

Caracterización de diodos. Rectificadores de media y onda completa.

MAXIMILIANO INAFUKU

maxi-46@hotmail.com

ERNESTO PETINO

ernesto.atmo@gmail.com

IGNACIO POGGI

ignaciop.3@gmail.com

Grupo 8 - Laboratorio 3, Cátedra Bilbao - Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

1 de marzo de 2017

Resumen

En este trabajo se estudió la utilización del diodo semiconductor como elemento de rectificación de corriente alterna, en combinación con otros elementos (resistencias y capacitores). Como primera experiencia, se construyó un rectificador de media onda primero con un diodo Schottky y luego con un Zener, y se halló que el voltaje umbral del diodo Schottky era $\approx 0,6$ V y para el segundo, la tensión Zener fue de $\approx -0,8$ V. En segundo lugar se estudió un rectificador de onda completa, y se observó que por la resistencia de carga la corriente iba en un sólo sentido. Mediante el agregado de un condensador en paralelo a esta resistencia, se observó el efecto del ripple y se notó que este disminuía conforme aumentaba la capacidad.

1. Introducción [1]

El diodo es un dispositivo de dos terminales que permite el paso de la corriente en una sola dirección. Los más utilizados actualmente son los diodos semiconductores y Zener (Figura 1).

Cuando se somete al diodo semiconductor a una diferencia de tensión externa, puede polarizarse de forma directa o inversa. En la polarización directa, la batería disminuye la barrera de potencial, permitiendo el paso de la corriente de electrones a través de la unión; es decir, el diodo polarizado directamente funciona como un conductor, cuando se supera un cierto voltaje umbral. En el caso de la polarización inversa, el polo negativo de la batería se conecta a la zona p y el polo positivo a la zona n, lo que hace aumentar la zona de carga, y la tensión en dicha zona hasta que se alcanza el valor de la tensión de la batería.

Otro tipo de diodo estudiado es el diodo Zener. Estos se emplean para producir una tensión entre sus terminales muy constante y relativamente independiente de la corriente que los atraviesan. Normalmente, polarizados en forma inversa no permite prácticamente el pasaje de corriente, pero al alcanzar una determinada tensión (tensión Zener), se produce

un aumento de la cantidad de corriente que lo atraviesa, manteniendo la tensión entre sus terminales prácticamente constante.

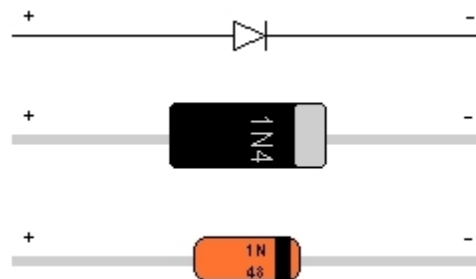


Figura 1: Clases de diodos estudiados. De arriba hacia abajo: diagrama de un diodo, diodo semiconductor y diodo Zener.

El modelo utilizado para caracterizar al diodo es el de Shockley, el cual permite aproximar el comportamiento del mismo en la mayoría de los circuitos. La ecuación que relaciona la intensidad de corriente y la diferencia de potencial es:

$$I = I_S(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1) \quad (1)$$

donde

- V_D : Tensión a través del diodo.

- I_S : Intensidad de corriente de saturación que se establece al polarizar inversamente el diodo ($\sim 10^{-12}$ A).
- V_T : Tensión térmica (~ 25 mV a 25°C). Se define como $\frac{kT}{q}$, donde k es la constante de Boltzmann, T la temperatura y q la carga del electrón.
- n : Factor de calidad.

La ecuación (1) da lugar a una curva característica (Figura 2) con los siguientes parámetros:

- V_u : Tensión umbral. Al polarizar directamente el diodo, la barrera de potencial inicial se va reduciendo, incrementando la corriente ligeramente. Sin embargo, cuando la tensión externa supera la tensión umbral, la barrera de potencial desaparece.
- I_{max} : Intensidad de corriente máxima que puede conducir el diodo sin fundirse.
- V_r : Tensión de ruptura. A partir de un determinado valor de la tensión, el diodo comienza a conducir también en polarización inversa.

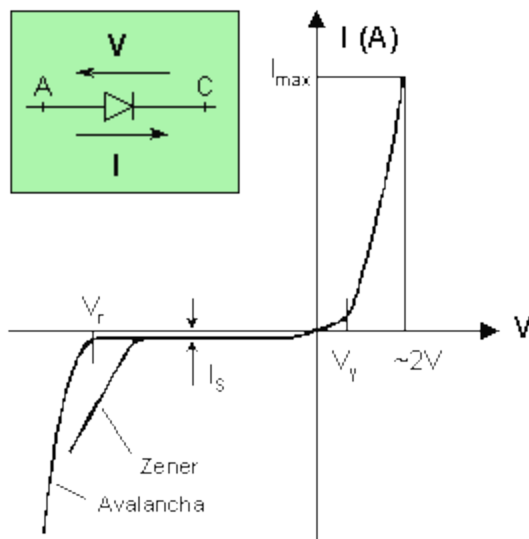


Figura 2: Curva característica de un diodo según el modelo de Shockley.

Rectificadores de media onda y onda completa.

Los rectificadores eléctricos son los circuitos encargados de convertir la corriente alterna en corriente continua. Los más habituales son

los contruidos con diodos. Los dos tipos de rectificadores estudiados en este trabajo son los rectificadores de media onda y los rectificadores de onda completa.

Los rectificadores de media onda funcionan haciendo pasar la mitad de la corriente alterna a través de uno o más diodos, convirtiendo en este paso dicha mitad de la corriente alterna en corriente eléctrica directa. Estos rectificadores no son muy eficientes porque sólo convierten la mitad de la corriente alterna en corriente directa; por lo tanto, solo un diodo es necesario para su funcionamiento.

Los rectificadores de onda completa son más complejos que los rectificadores de media onda, pero también son mucho más eficientes. Estos generalmente utilizan cuatro diodos para funcionar (puente de diodos), haciendo pasar la corriente alterna a través de dicho puente, obteniendo un terminal positivo y otro negativo, característico de la corriente directa.

2. Dispositivo experimental

Los instrumentos de laboratorio utilizados fueron:

- Diodos Schottky (1N 4007 LD).
- Diodo Zener (4.7V).
- Osciloscopio Tektronix 1052-B (Rótulo: OSC-067)[2].
- Transformador conectado a línea.
- Resistencias varias.
- Capacitores varios.

Para poder caracterizar el voltaje umbral del diodo, es necesario conocer la caída de potencial y la intensidad que pasan por el mismo. Con el objetivo de hallar estos datos se armó el circuito que se muestra en la Figura 3, donde se utilizó como voltímetro, ambos canales del osciloscopio y la fuente alterna, es el transformador conectado a línea. Esta configuración fue la misma tanto para la caracterización del Schottky como la del diodo Zener. Los datos se recogieron en la computadora, conectando el osciloscopio por medio de un cable USB y utilizando el programa OpenChoice Desktop.

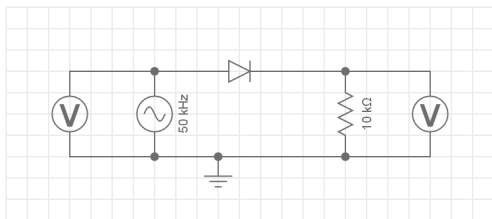


Figura 3: Esquema del circuito realizado para la caracterización del diodo.

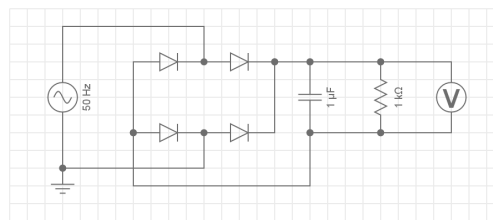


Figura 5: Esquema del circuito realizado, agregando un capacitor al rectificador de onda completa.

Para la segunda parte de la experiencia, se armó un puente de diodos como el que se muestra en la Figura 4. Esta vez, la parte del circuito de interés fue cómo era el voltaje que pasaba por la resistencia de carga, por lo que se colocó allí el osciloscopio y se observó el voltaje en función del tiempo. Luego para una última experiencia se modificó levemente el circuito anterior, agregando un capacitor en paralelo a la resistencia de carga (Figura 5). Se observó para este caso que ocurría con la caída de potencial al utilizar distintos capacitores.

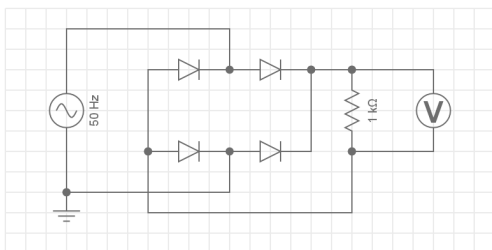


Figura 4: Esquema del circuito realizado del rectificador de onda completa.

Para poder apreciar mejor la forma funcional del Ripple, se utilizó la opción del osciloscopio "DC coupling", la cual remueve la parte continua de la señal y permite ver la oscilación centrada en el cero.

3. Resultados y análisis

3.1 Caracterización de diodos Schottky y Zener

Lo primero que se puede apreciar en el osciloscopio es que la caída de potencial de la resistencia es nula cuando la fuente de alterna tiene un potencial negativo, indicando que la corriente circulando por la resistencia era nula. Y cuando el voltaje entregado por la fuente es positivo, si se logra observar una diferencia de potencial no nula en la resistencia (Figura 6, curva amarilla). Por este motivo el nombre de esta configuración es rectificador de media onda, ya que "permite el paso de media onda". Además es posible notar que la frecuencia registrada del osciloscopio se encuentra en un valor cercano a los 50 Hz, que es la frecuencia de la tensión de línea, como se esperaba.

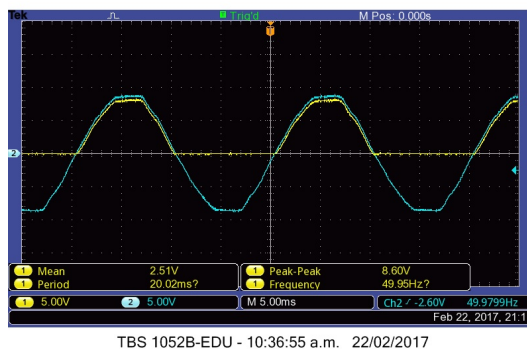


Figura 6: Captura de pantalla obtenida por el osciloscopio, con el diodo Schottky. En amarillo la caída de potencial de la resistencia y en azul el voltaje entregado por la fuente alterna.

Con los datos de la caída de potencial en la

resistencia y el voltaje otorgado por el transformador conectado a la red de línea se obtuvieron la intensidad que circulaba por el diodo y la caída de potencial del mismo por medio de las ecuaciones:

$$I = \frac{V_R}{R} \quad (2)$$

$$V_D = V - VR \quad (3)$$

Siendo la resistencia utilizada en este circuito de unos 10 k Ω .

Al graficar la intensidad en función de la caída de potencial en el diodo, se puede observar que a voltajes negativos (polarización inversa respecto al diodo) la intensidad es prácticamente nula, mientras que luego de pasar una cierta tensión umbral, V_u , el diodo se comporta casi como un conductor, aumentando la corriente que pasa por este de forma considerable (Figura 7). Se hizo un ligero cambio respecto al modelo de Shockley original, que fue denominar a $nV_T = V_{Teff}$ ya que al realizar el ajuste, estos dos parámetros son indistinguibles.

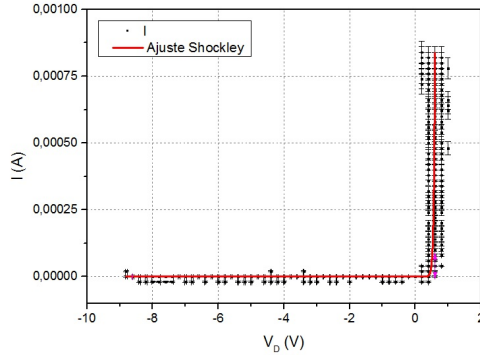


Figura 7: Gráfico de la intensidad circulante por el diodo en función de su caída de potencial.

La determinación de dicho V_u es arbitraria, pero se suele tomar como criterio, el voltaje al cual la intensidad es de 1 mA. En la Tabla 1, se muestran los parámetros obtenidos por el ajuste según la ecuación de Shockley y se estima así que $V_u \approx 0,6V$. Cabe destacar que esta es sólo una estimación ya que el alto error en el parámetro I_S no permitió obtener este valor con exactitud. El R^2 no es muy favorable, con lo que muchos datos no son explicados correctamente por el modelo, pero el alto valor

obtenido del F-valor indica que es improbable que el ajuste haya sido aleatorio. El modelo utilizado tuvo una gran complicación para ajustar los datos, debido a que este era muy sensible a los valores del V_D en cuánto comenzaba el crecimiento exponencial.

Cuadro 1: Ajuste de Shockley

$I(V_D) = I_S \cdot (e^{\frac{V_D}{V_{Teff}}} - 1)$	
I_S	$5 * 10^{-11} \pm 2 * 10^{-9}$
V_{Teff}	$0,040 \pm 0,006$
R^2	0.5
F-valor	2700

En el gráfico de los residuos se puede ver que estos están discretizados debido a la digitalización del instrumental utilizado. En general se observa que para valores bajos, las desviaciones son negativas, y se llega a observar que en los últimos valores, donde se observa el comportamiento exponencial del ajuste, los residuos aumentan (Figura 8).

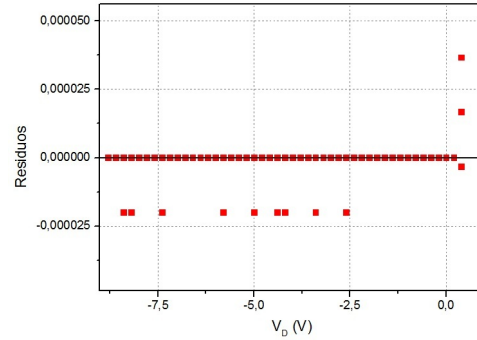


Figura 8: Gráfico de los residuos obtenidos por el ajuste con el model de Schottky.

El otro diodo estudiado fue el llamado diodo Zener, cuyas características en polarización directa son análogas a las del diodo Schottky, pero que en polarización inversa se comporta de manera distinta ($V < 0$).

Cuando el diodo está polarizado inversamente, una pequeña corriente circula por él, llamada corriente de saturación I_S , esta corriente permanece relativamente constante mientras se aumenta la tensión inversa hasta que el valor de ésta alcanza V_Z , llamada tensión Zener ($V_Z \approx -0,8 V$ en este caso), para la cual el diodo entra en la región de colapso, donde la

corriente empieza a incrementarse rápidamente.

Se observó que en esta región, pequeños cambios de tensión producían grandes cambios de corriente. Al realizar el ajuste, se vió que el modelo de Shockley ajustaba correctamente la zona donde el diodo se encuentra polarizado directamente; pero no donde el diodo Zener muestra su comportamiento particular, por lo tanto se buscó una leve modificación a dicho modelo [3] para tratar de aproximar dicha zona:

$$I = \begin{cases} I_S(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1) & \text{si } V_D \geq 0 \\ I_S(-e^{\frac{-V_D-V_Z}{nV_T}} + e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1) & \text{si } V_D \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

Nuevamente, se obtuvieron la intensidad que circulaba por el diodo y la caída de potencial del mismo por medio de las ecuaciones (2) y (3), solo que en este circuito la resistencia utilizada fue de 680Ω .

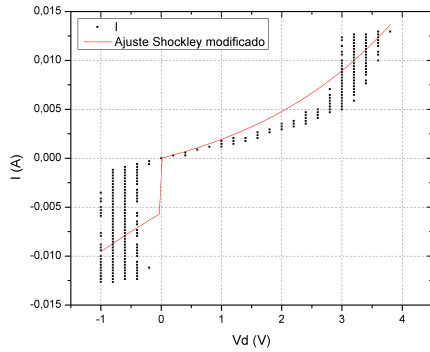


Figura 9: Gráfico de la intensidad circulante por el diodo Zener función de su caída de potencial.

Ajustando la curva obtenida con el modelo de Shockley modificado (los parámetros obtenidos se muestran en la Tabla 2), se observa que a medida que se va aumentando negativamente el voltaje aplicado al diodo, la corriente que pasa por él aumenta muy poco ($\sim 1,2 \text{ mA}$), pero una vez que se llega a un determinado voltaje, llamada voltaje o tensión de Zener (V_Z), el aumento del voltaje (siempre negativamente) es muy pequeño, pudiendo considerarse constante, como puede verse en la Figura 9 para los valores de $V < 0$.

En este caso, el valor de R^2 mejoro mucho con respecto al diodo Schottky, con lo cual gran parte de los datos son explicados correctamente por el modelo, además de que la cifra obtenida del F-valor indica que es improbable que el ajuste haya sido aleatorio. En este caso también cabe destacar que el modelo utilizado tuvo una gran complicación para ajustar los datos, debido a que este era muy sensible a los valores de V_D y V_Z en cuanto comenzaba el crecimiento exponencial.

Cuadro 2: Ajuste de Shockley modificado para el diodo Zener. Nuevamente, $nV_T = V_{Teff}$.

$I(V_D) = \text{Ecuación 4}$	
I_S	$411 * 10^{-5} \pm 6,53 * 10^{-5}$
V_{Teff}	$2,594 \pm 0,030$
R^2	0.905
F-valor	11871

En el gráfico de los residuos se observa que para valores entre V_u y V_Z , las desviaciones son negativas, y se llega a observar que en los valores en los extremos, tanto para los valores negativos y positivos de V , donde se observa el comportamiento exponencial del ajuste, los residuos aumentan (Figura 10).

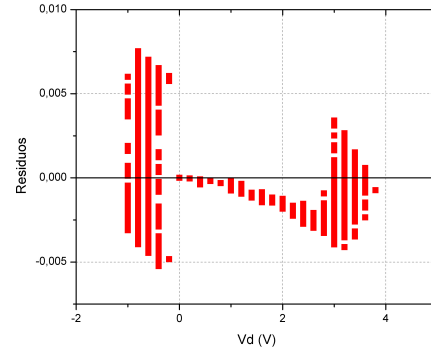


Figura 10: Gráfico de los residuos obtenidos por el ajuste con el modelo de Shockley modificado para el diodo Zener.

3.2 Rectificadores de onda completa y observación del Ripple

En esta segunda parte del experimento se realizó un análisis más bien cualitativo de un rectificador de onda completa y del fenómeno

del Ripple. Se armó entonces el puente de diodos (Figura 4) y se observó en el osciloscopio como variaba la caída de potencial en función del tiempo (Figura 11).

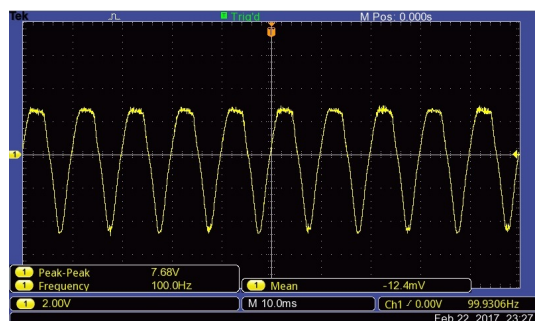


Figura 11: Rectificador de onda completa

En este caso el voltaje oscila, siendo siempre positivo, y la apariencia es similar al módulo de una sinusoidal. El voltaje pico a pico entregado por la fuente de corriente alterna es de $17,4 \pm 0,2$ V, mientras que la caída de potencial de la resistencia es de unos $7,68 \pm 0,06$ V. Este es menor a $8,7 \pm 0,1$ V (la mitad de lo entregado por la fuente), por lo que hay una leve atenuación de la corriente en el circuito. Por otro lado la frecuencia observada es de aproximadamente 100 Hz, que es justamente el doble a los 50 Hz entregados por la fuente de corriente alterna como se esperaba. Al invertir la corriente cuándo la caída de potencial es negativa, justamente se obtiene una función cuyo período es el doble del voltaje sinusoidal entregado por la fuente.

Al agregar un capacitor de en paralelo a la resistencia de carga, sobre la cuál se mide la caída de potencial, se produce el efecto de "ripple". El primer capacitor agregado es de 226 nF, en este caso el efecto observado es bastante tenue, siendo ahora la oscilación de $6,24 \pm 0,06$ V. En cambio al colocar un capacitor de $4.24 \mu\text{F}$, la oscilación se vió fuertemente disminuída, siendo de tan solo $1,28 \pm 0,06$ V. Por último con un capacitor de $62 \mu\text{F}$, la oscilación se hace casi imperceptible por el osciloscopio y esta se distorsiona considerablemente, siendo la oscilación de aproximadamente 218 mV. La Figura 12 muestra una imagen compuesta por todos los ripples observados y el caso del circuito sin ningún capacitor. Todas las imágenes preservan la escala temporal (10 ms por cada rectángulo) y sólo la última modifica la escala

de voltaje (cambiando de 2 V a 50 mV por cada rectángulo).

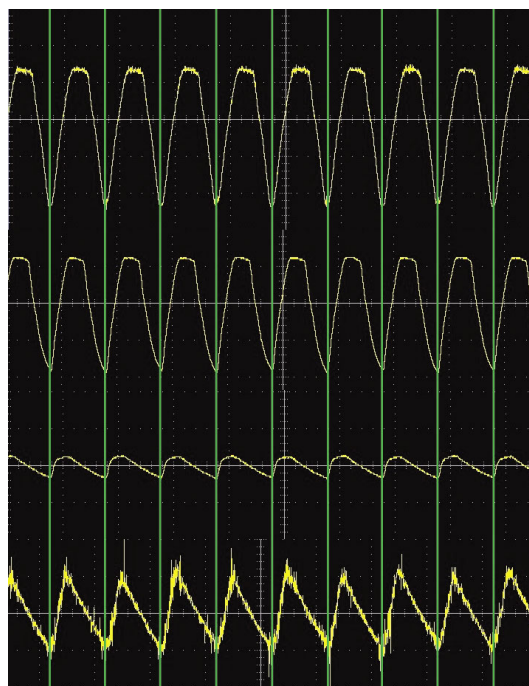


Figura 12: Comparación del efecto ripple según la capacidad colocada. De arriba hacia abajo, sin ningún capacitor, con un capacitor de 226 nF, uno de $4.24 \mu\text{F}$ y por último uno de $62 \mu\text{F}$.

Cabe destacar que al agregar mayor capacidad, más se reducen las oscilaciones del rectificador de onda completa original, asemejándose más a una corriente continua. Sin embargo, la frecuencia de las oscilaciones se mantiene igual, como se muestra en la Figura 12, dado por el hecho de que todos los mínimos coinciden.

4. Conclusiones

En nuestra primera experiencia, utilizando el modelo de Shockley y tomando como umbral la tensión mínima para la cual la corriente circulando por el circuito es de 1 mA, obtuvimos un V_u de aproximadamente 0,6 V, aunque el error del ajuste utilizando dicho modelo fue muy grande (R^2 de 0,5).

En segundo lugar, se utilizó un modelo de Shockley modificado y se tomó como $-0,8$ V la tensión de colapso del diodo. En este caso el error de ajuste fue menor, dando un R^2 en torno a 0,9.

Se verificó en un circuito de corriente alterna que el diodo no permite la circulación de corriente en los ciclos negativos de la fuente (rectificador de media onda), mientras que en un puente de diodos, la disposición es tal que sobre una resistencia de carga circula siempre en el mismo sentido (rectificador de onda entera).

Al agregar un capacitor en paralelo al rectificador de onda entera, se observa una disminución del cociente entre el voltaje pico a pico sobre la resistencia y el voltaje máximo entregado por la fuente alterna (ripple). Utilizando capacitores de diferentes capacidades a resistencia y frecuencia del generador constantes, puede verse que el ripple disminuye a medida que la capacidad aumenta, asemejándose la tensión sobre la resistencia cada vez más a una corriente continua. Esto se debe a que el tiempo característico de decaimiento de un sistema RC en paralelo es directamente proporcional a la capacidad del capacitor. A una resistencia, tensión de entrada y frecuencia fijas, un capacitor de 226 nF dará una oscilación de $6,24 \pm 0,06$ V sobre la resistencia (con una tensión máxima de $7,68 \pm 0,06$ V) mientras que con uno de 62 μ F tendremos una oscilación de 218 mV, muy inferior al voltaje máximo. A mayor capacidad, por lo tanto, mejor será el cociente de ripple obtenido y el efecto rectificador. Se pudo observar por último que la frecuencia del ripple observado, es independiente de la capacidad.

brero del 2017]. <http://www.camotruck.net/rollins/simulator.html>

5. Referencias

- [1] Robert L. Nashelsky, Boylestad Louis. 2009. Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos. México: Pearson educación. Capítulo 1: Diodos semiconductores, Capítulo 2: Aplicaciones del diodo.
- [2] Tektronix. Marzo del 2012. TBS1000B and TBS1000B-EDU Series, Digital Storage Oscilloscopes, User Manual. [accedido el 26 de Febrero del 2017] http://www.phys.uconn.edu/~eyler/phys3150/R/TBS1052B_User_Manual.pdf
- [3] J. Mike Rollins. Enero del 2008. Zener Diode Simulator. [accedido el 26 de Fe-