

Regulación basada en Diodo Zener

Barbosa E. Liliana M., Ocampo R. Angee L.

Resumen - Durante el desarrollo del presente preinforme, se procede a elaborar un análisis, mediante el uso de la herramienta de simulación Pspice y el material bibliográfico Dispositivos Electrónicos de Thomas Floyd, de un Regulador de voltaje basado en Diodo Zener, esto es posible por medio del uso de los diodos semiconductores 1N4736A y 1N4738A. Ello para afianzar conocimientos sobre el proceso de conversión de una señal AC a una DC en comparación con prácticas pasadas.

I. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal del presente documento consiste en realizar un profundo estudio, mediante cálculos teóricos y simulaciones, de un regulador de voltaje antes de proceder a su respectivo montaje en el laboratorio. Asimismo, la información proporcionada, sirve como base para determinar la importancia de estos componentes en el campo de la electrónica y la electricidad.

Marco teórico:

Con respecto al desarrollo de la presente práctica, se debe tener claro los siguientes conceptos relacionados con el funcionamiento del circuito a realizar, además, de considerar ciertas características de los diodos Zener:

- **Regulación de línea:** La regulación de línea indica qué tanto cambia la salida con respecto a la entrada (V_s), dado por el siguiente cociente:

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_s} = \frac{r_z}{R + r_z}$$

- **Regulación de carga:** indica la variación de la salida de acuerdo a cierto rango de intervalos de corriente en la carga (I_L), es expresado mediante la expresión:

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta I_L} = - \frac{R^* r_z}{R + r_z}$$

II. PROCEDIMIENTO

A. Análisis de la hoja de datos:

Con base en la hoja de datos proporcionada por la bibliografía, que indica características relevantes con respecto al funcionamiento del diodo Zener, se puede resaltar lo siguiente:

- De manera general, la disipación de potencia DC máxima de los diodos Zener es de 1W siempre y cuando la temperatura sea menor o igual a 50°C
- Cuando la temperatura supera los 50°C, la potencia disipada estará dada por la expresión que se aprecia a continuación:

$$P_{D(reducida)} = P_{D(MAX)} - 6.67 \frac{mW}{^\circ C} \Delta T$$

Donde el $6.67 \frac{mW}{^\circ C}$ hace referencia al factor de reducción nominal y el ΔT a la diferencia entre la

temperatura en la cual está operando el diodo, además, de que se toman los 50°C que es la base. Por esto, si se evalúa el comportamiento del diodo 1N4736A en las temperaturas de 70°C y 100°C se obtiene:

- 70°C

$$P_{D(reducida)} = P_{D(MAX)} - 6.67 \frac{mW}{^\circ C} (20) \rightarrow$$

$$P_{D(reducida)} = 866.66mW$$

- 100°C

$$P_{D(reducida)} = P_{D(MAX)} - 6.67 \frac{mW}{^\circ C} (50) \rightarrow$$

$$P_{D(reducida)} = 666.5mW$$

De lo anterior, se puede resaltar que a medida que va aumentando la temperatura, la potencia DC disipada es menor.

- Por otro lado, para determinar la corriente máxima que puede soportar el Zener, se utilizan datos como la potencia ($P = 1w$) y el voltaje máximo ($V_{max} = 8.2V$), estos valores son brindados por la hoja de datos, y se procede a hallar I_{zmax} del siguiente modo:

$$I_{zmax} = \frac{P}{V_{max}} = \frac{1w}{8.2V} = 121.9512mA$$

- Es importante resaltar que, los diodos Zener poseen una impedancia asociada ligada a la variación de corriente y voltaje en el circuito, puesto que la pendiente de la recta que modela el comportamiento del diodo en la región de ruptura estará dada por $\frac{1}{r_z}$, donde r_z es la resistencia asociada al diodo, por eso, a menor corriente, mayor será el valor de esta impedancia; lo anterior, puede ser ilustrado mediante la impedancia de la referencia 1N4740A, en este diodo al considerar su corriente máxima, este posee una impedancia asociada de 7Ω y cuando la corriente es la mínima, es decir, la corriente que se encuentra en la “región de rodilla” su impedancia corresponde a 700Ω.
- Ahora bien, para realizar el ejercicio de determinar el voltaje en las terminales del Zener es necesario usar el modelo del diodo Zener y los datos que pueden encontrarse en la hoja de datos del siguiente modo:

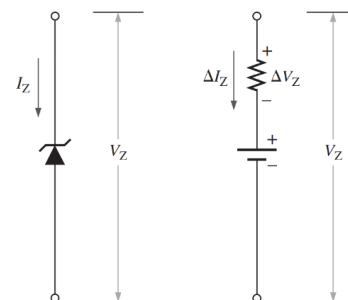


Fig. 1. Modelo del diodo Zener.

$$V_z = V_{zT} + \Delta V_z$$

Si se busca determinar el voltaje en las terminales cuando $I_z = 50mA$, teniendo en cuenta que

$$r_z = 15\Omega, V_z = 47V, I_z = 25mA:$$

$$\Delta I_z = 50mA - 25mA = 25mA$$

$$\Delta V_z = \Delta I_z r_z = (25mA) * (15\Omega) = 375mv$$

$$V_z = 47v + 375mv = 47.375mv$$

Los datos obtenidos se extrajeron de la hoja de datos dada por la sección *Información en una hoja de datos de un diodo Zener* del libro Floyd Thomas L. (2008) Dispositivos Electrónicos.

B. Análisis del circuito y cálculos teóricos:

Tras realizar un profundo estudio de los circuitos que se ve en la figura mostrada a continuación, se puede observar que se trata de dos reguladores de voltaje colocados en un circuito impreso, como se ve en la siguiente figura:

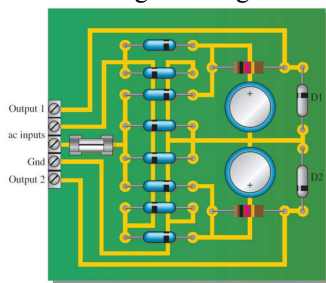


Fig. 2. Reguladores de voltaje.

Partiendo del circuito expuesto en la figura y realizando el esquemático de uno de ellos se obtiene el diagrama mostrado a continuación:

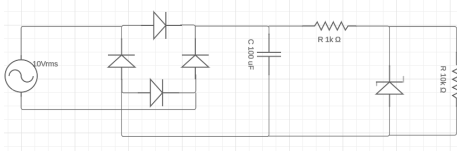


Fig. 3. Esquemático con el circuito equivalente.

Este circuito se compone de tres etapas, la primera de ellas es la rectificación compuesta por un puente de diodos, la segunda es la etapa del filtro pasa-bajas que lleva la señal a una aproximación DC y la última de ellas es la regulación con el diodo Zener.

- **Primera etapa: Rectificación con el puente de diodos**

Esta etapa consiste en que la señal sinusoidal que sale del transformador, ingresa al puente compuesto por 4 diodos, que permite aprovechar tanto la parte negativa como positiva de la entrada, produciendo una señal DC constante; las fluctuaciones generadas en la salida poseerán la mitad del periodo de la señal de entrada, y como consecuencia, se observa un aumento en la frecuencia.

- **Segunda etapa: Filtro pasa-bajas**

En este punto ingresa la señal rectificada por el puente de la etapa anterior, y se genera una aproximación DC que posee un pequeño rizo producido por el comportamiento del capacitor; la magnitud del rizo generado guarda una relación de proporcionalidad inversa con el valor de la capacitancia.

- **Tercera etapa: Regulación con diodo Zener**

Aquí, debido a las características de operación del diodo Zener en la región de ruptura, posibilita obtener a la salida un voltaje casi constante, ya que en esta región, el diodo, al pasar por cambios bruscos de corriente, produce una variación muy pequeña en el voltaje, reflejándose en la diferencia de potencial medida en la resistencia de carga, que está conectada en paralelo con el diodo.

A continuación se desarrollan los cálculos realizados para determinar el comportamiento del circuito en cada una de sus etapas. En primer lugar, se da la rectificación positiva debido al puente de diodos, el punto máximo de la salida estará dado por la siguiente expresión:

$$V_{MAX} = V_{IN} - 2V_D = 10\sqrt{2} - 2 * 0.7$$

$$V_{MAX} = 12.74V$$

Seguidamente, en la segunda etapa se genera la aproximación DC debido a la carga y descarga del capacitor, esta salida es definida como voltaje de rizado y está modelada por la siguiente fórmula:

$$V_r = \frac{V_{MAX}}{fRC} = \frac{12.74}{120 * 1k * 100\mu}$$

$$V_r = 1.1785v$$

El punto máximo de esta señal está dado por V_{MAX} y el voltaje mínimo, será la diferencia entre el voltaje máximo (V_{MAX}) y el voltaje de rizado (V_r), por tanto, este cálculo se hace con el propósito de mostrar que a pesar de ser una aproximación DC, esta salida aún tiene fluctuaciones.

Por lo anterior, es necesaria una etapa de regulación de la señal con el diodo Zener, este diodo funciona en la región de ruptura y es útil para mantener el voltaje lo más constante posible, puesto que ante grandes variaciones de corriente el diodo Zener presenta mínimas variaciones de voltaje; es importante resaltar que, la salida de este diodo depende directamente de la calidad del filtro colocado en la segunda etapa; sin embargo, debe tenerse en cuenta que la corriente debe ser la suficiente para que el diodo se encuentre en esa región de ruptura y funcione como Zener. Para determinar los valores de los elementos que permiten el correcto comportamiento de esta etapa se usa el modelo de la figura mostrada a continuación:

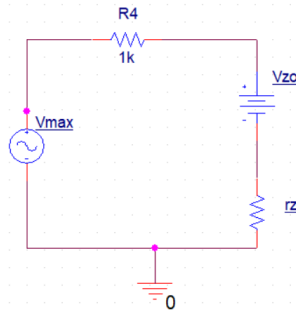


Fig. 4. Esquemático con el circuito equivalente sin la carga y con el modelo del Zener.

Esta manera de representar el diodo Zener en su región de ruptura surge de una aproximación que se realiza para modelar su comportamiento, esta aproximación se hace más exacta a medida que el diodo se aleja de la región de rodilla gracias a que la conducta del diodo se hace más cercana a una línea recta.

Teniendo en cuenta lo anterior, se busca determinar el voltaje V_{ZO} con el propósito de establecer la diferencia de potencial y corriente que pasa por el diodo Zener, como se expresó anteriormente, debido al modelo de línea recta, el cual se aproxima a la conducta del Zener, se llega a la siguiente fórmula:

$$V_{ZO} = V_Z - r_z * I_z$$

Ahora, tomando los valores de voltaje y corriente de prueba dados en la hoja de datos para el diodo con la referencia 1N4736A:

$$V_{ZO} = 6.8 - 3.5 * 37m$$

$$V_{ZO} = 6.671V$$

Debido a que primero se realiza el análisis sin la resistencia de carga, se determina el voltaje que pasa por el diodo de esta forma:

$$V_{ZMax} = \frac{R}{R+r_z} V_{zo} + \frac{r_z}{R+r_z} V_{smax} \rightarrow$$

$$V_{ZMax} = \frac{1k}{1k+3.5} (6.671v) + \frac{3.5}{1k+3.5} (12.74v) \rightarrow$$

$$V_{ZMax} = 6.6922V$$

Seguidamente, se procede a calcular la corriente máxima que pasa por el diodo Zener mediante la resistencia asociada a este, y que se encuentra en serie a la fuente dada por el arquetipo:

$$I_{max} = 6.048mA$$

Una vez determinado el voltaje que pasa por el diodo se coloca nuevamente la resistencia de carga con el fin de establecer la diferencia de potencial que existe entre sus terminales, como se ve a continuación:

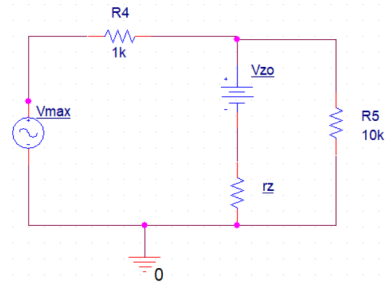


Fig. 5. Esquemático con el circuito equivalente con la carga y con el modelo del Zener.

Ahora, es utilizado el principio de superposición para determinar V_o . Se comienza por apagar la fuente V_{ZO} , como consecuencia se tiene el siguiente circuito:

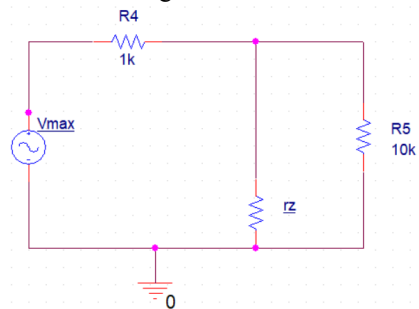


Fig. 6. Esquemático con el circuito equivalente con la carga y cortocircuitando V_{ZO} .

Se identifica el paralelo entre la resistencia de carga y la resistencia asociada al diodo, y posteriormente se aplica un divisor de tensión para determinar V_{o1} que es el voltaje ligado a la carga sin la fuente V_{ZO} :

$$R_l || r_z = 3.4988\Omega$$

$$V_{o1} = \frac{R_l || r_z}{R_l || r_z + R} V_{MAX}$$

De nuevo, al cortocircuitar la fuente V_{MAX} , se reconoce, en la figura mostrada a continuación, el paralelo entre R y la resistencia de carga, y nuevamente se aplica un divisor de voltaje V_{o2} , que es el voltaje ligado a la carga sin la fuente

V_{MAX} :

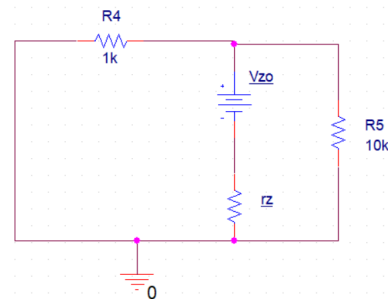


Fig. 7. Esquemático con el circuito equivalente con la carga y cortocircuitando V_{MAX} .

$$R_l || R = 909.099\Omega$$

$$V_{o2} = \frac{R_L || R}{R_L || R + r_z} V_{ZO}$$

Luego, se realiza la sumatoria entre los dos voltajes hallados llegando a la siguiente expresión:

$$V_o = V_{o1} + V_{o2} = \frac{R_L || r_z}{R_L || r_z + R} V_{MAX} + \frac{R_L || R}{R_L || R + r_z} V_{ZO}$$

$$V_o = \frac{3.4988}{3.4988 + 1k} (12.74v) + \frac{909.99}{909.99 + 3.5} (6.671)$$

$$V_o = 6.6899v$$

Una vez conocido este voltaje, se sigue con determinar cuáles son las corrientes que pasan por la resistencia de carga y el diodo Zener, así:

$$I_o = \frac{V_o}{R_L} = \frac{6.6899}{1k} = 0.66899mA$$

$$I_z = \frac{V_o - V_{ZO}}{r_z} = \frac{6.6899 - 6.671}{3.5} = 5.4mA$$

Consecutivamente, se procede a calcular la corriente total del circuito sumando las dos corrientes halladas en pasos anteriores:

$$I_T = I_o + I_z = 0.66899mA + 5.4mA$$

$$I_T = 6.06899mA$$

Nuevamente, realizando el mismo análisis para el otro lado del circuito que usa el diodo Zener de referencia 1N4738A se llegan a los valores que se aprecian a continuación:

- Sin la resistencia de carga:

$$V_{ZO} = 8.061V$$

$$V_{ZMax} = 8.08196V$$

$$I_{max} = 4.658mA$$

- Con la resistencia de carga:

$$V_o = 8.08196V$$

$$I_o = 0.80784mA$$

$$I_z = 3.8626mA$$

$$I_T = 4.7252mA$$

Con el fin de establecer la eficiencia y desempeño de los reguladores que son objeto de análisis en la presente práctica, se utiliza la regulación de línea para establecer la capacidad que posee este para mantener el voltaje de salida con respecto a la variación del voltaje de alimentación, de la siguiente manera:

- Para el diodo de referencia 1N4736A:

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_s} = \frac{3.5}{1k + 3.5} = 0.00348$$

- Para el diodo de referencia 1N4738A:

$$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_s} = \frac{4.5}{1k + 4.5} = 0.00448$$

	1N4736A	1N4738A
V_{ZO}	6.671V	8.061V

V_{ZMax}	6.6922V	8.08196V
I_{max}	6.048mA	4.658mA
V_o	6.6899v	8.08196V
I_o	0.66899mA	0.80784mA
I_z	5.4mA	3.8626mA
I_T	6.06899mA	4.7252mA
$\frac{\Delta V_o}{\Delta V_s}$	0.00348	0.00448

Tabla 1. Voltajes y corrientes del circuito con los diodos 1N4736A y 1N4738A

C. Simulación:

Ahora, se procede a la simulación de los circuitos planteados a través del programa Pspice con el fin de comprobar los cálculos realizados.

En un comienzo se simula el primer circuito que tiene el diodo de referencia 1N4736A sin la resistencia de carga para verificar el voltaje en el Zener:

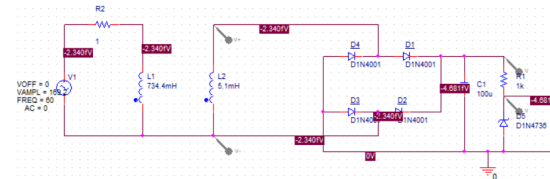


Fig. 8. Montaje en Pspice del circuito equivalente con la referencia 1N4736A.

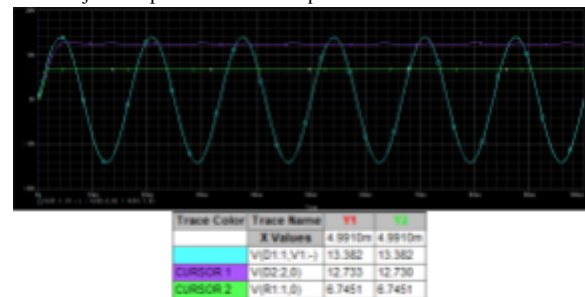


Fig. 9. Gráfica de las señales y voltajes de cada una de las tres etapas del circuito con el diodo de referencia 1N4736A.

De la figura anterior se procede a calcular los porcentajes de error con respecto a los cálculos teóricos:

$$\%Error_{V_{ZMax}} = \frac{|6.7451V - 6.6922V|}{6.6922V} * 100\% = 0.7905\%$$

$$\%Error_{V_{DC}} = \frac{|12.733V - 12.74V|}{12.74V} * 100\% = 0.055\%$$

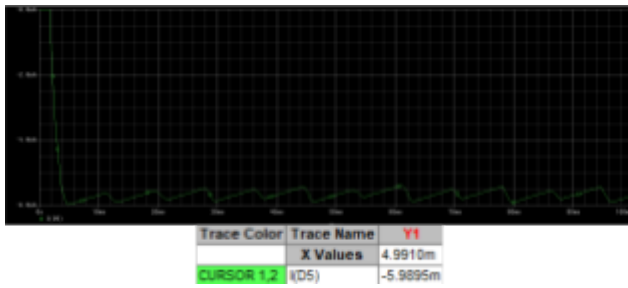


Fig. 10. Corriente que pasa por el diodo sin la carga.

Ahora, calculando el porcentaje de error se tiene:

$$\%Error_{I_{max}} = \frac{|5.9895mA - 6.048mA|}{|6.048mA|} * 100\% = 0.9673\%$$

Posteriormente, se procede a simular el mismo circuito, pero colocando en paralelo la resistencia de carga de la siguiente forma:

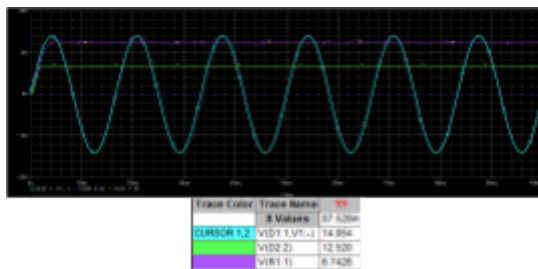
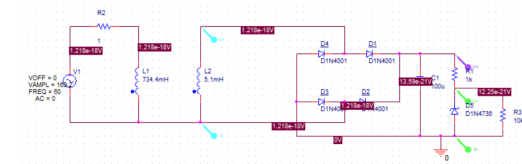


Fig. 11. Gráfica de las señales y voltajes de cada una de las tres etapas del circuito con la carga.

A continuación, se calculan los porcentajes de error de las simulaciones con respecto a los cálculos elaborados:

$$\%Error_{V_o} = \frac{|6.7426V - 6.6899V|}{|6.6899V|} * 100\% = 0.7878\%$$



Fig. 12. Corriente que pasan por el diodo, la resistencia de carga y la total. Del mismo modo, se cuantifica el error en las corrientes que pasan por la resistencia de carga, por el diodo de zener y la total que corresponde a la suma de ambas, con respecto a las corrientes halladas anteriormente:

$$\%Error_{I_o} = \frac{|674.31uA - 668.99uA|}{|668.99uA|} * 100\% = 0.7952\%$$

$$\%Error_{I_z} = \frac{|5.2859mA - 5.4mA|}{|5.4mA|} * 100\% = 2.113\%$$

$$\%Error_{I_z} = \frac{|5.9602mA - 6.06899mA|}{|6.06899mA|} * 100\% = 1.793\%$$

Es importante resaltar que, la diferencia en el signo corresponde a que en los cálculos teóricos ya se asume que el diodo está trabajando en la región de polarización inversa o región de ruptura, por lo que se toma positivo con el fin de facilitar el proceso. Nuevamente, se simula el circuito con una variación en la referencia del diodo Zener, en este montaje ya no se usa el 1N4736A sino el 1N4738A; al igual que en las simulaciones anteriores, en un comienzo se efectúa sin la resistencia y luego esta se incorpora para evaluar la conducta del circuito:

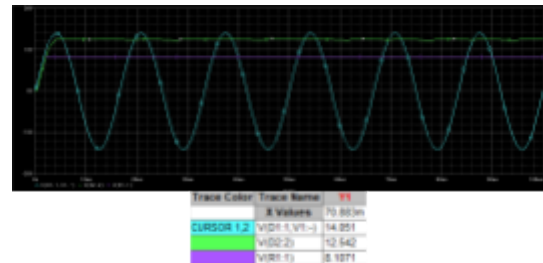


Fig. 13. Gráfica de las señales y voltajes de cada una de las tres etapas del circuito con el diodo de referencia 1N4738A.

De igual forma se evalúa los porcentajes de error para efectuar la comparación entre lo calculado y los valores entregados por la simulación del siguiente modo:

$$\%Error_{V_{ZMax}} = \frac{|8.1071V - 8.08196V|}{|8.08196V|} * 100\% = 0.3098\%$$

$$\%Error_{V_{DC}} = \frac{|12.542 - 12.74V|}{|12.74V|} * 100\% = 1.55\%$$

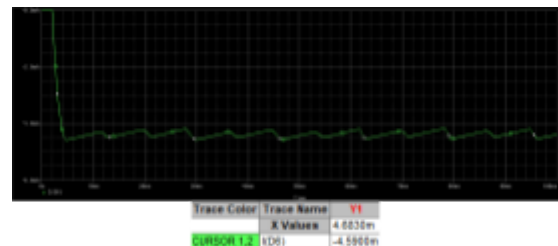


Fig. 14. Corriente que pasa por el diodo sin la carga.

$$\%Error_{I_{max}} = \frac{|4.59mA - 4.658mA|}{|4.658mA|} * 100\% = 1.4599\%$$

Agregando de nuevo la resistencia de carga:

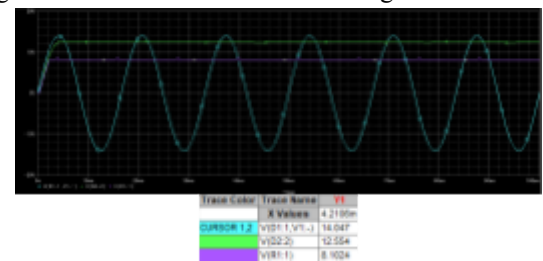


Fig. 15. Gráfica de las señales y voltajes de cada una de las tres etapas del circuito con la carga.

$$\%Error_{V_o} = \frac{|8.1024V - 8.0784V|}{|8.0784V|} * 100\% = 0.2971\%$$



Fig. 16. Corriente que pasan por el diodo, la resistencia de carga y la total. Igualmente, se vuelve a cuantificar el error en las corrientes que pasan por la resistencia de carga, por el diodo de zener y la total que corresponde a la suma de ambas, con respecto a las corrientes halladas anteriormente:

$$\%Error_{I_o} = \frac{|810.322\mu A - 807.84\mu A|}{|807.84\mu A|} * 100\% = 0.3072\%$$

$$\%Error_{I_z} = \frac{|3.7747mA - 3.8626mA|}{|3.8626mA|} * 100\% = 2.2757\%$$

$$\%Error_{I_z} = \frac{|4.5850mA - 4.7252mA|}{|4.7252mA|} * 100\% = 2.9671\%$$

III. CONCLUSIONES

Se pudo observar durante el desarrollo de esta práctica la importancia del comportamiento del diodo Zener en su región de ruptura, debido a que entrega pequeñas variaciones de voltaje ante grandes fluctuaciones en la corriente, lo anterior permite regular las señales de entrada ingresadas para mantenerlas constantes siendo una fuente para diversas aplicaciones en la vida cotidiana.

Por otro lado, es importante resaltar que, la salida del regulador depende directamente de la calidad del filtro colocado en la segunda etapa, puesto que entre menor sea esa variación, más constante será esa salida; sin embargo, también se debe tener en cuenta la corriente mínima que requiere el diodo para poder funcionar en su región de ruptura, puesto que si esta no es la suficiente, el elemento no cumplirá ninguna función en el circuito, ya que se encontrará apagado.

Para terminar, se pudo apreciar la importancia de trabajar con modelos y aproximaciones en el momento de hacer los cálculos, además, con base en los porcentajes de error calculados que fueron muy bajos, es posible afirmar que, dichos arquetipos resultaron siendo muy aproximados.

REFERENCIAS

- [1] P. A. Gustavo. "Regulación de voltaje: Regulador con circuito integrado" . [video-YouTube]. Marzo 24, 2021. Disponible: [\(520\) Regulación de voltaje: Regulador con circuito integrado - YouTube](#)
- [2] P. A. Gustavo. "Regulación de voltaje: Regulador con circuito integrado Diseño de una fuente de voltaje DC, regulada mediante diodo Zener" . [video-YouTube]. Marzo 23, 2021. Disponible: [\(553\) Diseño de una fuente de voltaje DC, regulada mediante diodo Zener - YouTube](#)
- [3] Floyd Thomas L. (2008) Dispositivos Electrónicos. Editorial Limusa, Prentice Hall.