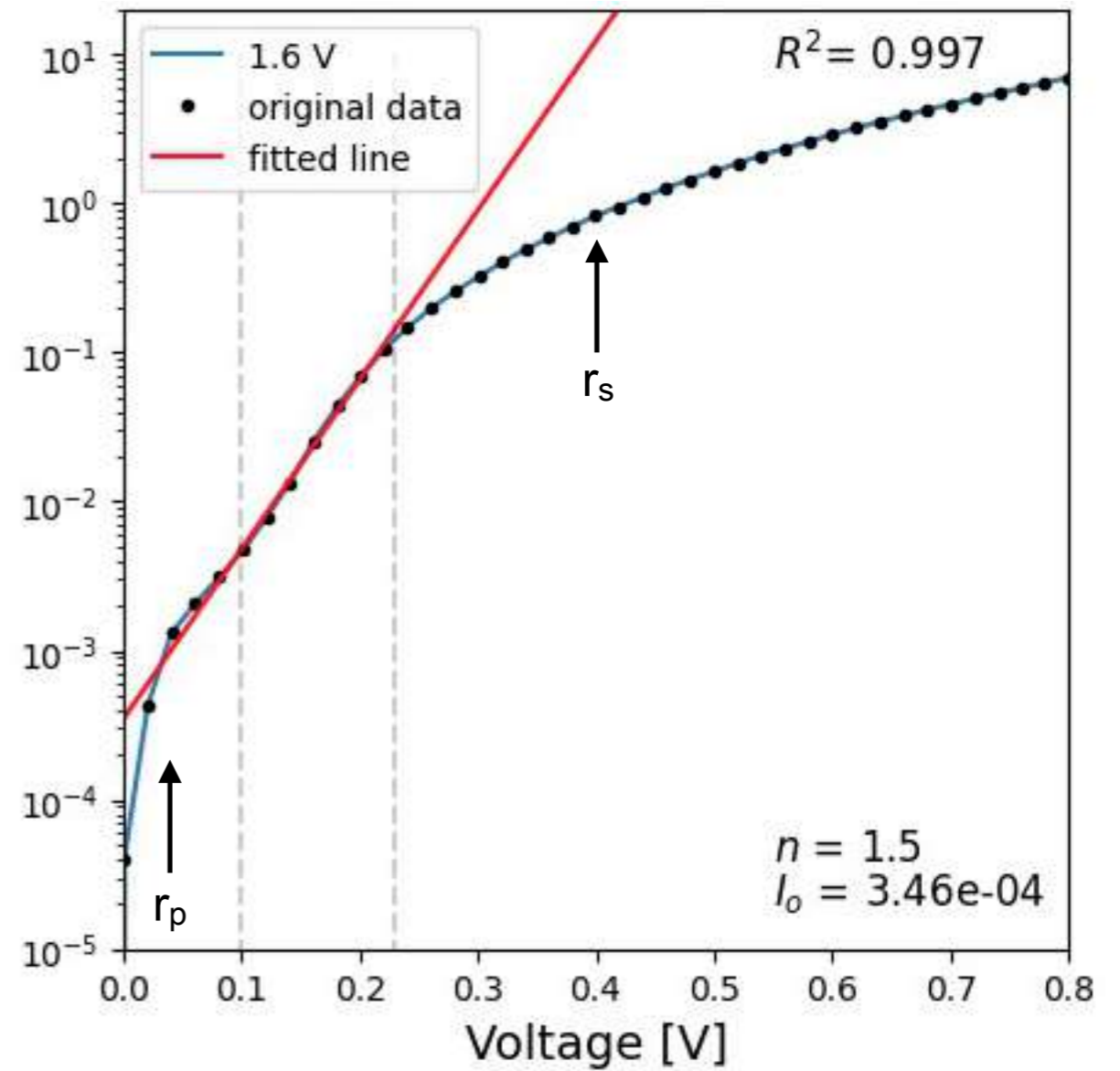


Curva I-V semi-logarítmica de un diodo 1N4007 mostrando las regiones de  $r_s$  y  $r_p$

# Heterounion: CdS/AgSb(S,Se)<sub>2</sub>



Curva I-V en oscuridad de la heterounión: AgSb(S,Se)<sub>2</sub>/CdS



Curva I-V semi-logarítmica de AgSb(S,Se)<sub>2</sub>/CdS para extracción de parámetros: Factor de idealidad ( $n$ ), corriente de saturación  $I_0$

# Extraer los valores de resistencia $R_s$

- Obtención de  $R_s$  mediante el Modelo de doble diodo



[1] A. Kaminski, J.J. Marchand, A. Fave, A. Laugier, New method of parameters extraction from dark I-V curve, in: Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1997, IEEE, Anaheim, CA, USA, 1997: pp. 203–206. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1997.654064>.

Figure 1 : Dark I-V curve with the two different regions

- Upper region (Series resistance)  
$$I = I_{s1} [\exp(\alpha_1(V - IR_s)) - 1]$$
- Lower region (Shunt resistance)  
$$I = I_{s2} \left[ \exp(\alpha_2(V - IR_s)) - 1 \right] + \frac{V - IR_s}{R_{sh}}$$

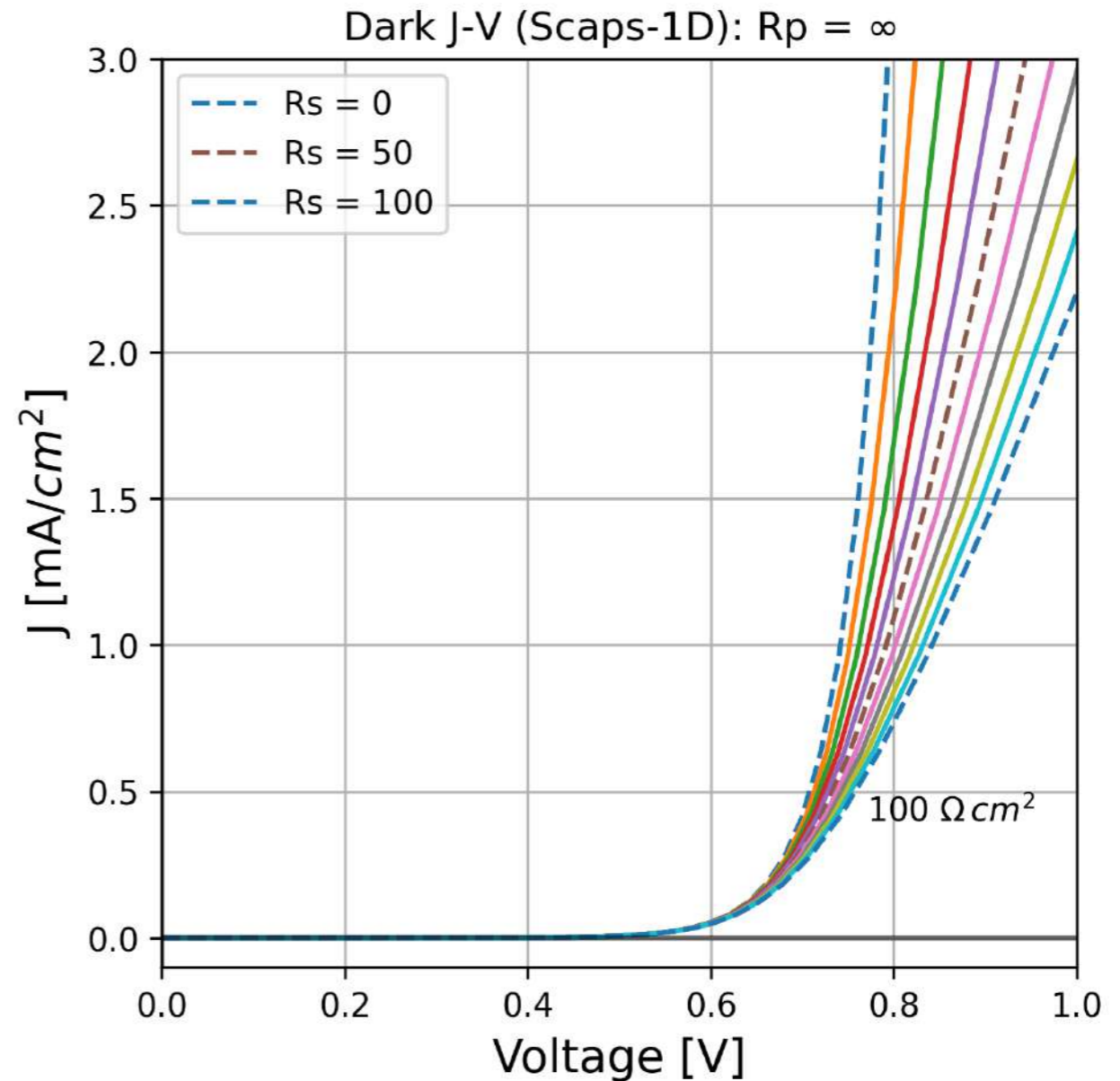
A. Kaminski et al. **New method of parameters extraction from dark I-V curve**, in: Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1997, IEEE, Anaheim, CA, USA, 1997: pp. 203–206. <https://doi.org/10.1109/PVSC.1997.654064>.

# Validar la extracción de $R_s$ con celda solar CdTe simulada en SCAPS-1D



Curso de simulación de celdas solares en SCAPS-1D

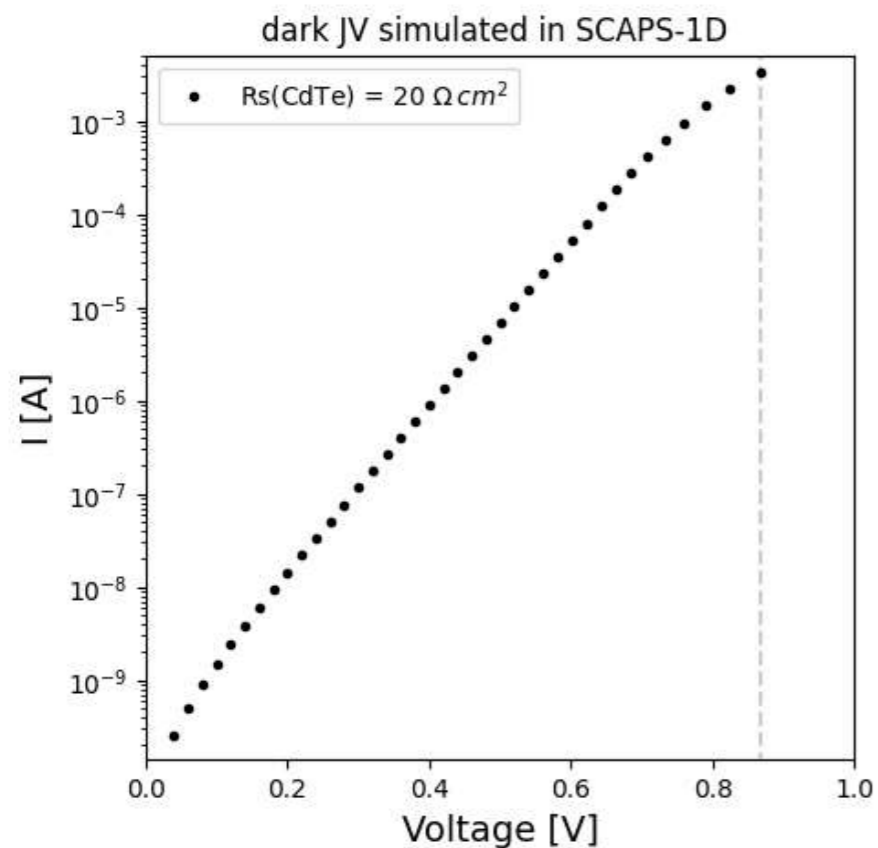
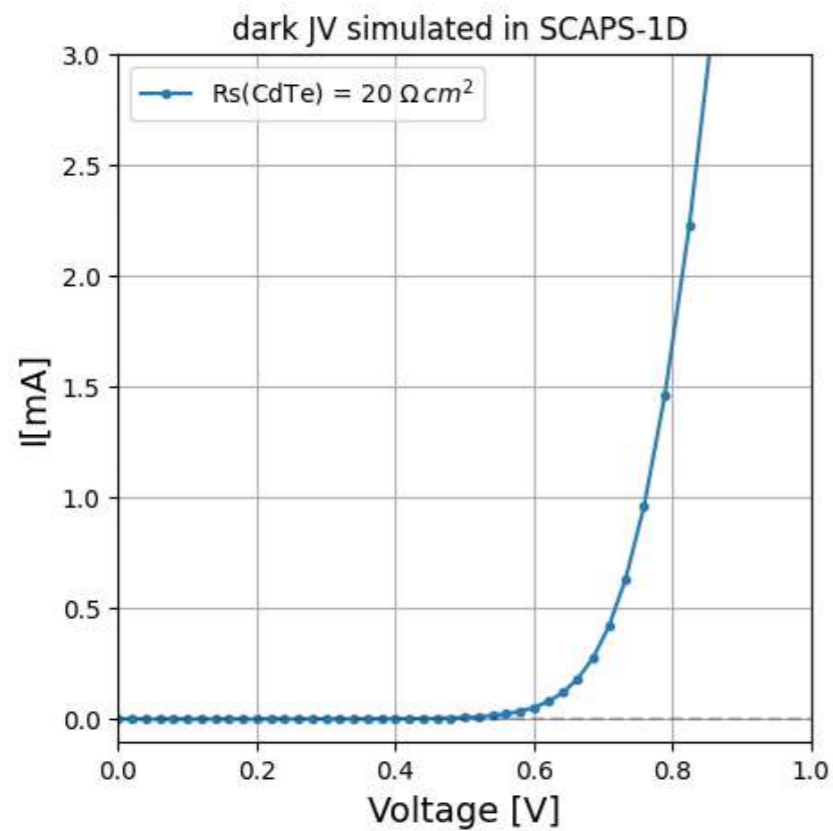
<https://jesuscapistran.com/courses/scaps-1d/>



J. Capistrán-Martínez et al., **Theoretical evaluation of emerging Cd-free  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$  based solar cells using experimental data of chemically deposited  $\text{Cu}_3\text{BiS}_3$  thin films**, Journal of Alloys and Compounds. 867 (2021) 159156. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159156>.



# Validar la extracción de $R_s$ con celda solar CdTe simulada en SCAPS-1D

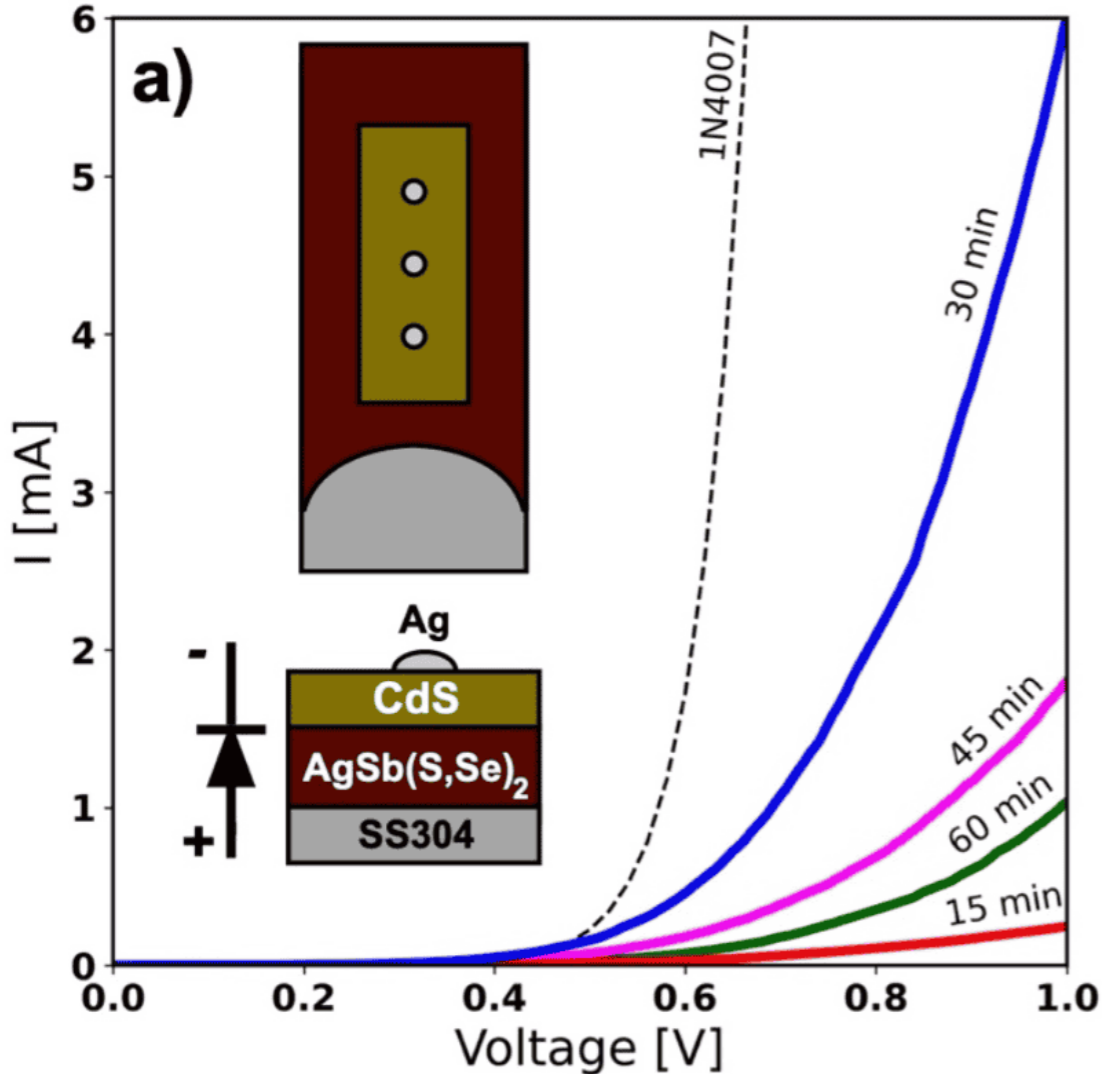


Extracción de parámetros de curvas JV simuladas en SCAPS-1D:  
Factor de idealidad del diodo ( $n_1$ ), densidad de corriente de saturación ( $J_{s1}$ ) y resistencia serie ( $R_s$ ).

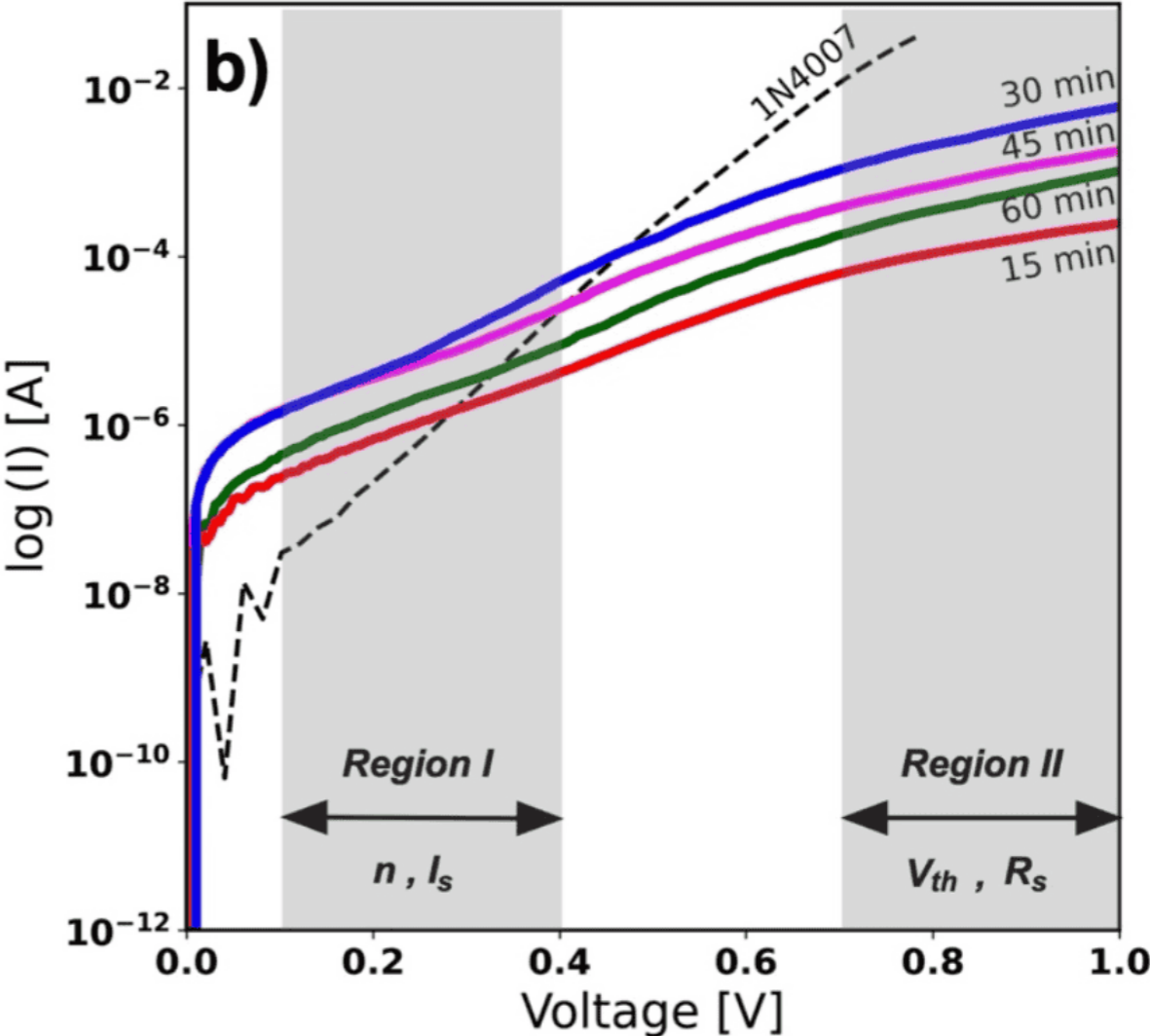
| $R_{so} [\Omega \text{ cm}^2]$ | $n_1$ | $R_{s1} [\Omega \text{ cm}^2]$ | $J_{s1} [\text{mA/cm}^2]$ |
|--------------------------------|-------|--------------------------------|---------------------------|
| 0                              | 1.85  | 0.01                           | 1.78E-07                  |
| 10                             | 1.85  | 9.94                           | 1.87E-07                  |
| 20                             | 1.85  | 19.94                          | 1.87E-07                  |
| 30                             | 1.85  | 29.94                          | 1.87E-07                  |
| 40                             | 1.85  | 39.94                          | 1.87E-07                  |
| 50                             | 1.85  | 49.94                          | 1.87E-07                  |



# Resultados: Heterojunctions of $\text{AgSb}(\text{S},\text{Se})_2$ fabricated on SS304



Curva I-V en oscuridad de la heterounión:  $\text{AgSb}(\text{S},\text{Se})_2/\text{CdS}$  con variación del tiempo de selenización



Curva I-V semi-logarítmica de  $\text{AgSb}(\text{S},\text{Se})_2/\text{CdS}$  para extracción de parámetros: Factor de idealidad ( $n$ ), corriente de saturación  $I_o$ , resistencia serie ( $R_s$ ) y voltaje de umbral ( $V_{th}$ )

Publicación en proceso (2024): Journal of Alloys and Compounds (Jalcom)

# Conclusiones

- Se demostró que el  $\mu$ SMU es una herramienta de Hardware Libre que cuenta con un alto potencial para el análisis de dispositivos semiconductores en investigación científica y educación STEM.
- El análisis de datos se realizó con software libre: Python + Jupyter Notebook



- $\mu$ SMU se utilizó para extraer curvas I-V de heterouniones de  $\text{AgSb}(\text{S},\text{Se})_2$ . Al estar calibrado con un equipo Keithley 2400 es posible publicar resultados en revistas de investigación científica.



# Lab101 del CIDS-ICUAP

## Posdoctorado:

Dr. Jesús Capistrán Martínez

## Doctorado:

Irving Galindo Marquez  
Gabriela Esquina Arenas

## Licenciatura:

Gustavo Ibarra Aguilar  
Ulises Paqui

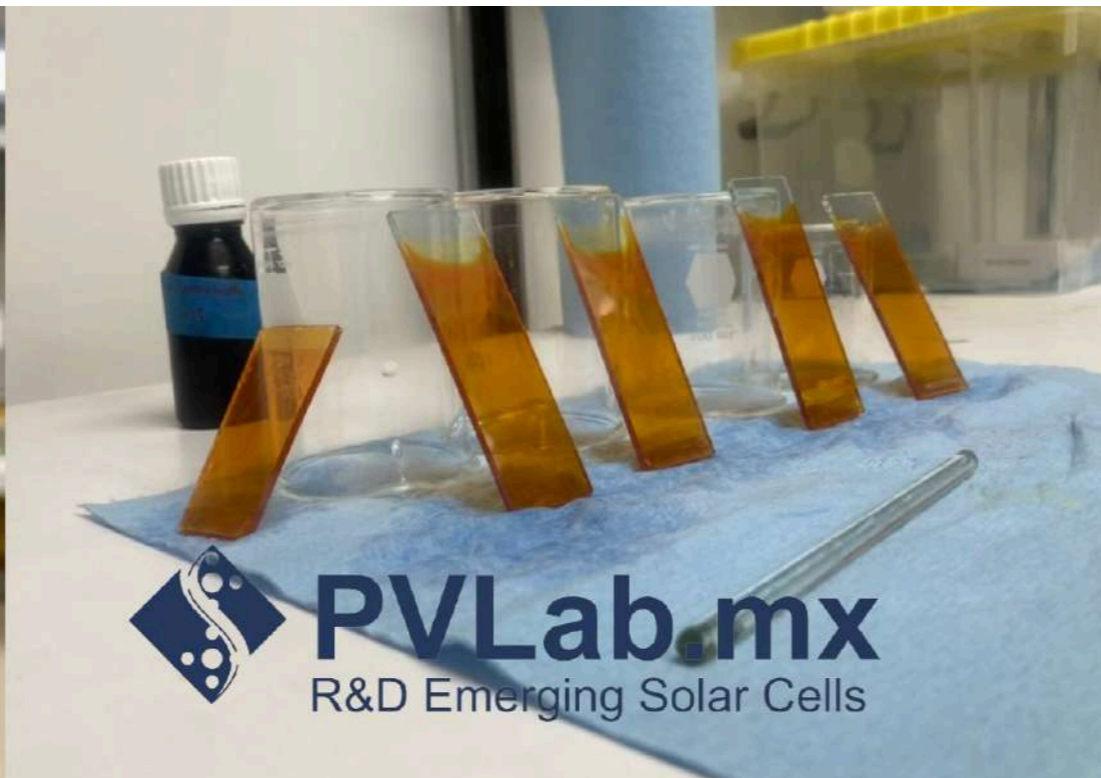
## Servicio Social:

Mariana de Lourdes Morales  
Ivan Peto Mijangos



Investigador Principal - Dr. Roman Romano Trujillo





[facebook.com/pvlabmx](https://facebook.com/pvlabmx)