



### Resumen

Debido a la estructura interna del diodo semiconductor, el comportamiento de este dispositivo no es lineal, ante variaciones del material con el que este se construye, el comportamiento del dispositivo tiende a cambiar de forma abrupta. Para familiarizar al estudiante con el comportamiento de este componente, se le solicita al estudiante experimentar con varios tipos de diodos para documentar el comportamiento ante variaciones de voltaje entre sus terminales.

## 1. Objetivos

- Analizar de forma experimental el comportamiento del diodo ante variaciones de voltaje.

### 1.1. Objetivos Específicos

- Comprobar de forma experimental la validez de la ecuación de Schockley para diodos de silicio, germanio y distintos colores de LEDS.
- Obtener la temperatura ambiente por medio del uso de un diodo de silicio.
- Obtener el valor de la constante de Plank realizando una regresión lineal del voltaje vs inverso de longitud de onda.
- Comparar el valor experimental y teórico de la constante de Plank, mediante el uso de diodos LED.

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Materiales Semiconductores

Un material semiconductor posee una conductividad entre un conductor y un dieléctrico. Entre los materiales semiconductores conocidos tenemos: cadmio, boro, aluminio, galio, germanio, silicio, fósforo entre otros. Los materiales semiconductores mas utilizados para realizar dispositivos electrónicos son el silicio ( $\rho \approx 50 * 10^3 \Omega - cm$ ) y el germanio ( $\rho \approx 50 \Omega - cm$ ).

Una de las ventajas de estos materiales es que se pueden fabricar y llevarlos a un grado de pureza muy alto. Para variar las características del material se realiza un proceso llamado dopado uniéndole otro tipo de elemento. Otra ventaja es que sus características pueden variar por medio de la luz o el calor. Por ultimo la mayor ventaja es que la estructura cristalina de estos elementos es repetitiva denominándose como mono-cristal. Estos materiales tienen átomos tetravalentes, lo cual forma enlaces covalentes. (Boylestad y Nasshelsky, 2009)

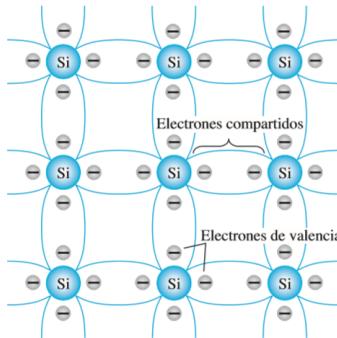


Figura 1: Enlace covalente de Silicio. (Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 4)

## 2.2. Niveles de energía

La ionización es el mecanismo por el cual un electrón puede absorber energía suficiente para escapar de la estructura atómica. “Cuanto más alejado está un electrón del núcleo, mayor es su estado de energía y cualquier electrón que haya abandonado a su átomo padre tiene un estado de energía mayor que todo electrón que permanezca en la estructura atómica”(Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 5).

“La definición de electrón-voltio es la energía cinética adquirida por un solo electrón cuando se mueve a través de un potencial eléctrico de 1 V”(Konrad et al., 2013).  $1eV = 1.6 * 10^{-19} J$

$$W = QV = (1.6 * 10^{-19} C) * (1V) = 1.6 * 10^{-19} J \quad (1)$$

## 2.3. Materiales Extrínsecos

Se le llama material extrínseco al elemento el cual a sido sujeto a dopaje (agregar impurezas a materiales intrínsecos), creándose así dos nuevos tipos de materiales tipo P y tipo N.

### 2.3.1. Tipo N

Durante el dopaje, se combinan con el material intrínseco elementos pentavalentes (5 electrones de valencia), entre los mas comunes esta: el antimonio, arsénico y fósforo. Obteniendo un electrón extra el cual se encuentra disociado de cualquier enlace covalente tal como se puede ver en la figura 2. A pesar de la existencia de este electrón, el material permanece con una carga eléctrica neutral. ”Las impurezas difundidas con cinco electrones de valencia se conocen como átomos donadores”(Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 8).

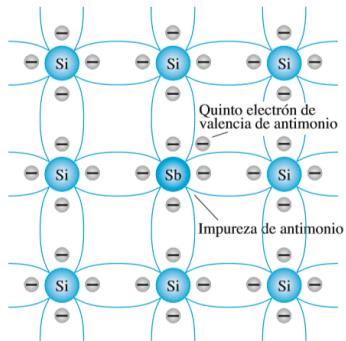


Figura 2: Material tipo N. (Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 7)

Bajo estas condiciones, el nivel de energía necesario de un electrón donador para saltar a la banda de energía se reduce significativamente. Como lo muestra la figura 3.

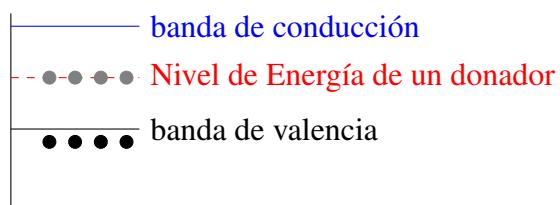


Figura 3: Niveles de energía material tipo N.

### 2.3.2. Tipo P

Durante el dopaje, se combinan con el material intrínseco elementos que contienen 3 electrones de valencia, entre los mas comunes esta: el boro, galio y indio. Obteniendo un espacio el cual puede aceptar un electrón para completar el enlace covalente, a este espacio se le denomina hueco, ilustrado en la figura 4. A pesar de la falta de un electrón, el material permanece con una carga eléctrica neutral. "Las impurezas difundidas con tres electrones de valencia se llaman átomos acceptores." (Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 9).

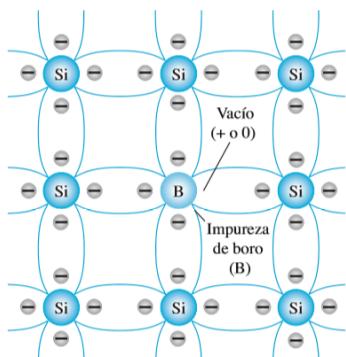


Figura 4: Material tipo P. (Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 8)

### 2.3.3. Flujo de electrones y huecos

“El efecto del hueco en la conducción se muestra en la figura 5. Si un electrón de valencia adquiere suficiente energía cinética para romper su enlace covalente y llenar el vacío creado por un hueco, entonces se creará un vacío o hueco en la banda covalente que cedió el electrón”(Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 9)

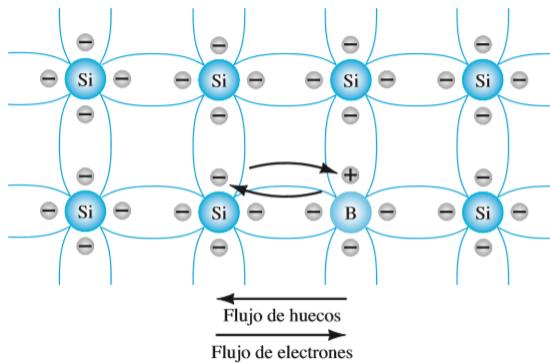


Figura 5: Flujo de electrones y huecos. (Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 9)

Boylestad y Nasshelsky (2009) describieron las características de los materiales p y n como: “En un material tipo n, el electrón se llama portador mayoritario y el hueco portador minoritario”(p. 9).

“En un material tipo p, el hueco es el portador mayoritario y el electrón el minoritario”(p. 10).

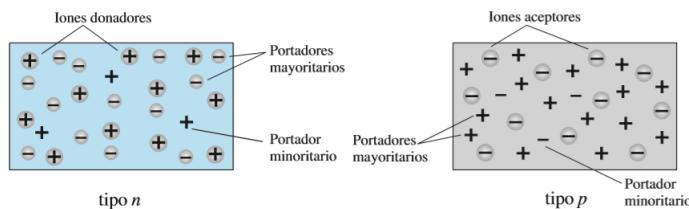


Figura 6: Portadores mayoritarios y minoritarios. (Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 9)

### 2.4. Diodo Semiconductor

Al unir los materiales tipo p y tipo n, se construye el diodo semiconductor, en el momento que los dos materiales se aúnen, debido a la disminución de portadores, se crea en su unión un área denominada región de agotamiento. Existen tres tipos de polarización para el diodo: Sin polarización  $V = 0$ , polarización inversa  $V < 0$  y polarización directa  $V > 0$ . Boylestad y Nasshelsky (2009) definen el comportamiento de la corriente a través del diodo como:

- “Sin ninguna polarización aplicada a través de un diodo semiconductor, el flujo neto de carga en una dirección es cero”(p. 11).

- “La corriente en condiciones de polarización en inversa se llama corriente de saturación en inversa y está representada por  $I_s$ ”(p. 11).
  - “Un potencial de polarización en directa  $V_D$  “presionará” a los electrones en el material tipo n y a los huecos en el material tipo p para que se recombinen con los iones próximos al límite y reducirá el ancho de la región de empobrecimiento”(p. 12).

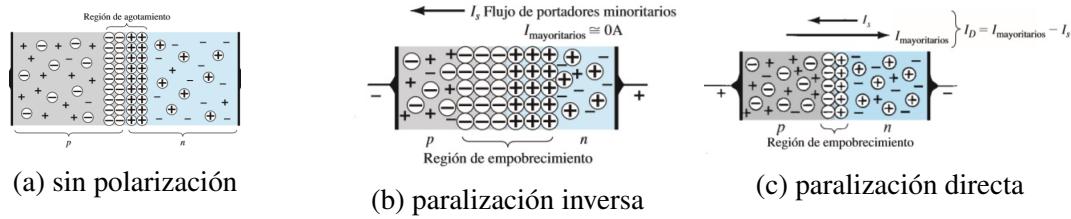


Figura 7: Comportamiento de los portadores mayoritarios y minoritarios en la union PN. (Boylestad y Nasshelsky, 2009)

La ecuación de Shockley define las características generales de un diodo semiconductor. (Boylestad y Nasshelsky, 2009)

$$I_D = I_s(e^{\frac{V_D}{n\sqrt{T}}} - 1) \quad (2)$$

El voltaje térmico del diodo,  $V_T$  de la Ecuación 2, se puede reescribir como:

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (3)$$

donde:

- $I_S$  corriente de saturación inversa,  $I_s \approx 10\mu A$ .
  - $V_D$  voltaje de paralización del diodo.
  - $n$  factor de identidad  $n_{Si} = 2$ ,  $n_{Ge} = 1$ .
  - $k$  la constante de Boltzmann =  $1.38 * 10^{23}$  J/K.
  - T es la temperatura absoluta en Kelvin =  $273 +$  la temperatura en °C.
  - $q$  es la magnitud de la carga del electrón =  $1.6 * 10^{19}$  C.

En base a la Ecuación 2, el comportamiento de la corriente del diodo en base al voltaje aplicado sera el siguiente:

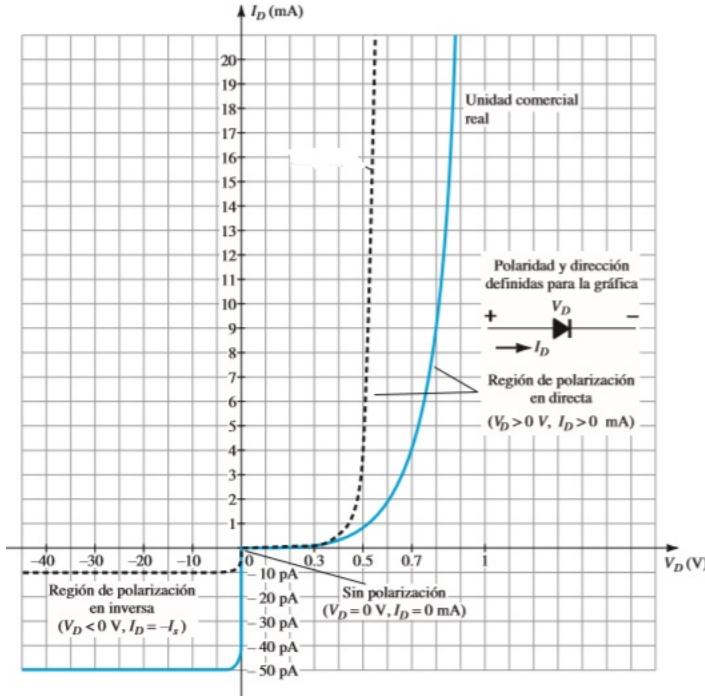


Figura 8: Gráfica diodo rectificador. (Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 14)

La Ecuación 2, nos define que el cambio de temperatura en el diodo, varía el comportamiento de la corriente a un voltaje constante.

“En la región de polarización en directa las características de un diodo de silicio se desplazan a la izquierda a razón de 2.5 mV por grado centígrado de incremento de temperatura”(Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 18).

“En la región de polarización en inversa la corriente de saturación en inversa de un diodo de silicio se duplica por cada 10°C de aumento de la temperatura”(Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 19).

## 2.5. Diodo Zener

En la región de polarización inversa, al llegar a cierto nivel de potencial, existe una región denominada Zener, donde la corriente tiende a incrementar de manera muy rápida. “El máximo potencial de polarización en inversa que se puede aplicar antes de entrar a la región Zener se llama voltaje inverso pico (conocido como valor PIV) o voltaje de reversa pico (denotado como valor PRV)”(Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 16). La región Zener se controla variando los niveles de dopado, de esa manera se puede variar el voltaje inverso pico  $V_Z$ , por lo que este dispositivo puede utilizarse como un limitador de voltaje. “El potencial Zener de un diodo Zener es muy sensible a la temperatura de operación”(Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 40).

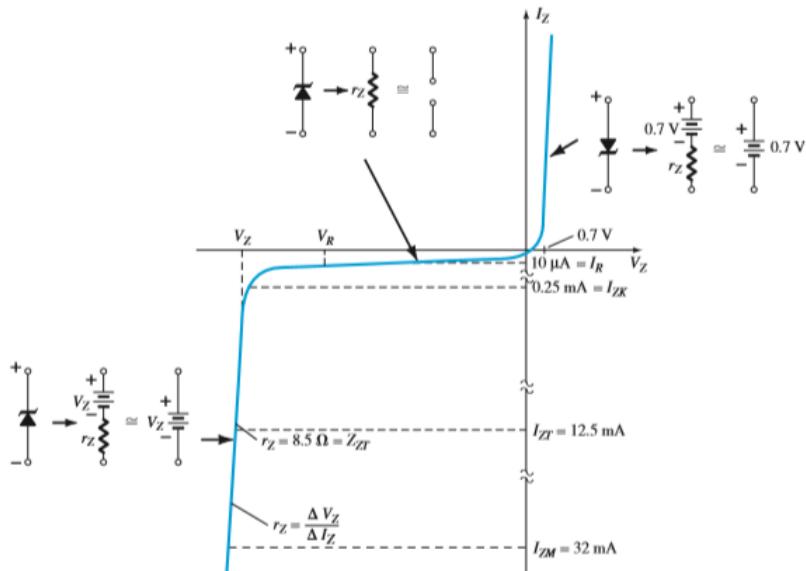


Figura 9: Gráfica diodo Zener. (Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 39)

## 2.6. Diodo emisor de luz

El diodo LED (por sus siglas en inglés) emite luz debido a la liberación de energía. Para los diodos de Silicio y Germanio la mayoría de Energía se disipa por medio de calor. Por otra parte si se utiliza otros materiales tales como Fosfuro de Arseniuro (GaAsP) o Fosfuro de Galio (GaP), la energía se libera en su mayoría por medio de fotones. (Boylestad y Nasshelsky, 2009)

El diodo semiconductor variaba el voltaje de conducción dependiendo si era de Silicio de Germanio, de la misma forma dependiendo del material que este echo el diodo LED, este voltaje tiende a variar.

Color	Construcción	Voltaje en directa típico (V)
Ámbar	AlInGaP	2.1
Azul	GaN	5.0
Verde	GaP	2.2
Naranja	GaAsP	2.0
Rojo	GaAsP	1.8
Blanco	GaN	4.1
Amarillo	AlInGaP	2.1

Figura 10: Diodos emisores de luz. (Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 42)

Al proceso de emisión de luz mediante la aplicación de una fuente de energía eléctrica, se le denomina electro-luminiscencia. Para que este sea visible: “La superficie metálica conductora externa conectada al material tipo p es más pequeña para permitir la salida del máximo de fotones de energía luminosa cuando el dispositivo se polariza en directa”(Boylestad y Nasshelsky, 2009, p. 42).

Por el fenómeno de emisión espontánea debido a la recombinación entre huecos y electrones, se obtiene un fotón. La energía de un fotón esta dada por la relación entre energía y frecuencia de Planck: (Schwinger, 2001)

$$E = h * f \quad (4)$$

Donde la frecuencia y la longitud de onda se relacionan por  $\lambda f = c$  y la energía esta dada por el salto de energía según la Sección 1.2  $E = qV$ , se puede determinar que el voltaje voltaje de ruptura como:

$$V_o = \frac{hc}{q\lambda} \quad (5)$$

Donde:

- $V_o$  voltaje de ruptura del diodo LED.
- $c$  velocidad de la luz en el vacío =  $299792458 \frac{m}{s}$ .
- $h$  la constante de Planck =  $6,626070150 * 10^{-34} J * s$ .
- $q$  es la magnitud de la carga del electrón =  $1.6 * 10^{19} C$ .
- $\lambda$  longitud de onda.

### 3. Diseño Experimental

#### 3.1. Experimento 1

##### 3.1.1. Materiales

- Fuente de alimentación
- Protoboard
- Multímetro
- Potenciómetro de  $10k\Omega$
- Resistencia de  $510\Omega$
- Diodo rectificador de silicio
- Diodo rectificador de germanio
- Diodo zener de 3.3V
- Alambres para protoboard

### **3.1.2. Procedimiento**

1. Se armó el circuito de la diagrama de la figura 11, colocando el diodo de silicio entre los puntos A y B.
2. Se Varió el voltaje con el potenciómetro desde 0 a 5V.
3. Para cada variación de voltaje se midió el voltaje y corriente del diodo, en los puntos que se muestra el diagrama.
4. Se identificó el voltaje de polarización del diodo y se comparó con el experimental.
5. Se tabuló los datos de corriente y voltaje medidos en el circuito.
6. Se graficó la corriente en función del voltaje, y se realizó un ajuste con un software usando la ecuación de Shockley para determinar la temperatura ambiente y se comparó con la real.
7. Se conectó el diodo en inversa entre los puntos A y B, se realizaron variaciones de voltaje y se tabularon los resultados de voltaje y corriente.
8. Se armó el circuito con el diodo de germanio entre los puntos A y B.
9. Se repitieron los pasos 2, 3, 4, 5 y 7.
10. Se armó el circuito con el diodo zener entre los puntos A y B.
11. Se repitieron los pasos 2, 3, 4, 5 y 7.
12. Se determinó el material del que se fabricó el diodo zener a partir del voltaje de polarización y comparar con el valor teórico.
13. Finalmente se realizó un gráfico con los tres diodos.

## **3.2. Experimento 2**

### **3.2.1. Materiales**

- Fuente de alimentación
- Protoboard
- Multímetro
- Potenciómetro de  $10k\Omega$
- Resistencia de  $100\Omega$
- Diodo LED RGB.
- Diodo LED Blanco.
- Diodo LED Infrarrojo.
- Alambres para protoboard

### 3.2.2. Procedimiento

- Se armó el circuito de la figura [11] con el diodo LED entre los puntos A y B. Debido a que se realizaron mediciones de voltaje y corriente, se colocó un Switch para PCB vertical, SPDT entre la resistencia y el punto A.
- Con el potenciómetro, se realizaron variaciones de voltaje desde 0 hasta 5 V.
- Para cada N variaciones de voltaje se midió el voltaje del diodo y la corriente del mismo, en los puntos donde muestra el circuito. Ya que sólo se contaba con un multímetro, para asegurar que la corriente medida coincide con el voltaje suministrado, se colocó el Switch mencionado anteriormente.
- Durante la medición se identificó el voltaje de polarización (el momento en que el LED inicia a iluminar) con la luz apagada y con la luz encendida.
- Se comparó el valor del voltaje del fabricante con el experimental.
- Se tabularon las variaciones de voltaje y corriente medidas, la cantidad varió para cada LED.
- Se repitieron los pasos 1 al 4 para cada color de LED con el que cuenta, es decir, con el led rojo, verde, azul, blanco.
- Se realizó una grafica conjunta de los cinco colores.
- Con los valores obtenidos para el voltaje de polarización, es decir, el voltaje en el cual el led empieza a encender, cuando se encuentra apagada la luz, encendida, el valor del fabricante, etc. P.ej. Se realizó una tabulación de los voltajes de polarización vs longitud de onda, cuando la luz se encontraba apagada, para todos los leds.
- Al graficar la tabla anterior, se realizó un ajuste lineal, cuya pendiente de la grafica permitió encontrar la constante de Plank. Mediante la relación

$$V_o = \frac{hc}{e\lambda} \quad (6)$$

Donde la pendiente

$$m = \frac{hc}{e} \quad (7)$$

- Para la máxima corriente de cada diodo LED, se obtuvo el flujo de fotones por unidad de tiempo
- se identificó que tipo de diodo emite la mayor cantidad de fotones.

### 3.3. Diagrama del experimento

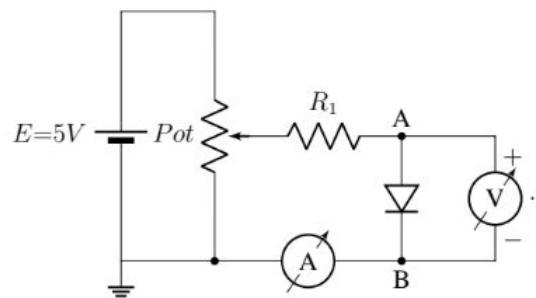


Figura 11: Circuito del experimento.  
Fuente: Documento de práctica experimental.

## 4. Resultados

### 4.1. Experimento 1

A continuación se muestran las gráficas resultantes del experimento 1.

#### 4.1.1. Diodo de silicio

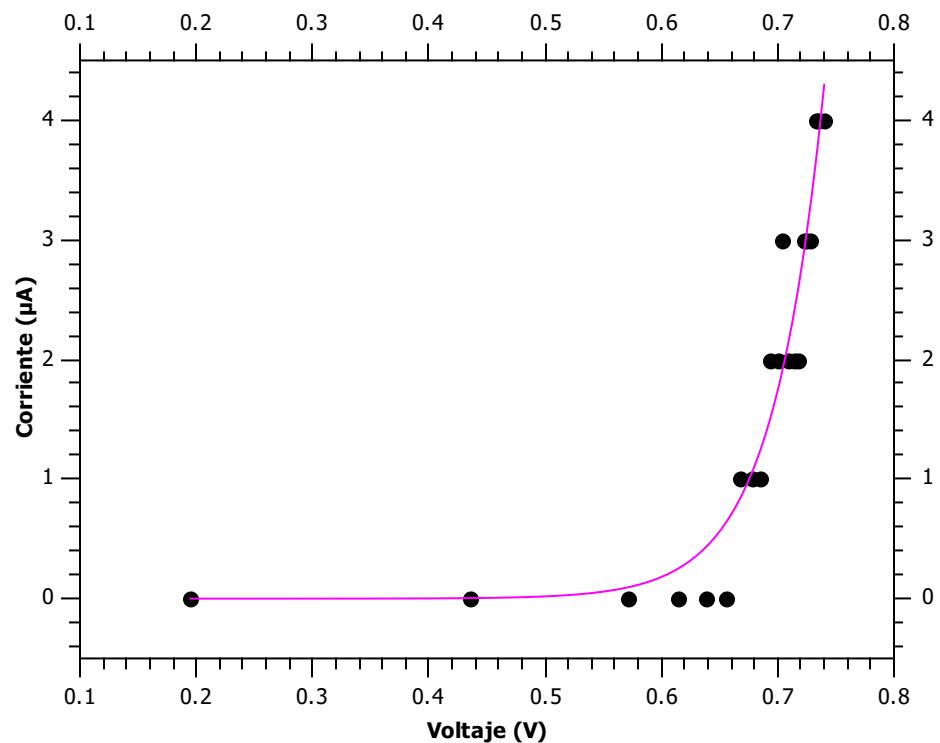


Figura 12: Corriente en función del voltaje para el diodo de silicio

$$I_D = \left( (2.33 \pm 4.30) \times 10^{-7} \right) \left( e^{V_D/(44.2 \pm 4.9) \times 10^{-3}} - 1 \right) \quad (8)$$

**Temperatura:**

$$T_k = (239 \pm 60)^\circ C \quad (9)$$

#### 4.1.2. Diodo de germanio

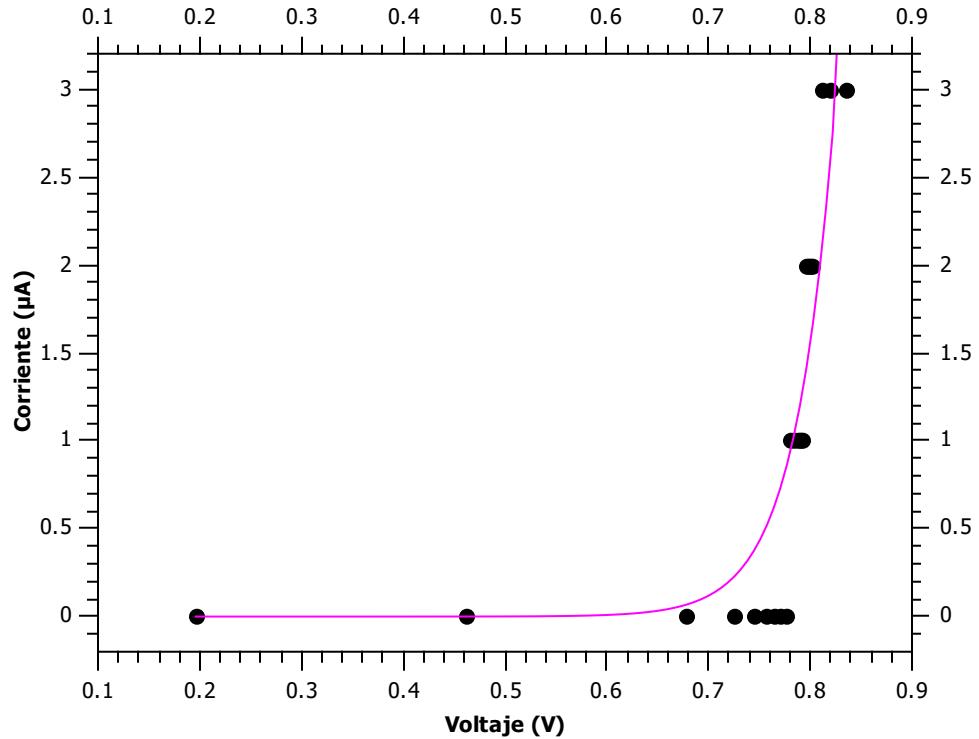


Figura 13: Corriente en función del voltaje para el diodo de silicio

$$I_D = ((3.1 \pm 1.2) \times 10^{-9}) \left( e^{V_D / (30.3 \pm 4.8) \times 10^{-3}} - 1 \right) \quad (10)$$

**Temperatura:**

$$T_k = (78 \pm 60)^\circ C \quad (11)$$

#### 4.1.3. Diodo zener

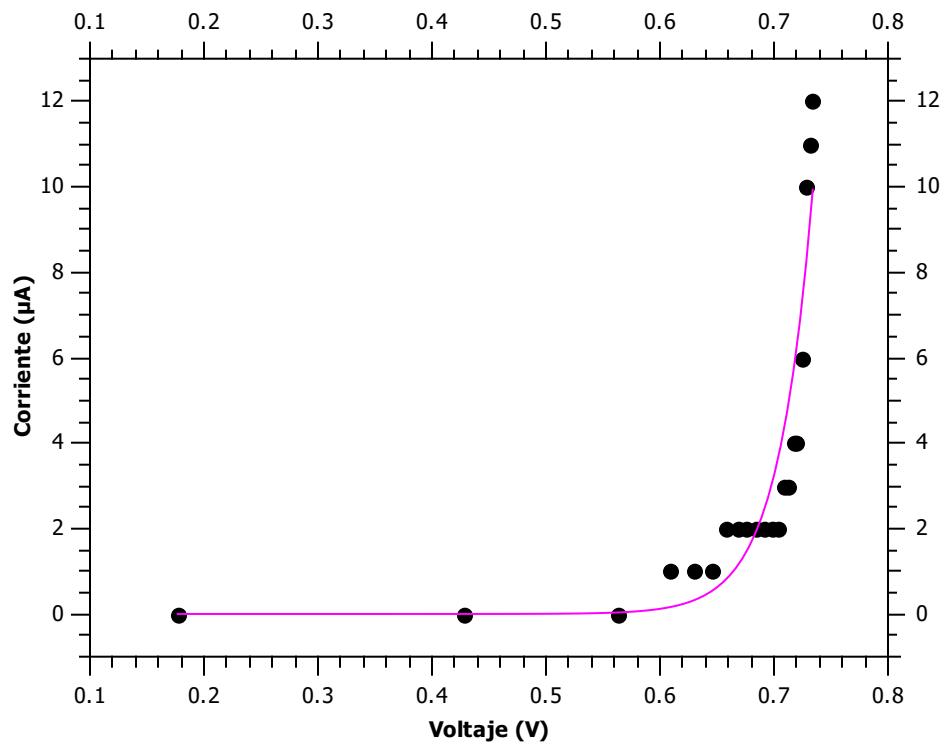


Figura 14: Corriente en función del voltaje para el diodo de silicio

$$I_D = ((1.74 \pm 5.3) \times 10^{-9}) \left( e^{V_D / (38.8 \pm 5.6) \times 10^{-3}} - 1 \right) \quad (12)$$

**Temperatura:**

$$T_k = (177 \pm 60)^\circ C \quad (13)$$

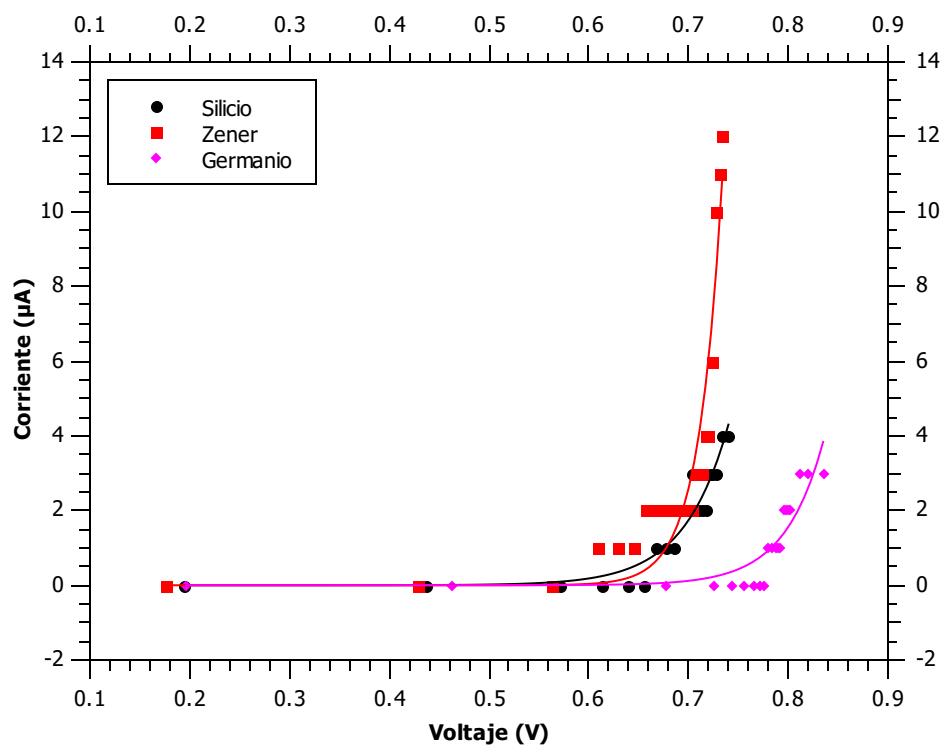


Figura 15: Corriente en función del voltaje para los tres diodos: silicio(negro), germanio (magenta) y zener(rojo)

## 4.2. Experimento 2

### 4.2.1. Corriente vs Voltaje

Se muestran las gráficas únicamente con incertezas, para los las mediciones obtenidas de corriente y voltaje para distintos leds.

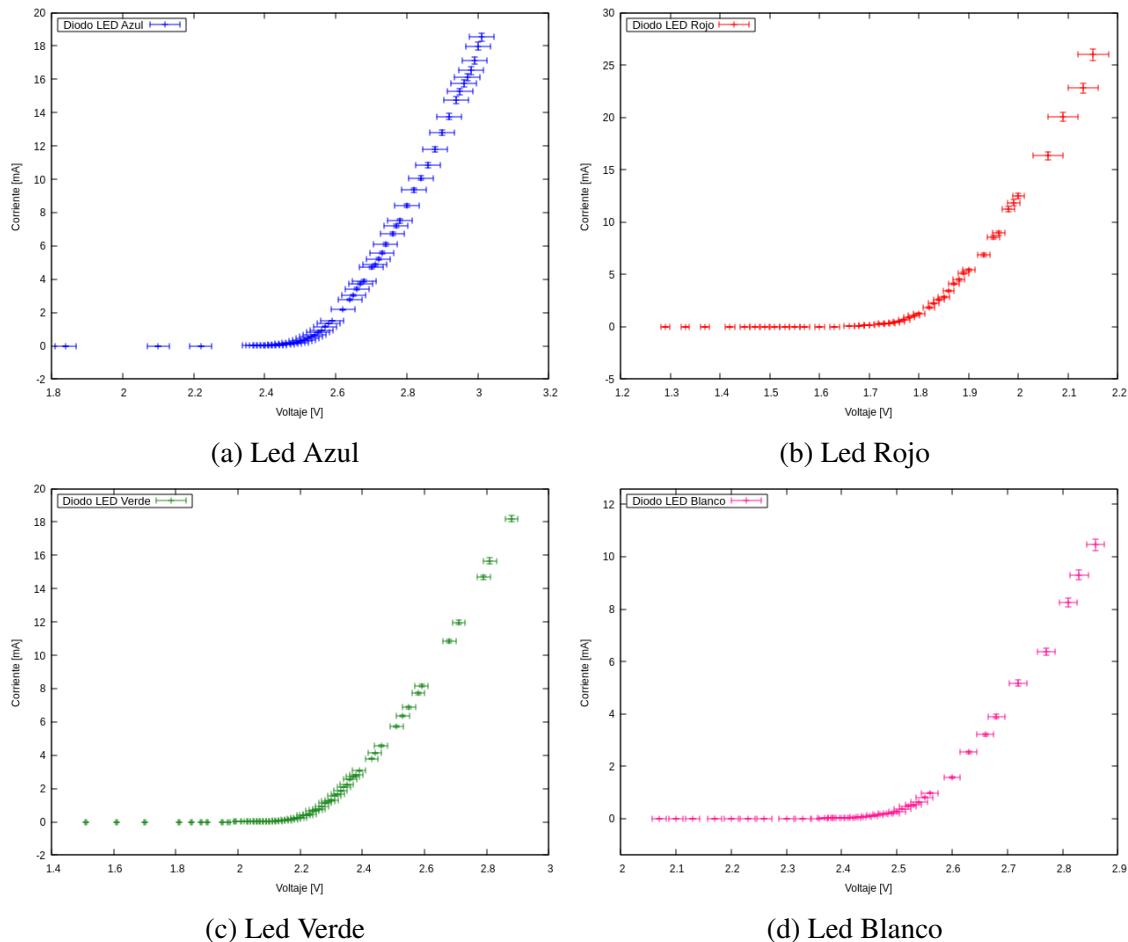


Figura 16: Corriente vs voltaje para distintos leds

Fuente: Elaboración propia utilizando Gnuplot, 2021

La figura que trazan es la esperada y establecida por la ecuación [14]. Representando todas las gráficas al mismo tiempo, se obtiene

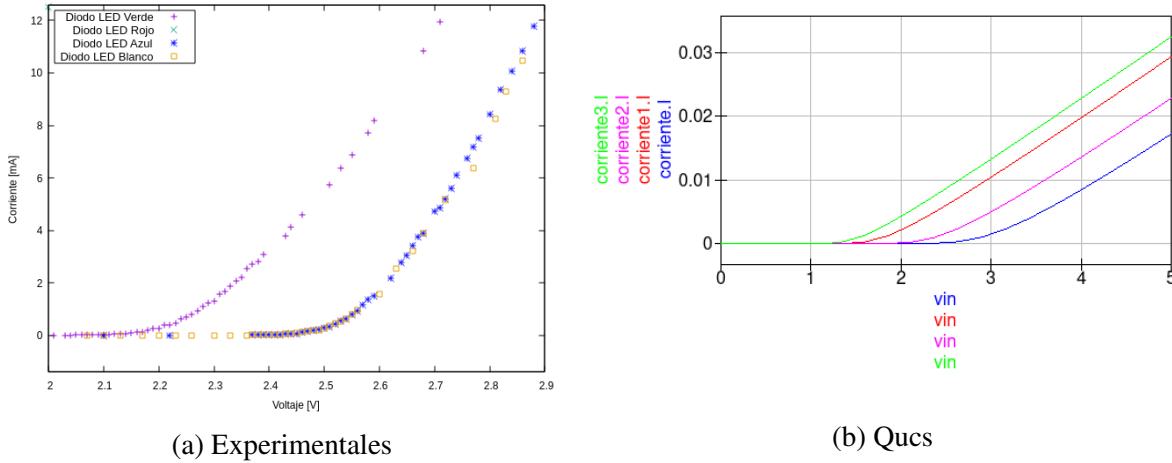


Figura 17: Corriente vs voltaje para todos los leds

Fuente: Elaboración propia utilizando Gnuplot, 2021

Las tablas de los valores medidos se encuentran en el siguiente link de GitHub (hacer clic sobre el diodo que se quiere observar):

## Diodo Azul

Diodo Rojo

Diodo Verde

## Diodo Blanco

#### **4.2.2. Diagramas de incertezas diagramas de polarización experimental vs teórico**

A continuación se presentan los diagramas de incertezas de los valores experimentales del voltaje de polarización vs el voltaje del fabricante.

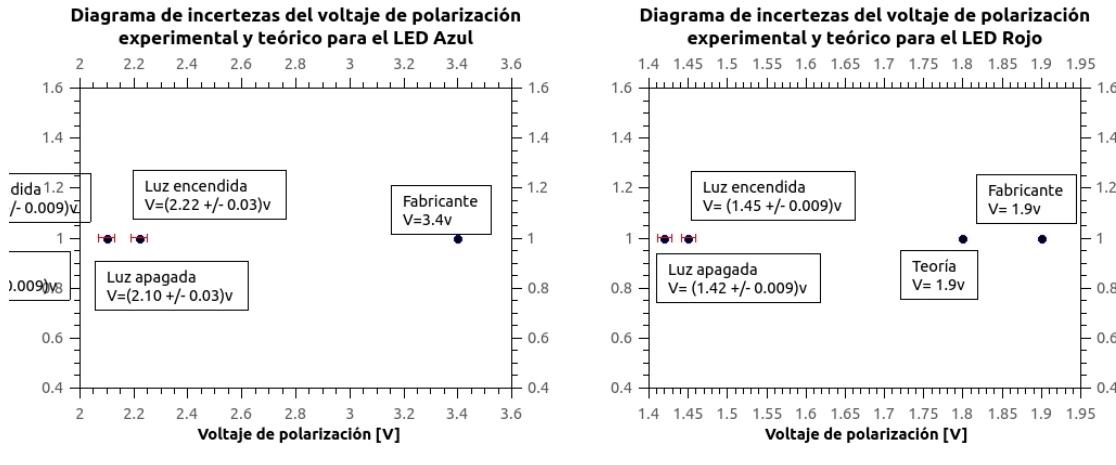
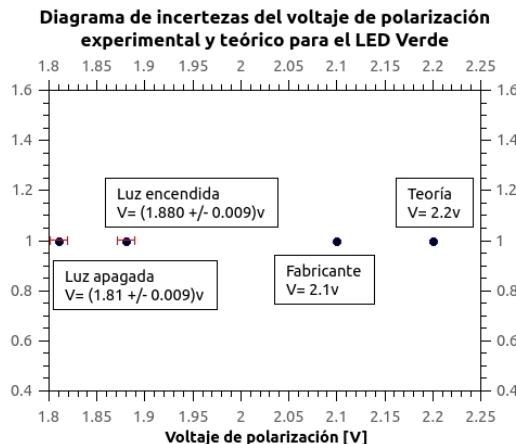
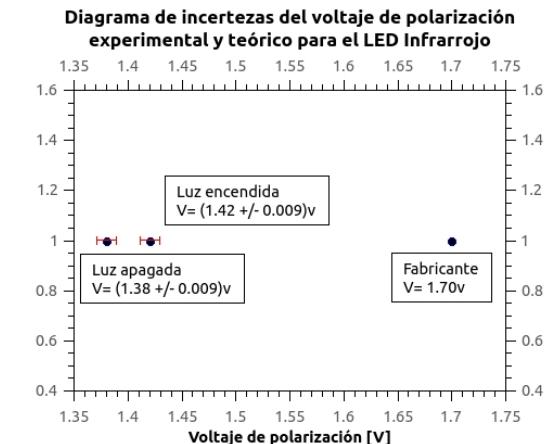


Figura 18. Diagrama de incertezas del voltaje de polarización azul y rojo



(a) Polarización verde



(b) Polarización blanco

Figura 19: Diagrama de incertezas del voltaje de polarización azul y rojo

#### 4.2.3. Voltaje de polarización

## Datos del fabricante/ teórico

Se presentan los datos tabulados del voltaje de polarización tomando los valores del fabricante.

Color	Voltaje de polarización [V]	$1/\lambda$ [ $[nm^{-1}]$ ]
Azul	3.4	1/468
Rojo	1.9	1/638
Infrarrojo	1.7	1/940
Verde	2.1	1/522

Cuadro 1: Voltaje de polarización datos del fabricante

## Luz apagada

Se presentan los datos tabulados del voltaje de polarización obtenidos cuando la luz está apagada.

Color	Voltaje de polarización [V]	$1/\lambda$ [ $[nm^{-1}]$ ]
Azul	$2.10 \pm 0.03$	1/468
Rojo	$1.420 \pm 0.009$	1/638
Infrarrojo	$1.330 \pm 0.009$	1/890
Verde	$1.81 \pm 0.03$	1/522

Cuadro 2: Voltaje de polarización con luz apagada

## Luz encendida

Se presentan los datos tabulados del voltaje de polarización obtenidos cuando la luz está apagada.

Color	Voltaje de polarización [V]	$1/\lambda$ [ $nm^{-1}$ ]
Azul	$2.22 \pm 0.03$	$1/468$
Rojo	$1.450 \pm 0.009$	$1/638$
Infrarrojo	$1.400 \pm 0.009$	$1/890$
Verde	$1.88 \pm 0.03$	$1/522$

Cuadro 3: Voltaje de polarización con luz apagada

#### 4.2.4. Gráficas y análisis lineal del voltaje de polarización

Para determinar la constante de Planck, es necesario realizar un análisis lineal del voltaje de polarización vs el inverso de la longitud de onda. La pendiente, se despeja como la ecuación [7], para encontrar la constante de Planck.

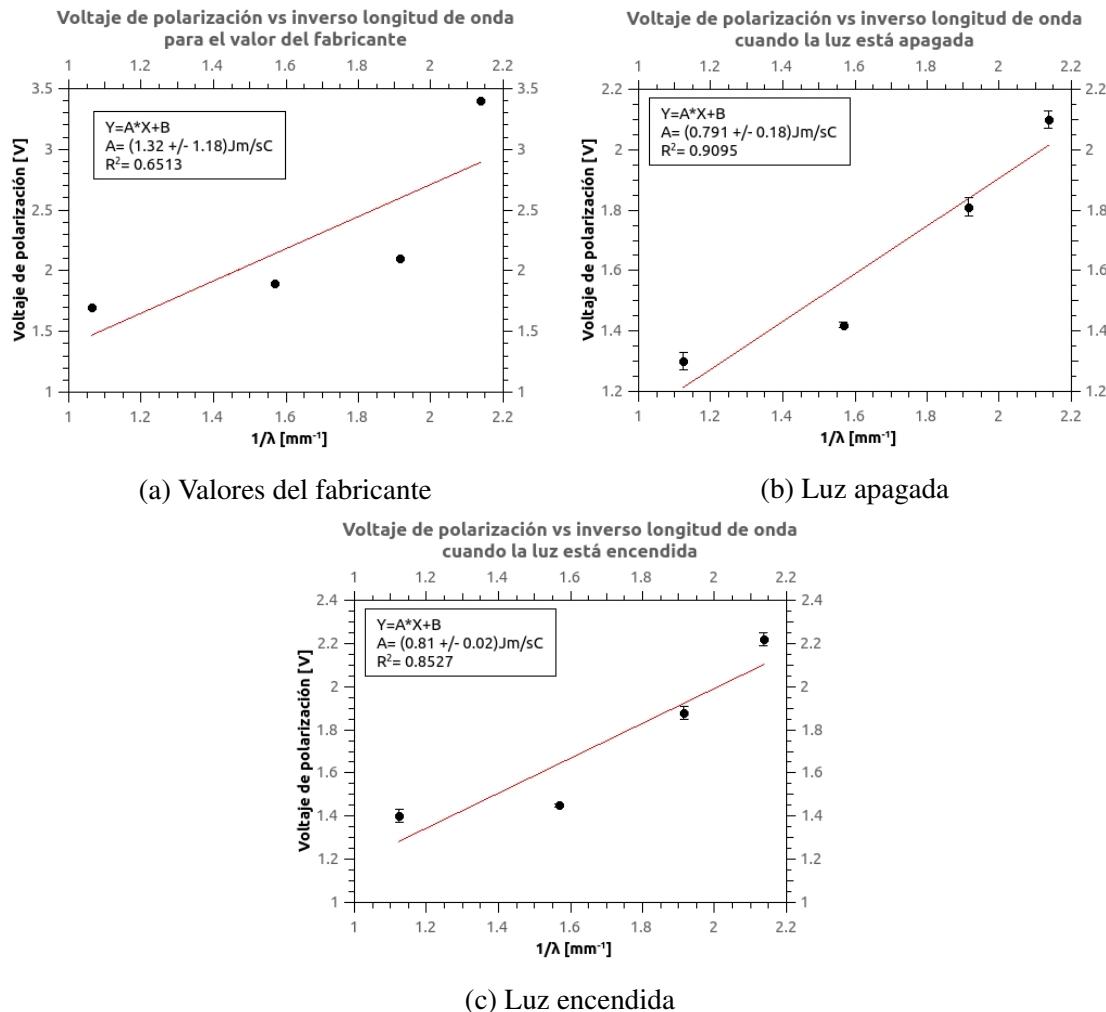


Figura 20: Regresión lineal de polarización vs el inverso de la longitud de onda.

Los valores calculados para la constante, se muestran a continuación

Tipo	$h \pm \delta h [10^{-28} \text{J.s}]$	$R^2$
<b>Fabricante</b>	$(7.072 \pm 3.659)$	0.6513
<b>Luz apagada</b>	$(4.223 \pm 0.942)$	0.9095
<b>Luz encendida</b>	$(4.318 \pm 1.269)$	0.8527

Cuadro 4: Valores obtenidos para la constante de Planck

Para una mejor comprensión, se presenta el diagrama de incertezas de los valores presentados obtenidos

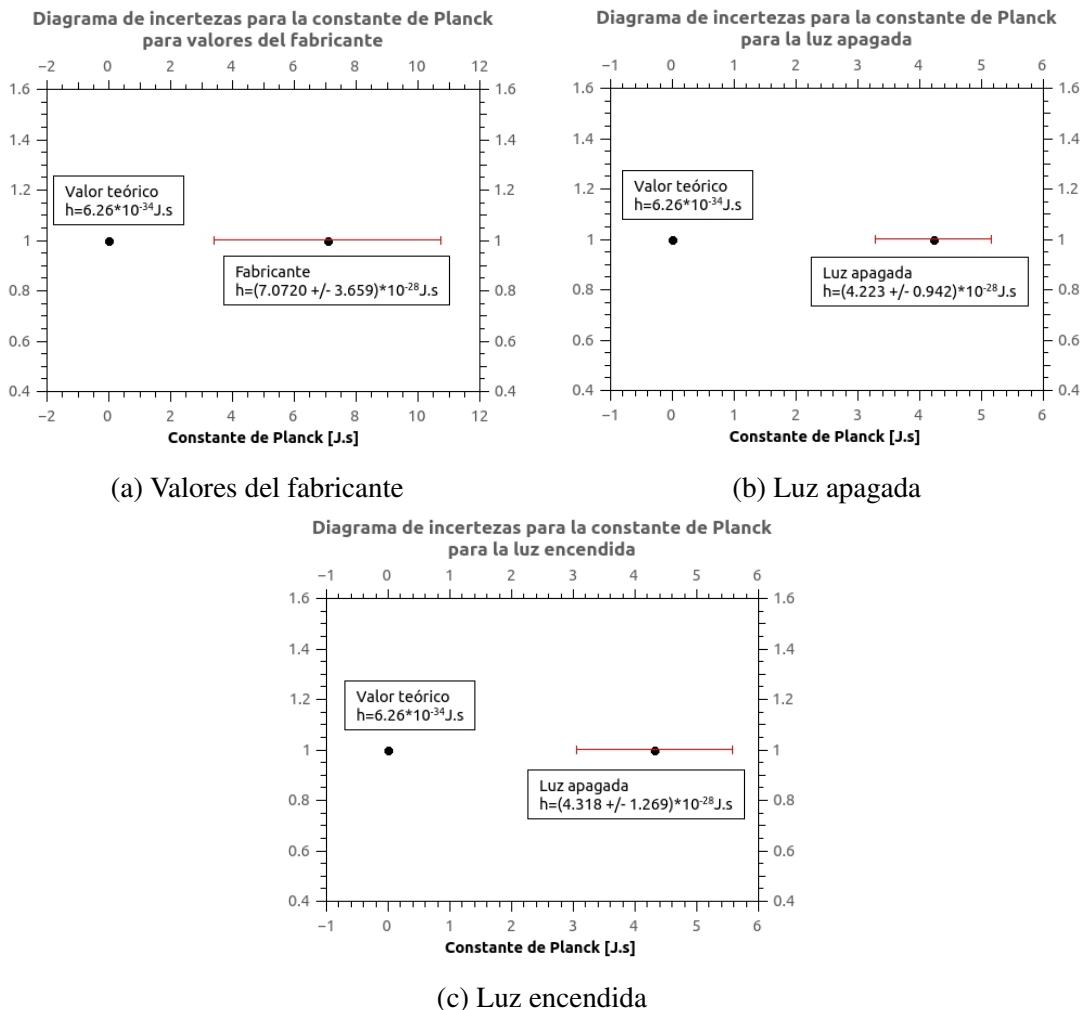


Figura 21: Diagrama de incertezas para la constante de Planck

## 5. Discusión de Resultados

### 5.1. Experimento 1

Se realizó la medición de la variación de la corriente y el voltaje en circuitos con diodos de silicio, germanio y zener, al variar el voltaje de entrada desde 0 a 5V en intervalos de 0.25V. Los valores de corriente y voltaje se presentaron de manera gráfica utilizando el software *Qtiplot* para mostrar las curvas de los tres diodos, que se presentan en las figuras 12, 13 y 14. Para las todas las gráficas se realizó un ajuste utilizando la ecuación de Shockley, (??), empleando como valores de referencia una temperatura de 27°C y corriente de saturación del diodo de silicio de 10pA (? , ?). A partir del ajuste se obtuvo la función que describe el comportamiento de la corriente en función del voltaje para cada diodo, obteniendo las expresiones de las ecuaciones (8), (10) y (12).

Para las tres gráficas se observa que hay puntos donde para cada voltaje medido se tiene el mismo valor de corriente, lo cual se debió a que la escala de medición del multímetro empleado podía medir solamente hasta  $1\mu\text{A}$ . Esto generó dificultad para obtener el ajuste de los datos con la ecuación de Shockley. A partir del ajuste de los datos de las gráficas de los diodos se calculó la temperatura del diodo, tomando el valor del ajuste correspondiente al voltaje térmico y a partir de este valor calcular la temperatura; de lo cual se obtuvo las temperaturas:  $(239 \pm 60)$ ,  $(78 \pm 60)$  y  $(177 \pm 60)^\circ\text{C}$  para los diodos de silicio, germanio y zener, respectivamente. Estos valores de temperatura son demasiado altos para el funcionamiento de los dispositivos, por lo que debido a la dificultad de medición de la corriente pudo ocasionar errores tan altos en los cálculos de la temperatura de cada uno de los diodos.

A partir de las gráficas puede aproximarse el voltaje de polarización para los diodos, figura 15; siendo los voltajes aprosimados de 0.74V para el silicio, 0.82V para el germanio y 0.7V para el diodo zener. El voltaje del diodo de silicio es cercano al valor teórico esperado (0.7V); para el germanio el voltaje de polarización del germanio esperado es de 0.3V, sin embargo el medido es mucho mayor (? , ?). No fue posible determinar la razón para este valor de voltaje en el diodo, ya que al probarlo previo a armar el circuito no se encontró algún tipo de falla. Para el caso del diodo zener, el voltaje de polarización aproximado es de 0.7V, lo cual puede indicarnos que el material del que está hecho es silicio, este voltaje coincide con el valor teórico esperado.

## 5.2. Gráficas de los Leds

Se puede observar que las gráficas [17], coinciden con la ecuación de Shockley. Se logró demostrar que los leds no poseen un comportamiento lineal, sino exponencial creciente. Sin embargo, los valores de la corriente de polarización difiere con la esperada por el fabricante del led RGB, así como el led blanco e infrarrojo. Los valores poseen voltajes de polarización mucho menores a los indicados por el fabricante. Esto debido a la falta de precisión de los instrumentos, así como a errores sistemáticos por parte del experimentado.

Se compararon los de la corriente y el voltaje con los simulados en Qucs, cuya gráfica puede observarse en [17a] y [17b]. Como se observa, la gráfica del led verde y azul se comportan tal y como se espera. Sin embargo, el led blanco, y rojo se encuentran sobrepuertos. Lo cual no es el comportamiento esperado, ya que ambos leds poseen voltajes de polarización diferentes, por lo que su ascenso debe empezar mucho después que el rojo.

## 5.3. Constante de Planck

Como se puede observar de la tabla [4], así como de los diagramas de incertezas [21], los valores encontrados son muy pequeños, más no se aproximan a la constante de Planck. Es decir, las aproximaciones realizadas no fueron exactas con el valor teórico. El fallo en la práctica pudo deberse a varias causas, entre las que encontramos: errores sistemáticos por parte del experimentador, como mediciones incorrectas o poco precisas, así como la falta de precisión del multímetro, el cual solamente mide en mV y mA, por lo que valores más pequeños a esta dimensión no fueron posibles. A pesar del gran número de mediciones tomadas, un lugar con poca iluminación e instrumentos mucho más precisos podrían asegurar una aproximación más cercana al valor real. El valor teórico tampoco se encuentra dentro del rango permitido, por lo que las mediciones no son consistentes con lo esperado por la teoría.

Es importante notar que el voltaje nominal para algunos LEDs se desviaron considerablemente del voltaje nominal considerado por el fabricante, como es el ejemplo del led Azul, el cual constaba de un voltaje nominal de 3.4V, mientras que los voltajes medidos fueron de 2.10V y 2.22 V cuando la luz estaba apagada y encendida, respectivamente; mostrando una diferencia de 1.3V y 1.18V, respectivamente. Por otro lado, que el LED verde posía un voltaje nominal del fabricante del 2.1V y se obtuvieron voltajes 1.80v y 1.88v cuando la luz se encuentra apagada y encendida, respectivamente; mostrando una diferencia de 0.3v y 0.22v, respectivamente.

## 6. Conclusiones

1. Las temperaturas de los diodos de silicio, germanio y zener obtenidas del ajuste de los datos experimentales con la ecuación de Shockley fueron  $(239 \pm 60)$ ,  $(78 \pm 60)$  y  $(177 \pm 60)^\circ\text{C}$  respectivamente.
2. La temperaturas obtenidas del ajuste de datos experimentales no coincidieron con las condiciones de funcionamiento al momento de las mediciones, debido a la limitación en la escala de medición de corriente del multímetro utilizado.

3. El voltaje de polarización para los diodos de silico, germanio y zener aproximado fue de 0.74, 0.82 y 0.7V respectivamente.
4. El voltaje de polarización experimental del diodo de silicio fue cercano al valor teórico, mientras que el del diodo de germanio fue mucho más grande que el valor teórico esperado.
5. El material del que está fabricado el diodo zener es silicio.
6. Los valores para la constante de Planck encontrados se muestran en la tabla [4].
7. Como se muestra en los diagramas de incertezas [21], los valores encontrados para la constante de Planck no son consistentes con el valor teórico, ya que este no se encuentra dentro del rango de incertezas, ni los valores encontrados poseen la misma magnitud.
8. Errores durante la medición, instrumentos poco precisos, condiciones poco favorables como poca iluminación, son algunas posibles causas del fallo durante las mediciones de la práctica.
9. Se compararon las gráficas de la corriente vs voltaje de todos los leds, presentándose el comportamiento exponencial esperado.
10. Se compararon los resultados para la corriente vs voltaje esperados utilizando la herramienta Qucs, con los valores experimentales, observándose el comportamiento esperado únicamente para los leds azul y verde.

## Referencias

- Boylestad, R., y Nasshelsky, L. (2009). *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos* (10<sup>a</sup> ed.). México: Pearson Educación.
- Konrad, J., Kobel, M., Pospiech, G., Bilow, U., Pedersen, M., Ould-Saada, F., y Gramstad, E. (2013). *Unidades de energía*. CERN. Recuperado de [https://atlas.physicsmasterclasses.org/es/zpath\\_help1.html](https://atlas.physicsmasterclasses.org/es/zpath_help1.html).
- Schwinger, J. (2001). *Quantum mechanics: symbolism of atomic measurements* (1<sup>a</sup> ed.). Alemania, USA: Springer-Verlag.

## Anexos

### 6.1. Experimento 1

#### 6.1.1. Diodo de silicio

##### Gráfica de la corriente en función del voltaje

Se graficó los valores de corriente medidos en función de los valores de voltaje obtenidos empleando el software *Qtiplot*, figura 12 (Resultados). Utilizando un ajuste con una ecuación simplificada

<b>V (mV)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>	<b>V (mV)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>	<b>V (mV)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>
740 $\pm$ 6	4 $\pm$ 2	714 $\pm$ 6	2 $\pm$ 2	667 $\pm$ 5	1 $\pm$ 2
734 $\pm$ 6	4 $\pm$ 2	709 $\pm$ 6	2 $\pm$ 2	655 $\pm$ 5	0 $\pm$ 2
733 $\pm$ 6	4 $\pm$ 2	704 $\pm$ 6	2 $\pm$ 2	639 $\pm$ 5	0 $\pm$ 2
728 $\pm$ 6	3 $\pm$ 2	700 $\pm$ 6	2 $\pm$ 2	614 $\pm$ 5	0 $\pm$ 2
724 $\pm$ 6	3 $\pm$ 2	693 $\pm$ 5	2 $\pm$ 2	571 $\pm$ 5	0 $\pm$ 2
722 $\pm$ 6	3 $\pm$ 2	685 $\pm$ 5	1 $\pm$ 2	436 $\pm$ 4	0 $\pm$ 2
718 $\pm$ 6	2 $\pm$ 2	678 $\pm$ 5	1 $\pm$ 2	195 $\pm$ 3	0 $\pm$ 2

Cuadro 5: Voltaje y corriente para el diodo de silicio con variaciones del voltaje de 0.25V

<b>V (V)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>	<b>V (V)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>	<b>V (V)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>
5.20 $\pm$ 0.05	0 $\pm$ 2	3.44 $\pm$ 0.04	0 $\pm$ 2	1.68 $\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2
4.95 $\pm$ 0.04	0 $\pm$ 2	3.17 $\pm$ 0.04	0 $\pm$ 2	1.43 $\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2
4.70 $\pm$ 0.04	0 $\pm$ 2	2.93 $\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2	1.18 $\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2
4.45 $\pm$ 0.04	0 $\pm$ 2	2.66 $\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2	0.957 $\pm$ 0.002	0 $\pm$ 2
4.18 $\pm$ 0.04	0 $\pm$ 2	2.44 $\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2	0.673 $\pm$ 0.002	0 $\pm$ 2
3.94 $\pm$ 0.04	0 $\pm$ 2	2.17 $\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2	0.460 $\pm$ 0.002	0 $\pm$ 2
3.67 $\pm$ 0.04	0 $\pm$ 2	1.93 $\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2	0.192 $\pm$ 0.002	0 $\pm$ 2

Cuadro 6: Voltaje y corriente para el diodo de silicio en inversa con variaciones del voltaje de 0.25V

de la ecuación de Shockley, ecuación (??):

$$y = a \left( e^{x/nb} - 1 \right) \quad (14)$$

donde  $a$  es la corrienteórica de saturación, 10pA,  $n = 1$  y  $b$  es el voltaje térmico, ecuación (??), utilizando una temperatura de 27C (cita al libro). La función que describe el comportamiento real de la corriente en función del voltaje en el circuito del diodo de silicio es:

$$I_D = ((2.33 \pm 4.30) \times 10^{-7}) \left( e^{V_D/(44.2 \pm 4.9) \times 10^{-3}} - 1 \right) \quad (15)$$

### Cálculo de la temperatura empleando la ecuación de Shockley:

A partir de la función del fit realizado a la gráfica de la corriente se obtuvo el valor del voltaje térmico del diodo, a partir del cual se calcula la temperatura real utilizando la ecuacion (??):

$$V_T = \frac{kT_K}{q} \rightarrow T_k = \frac{qV_T}{k} = \frac{(1.6 \times 10^{-19})(44.2 \times 10^{-3})}{1.38 \times 10^{-23}} = (512 \pm 60)K = (239 \pm 60)^\circ C \quad (16)$$

#### 6.1.2. Diodo de germanio

##### Gráfica de la corriente en función del voltaje

<b>V (mV)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>	<b>V (mV)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>	<b>V (mV)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>
835 $\pm$ 6	3 $\pm$ 2	791 $\pm$ 6	1 $\pm$ 2	765 $\pm$ 6	0 $\pm$ 2
820 $\pm$ 6	3 $\pm$ 2	789 $\pm$ 6	1 $\pm$ 2	756 $\pm$ 6	0 $\pm$ 2
812 $\pm$ 6	3 $\pm$ 2	787 $\pm$ 6	1 $\pm$ 2	744 $\pm$ 6	0 $\pm$ 2
801 $\pm$ 6	2 $\pm$ 2	784 $\pm$ 6	1 $\pm$ 2	725 $\pm$ 6	0 $\pm$ 2
799 $\pm$ 6	2 $\pm$ 2	780 $\pm$ 6	1 $\pm$ 2	678 $\pm$ 5	0 $\pm$ 2
798 $\pm$ 6	2 $\pm$ 2	776 $\pm$ 6	0 $\pm$ 2	462 $\pm$ 4	0 $\pm$ 2
795 $\pm$ 6	2 $\pm$ 2	771 $\pm$ 6	0 $\pm$ 2	196 $\pm$ 3	0 $\pm$ 2

Cuadro 7: Voltaje y corriente para el diodo de germanio con variaciones del voltaje de 0.25V

<b>V (V)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>	<b>V (V)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>	<b>V (V)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>
2.98 $\pm$ 0.03	4 $\pm$ 2	2.63 $\pm$ 0.03	1 $\pm$ 2	$\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2
2.95 $\pm$ 0.03	3 $\pm$ 2	2.54 $\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2	$\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2
2.91 $\pm$ 0.03	2 $\pm$ 2	2.46 $\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2	$\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2
2.86 $\pm$ 0.03	2 $\pm$ 2	2.34 $\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2	$\pm$ 0.002	0 $\pm$ 2
2.80 $\pm$ 0.03	1 $\pm$ 2	2.21 $\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2	$\pm$ 0.002	0 $\pm$ 2
2.75 $\pm$ 0.03	1 $\pm$ 2	2.05 $\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2	$\pm$ 0.002	0 $\pm$ 2
2.69 $\pm$ 0.03	1 $\pm$ 2	1.87 $\pm$ 0.03	0 $\pm$ 2	$\pm$ 0.002	0 $\pm$ 2

Cuadro 8: Voltaje y corriente para el diodo de silicio en inversa con variaciones del voltaje de 0.25V

Como se hizo para el diodo de silicio, se graficó los valores de corriente medidos en función del voltaje, figura 13 (Resultados). Empleando la ecuación (14), para obtener una función que describa el comportamiento de la corriente del diodo, se obtuvo:

$$I_D = ((3.1 \pm 1.2) \times 10^{-9}) (e^{V_D/(30.3 \pm 4.8) \times 10^{-3}} - 1) \quad (17)$$

### Cálculo de la temperatura empleando la ecuación de Shockley:

Se realizó el mismo procedimiento que para el diodo de silicio, usando el valor del voltaje térmico del diodo, a partir del cual se calcula la temperatura real utilizando la ecuación (??):

$$T_k = \frac{qV_T}{k} = \frac{(1.6 \times 10^{-19})(30.3 \times 10^{-3})}{1.38 \times 10^{-23}} = (351 \pm 60)K = (78 \pm 60)^\circ C \quad (18)$$

#### 6.1.3. Diodo zener

##### Gráfica de la corriente en función del voltaje

Se graficó los valores de corriente medidos en función del voltaje, ?? (Resultados). Empleando la ecuación (14), para obtener una función que describa el comportamiento de la corriente del

<b>V (mV)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>	<b>V (mV)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>	<b>V (mV)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>
734 ± 6	12 ± 2	708 ± 6	3 ± 2	658 ± 5	2 ± 2
731 ± 6	11 ± 2	703 ± 6	2 ± 2	645 ± 5	1 ± 2
728 ± 6	10 ± 2	698 ± 5	2 ± 2	629 ± 5	1 ± 2
724 ± 6	6 ± 2	692 ± 5	2 ± 2	609 ± 5	1 ± 2
720 ± 6	4 ± 2	685 ± 5	2 ± 2	563 ± 5	0 ± 2
717 ± 6	4 ± 2	676 ± 5	2 ± 2	428 ± 4	0 ± 2
713 ± 6	3 ± 2	668 ± 5	2 ± 2	177 ± 3	0 ± 2

Cuadro 9: Voltaje y corriente para el diodo zener con variaciones del voltaje de 0.25V

<b>V (V)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>	<b>V (V)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>	<b>V (V)</b>	<b>I (<math>\mu</math>A)</b>
5.20 ± 0.05	0 ± 2	3.44 ± 0.04	0 ± 2	1.68 ± 0.03	0 ± 2
4.95 ± 0.04	0 ± 2	3.16 ± 0.04	0 ± 2	1.40 ± 0.03	0 ± 2
4.71 ± 0.04	0 ± 2	2.93 ± 0.03	0 ± 2	1.15 ± 0.03	0 ± 2
4.44 ± 0.04	0 ± 2	2.67 ± 0.03	0 ± 2	0.952 ± 0.002	0 ± 2
4.19 ± 0.04	0 ± 2	2.43 ± 0.03	0 ± 2	0.686 ± 0.002	0 ± 2
3.91 ± 0.04	0 ± 2	2.15 ± 0.03	0 ± 2	0.452 ± 0.002	0 ± 2
3.69 ± 0.04	0 ± 2	1.92 ± 0.03	0 ± 2	0.177 ± 0.002	0 ± 2

Cuadro 10: Voltaje y corriente para el diodo zener en inversa con variaciones del voltaje de 0.25V

diodo, se obtuvo:

$$I_D = ((1.74 \pm 5.3) \times 10^{-9}) \left( e^{V_D/(38.8 \pm 5.6) \times 10^{-3}} - 1 \right) \quad (19)$$

### Cálculo de la temperatura empleando la ecuación de Shockley:

Usando el valor del voltaje térmico del diodo de la ecuación (19), a partir del cual se calcula la temperatura real utilizando la ecuación (??):

$$T_k = \frac{qV_T}{k} = \frac{(1.6 \times 10^{-19})(38.8 \times 10^{-3})}{1.38 \times 10^{-23}} = (450 \pm 60)K = (177 \pm 60)^\circ C \quad (20)$$

## 6.2. Experimento 2

### 6.2.1. Constante de Planck

A continuación se muestran los cálculos de la constante de planck.

#### Datos del fabricante

$$h = \frac{me}{c} = \frac{13.24438(1.602 * 10^{-19})}{3 * 10^8} = 7.07249 * 10^{-28} J.s$$

Para encontrar la incertezza, hacemos uso de la siguiente fórmula

$$\delta h = \frac{me}{c} \left( \frac{\delta m}{m} + \frac{\delta e}{e} + \frac{\delta c}{c} \right)$$

Ya que se asumió que la carga del electrón, y la velocidad de la luz como constantes, entonces

$$\delta h = \frac{me}{c} \left( \frac{\delta m}{m} \right) = \frac{e\delta m}{c}$$

$$\delta h = \frac{1.602 * 10^{-19}(0.68524)}{3 * 10^8} = 3.659 * 10^{-28} J.s$$

Entonces el valor encontrado es

$$h = [7.072 * 10^{-28} \pm 3.659 * 10^{-28}] J.s$$

### Luz apagada

$$h = \frac{me}{c} = \frac{0.7908912(1.602 * 10^{-19})}{3 * 10^8} = 4.223 * 10^{-28} J.s$$

Para encontrar la incertezza, hacemos uso de la siguiente fórmula

$$\delta h = \frac{me}{c} \left( \frac{\delta m}{m} + \frac{\delta e}{e} + \frac{\delta c}{c} \right)$$

Ya que se asumió que la carga del electrón, y la velocidad de la luz como constantes, entonces

$$\delta h = \frac{me}{c} \left( \frac{\delta m}{m} \right) = \frac{e\delta m}{c}$$

$$\delta h = \frac{1.602 * 10^{-19}(0.17645)}{3 * 10^8} = 0.942 * 10^{-28} J.s$$

Entonces el valor encontrado es

$$h = [2.6521 * 10^{-28} \pm 0.942 * 10^{-28}] J.s$$

### Luz encendida

$$h = \frac{me}{c} = \frac{0.80866(1.602 * 10^{-19})}{3 * 10^8} = 4.318 * 10^{-28} J.s$$

Para encontrar la incertezza, hacemos uso de la siguiente fórmula

$$\delta h = \frac{me}{c} \left( \frac{\delta m}{m} + \frac{\delta e}{e} + \frac{\delta c}{c} \right)$$

Ya que se asumió que la carga del electrón, y la velocidad de la luz como constantes, entonces

$$\delta h = \frac{me}{c} \left( \frac{\delta m}{m} \right) = \frac{e\delta m}{c}$$

$$\delta h = \frac{1.602 * 10^{-19}(0.2376)}{3 * 10^8} = 1.269 * 10^{-28} J.s$$

Entonces el valor encontrado es

$$h = [2.6521 * 10^{-28} \pm 1.269 * 10^{-28}] J.s$$