

SIMULACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE UN CIRCUITO EMULADOR DE UN MEMRISTOR

SIMULATION AND CONSTRUCTION OF A MEMRISTOR EMULATOR CIRCUIT

Luis Manuel López Jiménez

Universidad Autónoma "Benito Juárez" de Oaxaca, México
lslopez.alu@uabjo.mx

Alfonso Naimad Lima Villegas

Tecnológico Nacional de México / IT de Puebla, México
i21221176.07@puebla.tecnm.mx

Alejandro Díaz Sánchez

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, México
adiazsan@inaoep.mx

Recepción: 7/noviembre/2024

Aceptación: 27/diciembre/2024

Resumen

Desde su descubrimiento hace 50 años y su realización física en el año 2008 en los laboratorios de HP, el memristor, conocido como el cuarto elemento de la electrónica, ha llegado a ser parte fundamental en el estudio de esta.

Llegando a pronosticarse un aumento de sus aplicaciones en la electrónica comercial, dada su capacidad de volver más eficientes los sistemas electrónicos al reemplazar con un solo memristor el funcionamiento de diez transistores.

Con la capacidad de memorizar la corriente y su dirección que pasa por él, modificando en consecuencia la resistencia que ofrece, y, de esta manera funcionar como una resistencia con capacidad de memoria.

El trabajo tiene como objetivo presentar un circuito que es capaz de emular el funcionamiento de un memristor, construido con piezas electrónicas comerciales y fácilmente replicable para su análisis, con la finalidad de facilitar el diseño de circuitos basados en memristores, y así predecir su comportamiento ante cambios en la corriente, frecuencia y amplitud que lo atraviesan. Se presentará el proceso por el cual se llevó a cabo la investigación realizada, primeramente, en su estado simulado, para posteriormente pasar a una construcción física, obtención y

comparación de resultados, buscando de esta manera una fácil replicación del experimento.

Los resultados experimentales demuestran que el circuito presentado muestra el comportamiento esperado, tanto en la simulación como en un estado de construcción física, al mismo tiempo que presenta una facilidad para el reemplazo y modificación de componentes debido a su construcción con piezas electrónicas comerciales.

Palabras Clave: Corriente, Electrónica, Memristor.

Abstract

Since its discovery 50 years ago and its physical realization in 2008 in the laboratories of Hewlett Packard, the memristor, already known as the fourth element of electronics, has become a fundamental part of the study of electronics.

Despite their few current applications, an increase in commercial electronics applications is predicted, given their ability to make electronic systems more efficient by replacing the operation of ten transistors with a single memristor. In addition, it can memorize the current and the direction that passes through it, modify its resistance, and function as a resistor with memory capacity.

This work aims to present a circuit that can emulate the operation of a memristor. The circuit is built with commercial electronic parts and is easily replicable for analysis. This will facilitate the design of circuits based on memristors and thus predict their behavior to changes in the current, frequency, and amplitude that pass through them.

This article will present the process by which the conducted research was carried out, first in a simulated state and later transitioning to a physical construction, obtaining and comparing results, thereby seeking an easy replication of the experiment. The experimental results demonstrate that the presented circuit shows the expected behavior, both in simulation and in physical construction, while also allowing for easy replacement and modification of components due to its construction with commercial electronic parts.

Keywords: Current, Electronics, Memristor.

1. Introducción

El memristor es un dispositivo descubierto hace 50 años para el cual se pronostica un desarrollo enorme dentro del campo de la electrónica [Cruz, 2020]. Desde un principio, la teoría de circuitos ha girado en torno al estudio de tres elementos básicos: resistencia, capacitor e inductor [Biolek, 2009]. Sin embargo, en el año 1971 se publicó un artículo científico en la IEEE titulado “The Missing Circuit Element” [Chua, 1971], [Moya, 2019], [Biolek, 2009], en el cual desarrolla las ecuaciones que sugieren la existencia de un cuarto elemento pasivo que conforma a los circuitos eléctricos [Moya, 2019]. Un memristor es técnicamente un resistor que cambia su resistencia dependiendo de la magnitud y sentido de la corriente que pasa a través de él, logrando la propiedad de conservar esa resistencia aun cuando el flujo de corriente se interrumpe por completo [Moya, 2019]. Debido a esta propiedad, un circuito compuesto por memristores y otro por transistores puede ser más eficiente que un circuito que emplea solo transistores. Teóricamente, se puede reemplazar 10 transistores con tan solo 1 memristor [Lara, 2010].

El memristor, calificado como el cuarto componente fundamental de la electrónica [Moya, 2019], [Lara, 2010], [García, 2021], fue realizado por primera vez en estado sólido en el año 2008 en los laboratorios de Hewlett Packard (HP) [Bo, 2011], [Lara, 2010]. Sin embargo, debido a su reciente descubrimiento y elaboración, no existen memristores comerciales con las características específicas para ciertas aplicaciones, se tiene que hacer uso de las emulaciones, es decir, utilizar dispositivos comerciales para presentar propiedades similares, lo que permite la investigación y el desarrollo de aplicaciones potenciales [Torres 2016].

En 2010 Muthuswamy propuso un circuito autónomo con solo tres elementos en serie: un inductor lineal pasivo, un capacitor lineal pasivo y un memristor emulado con componentes activos, al tener tan pocos elementos, se le conoce como el circuito caótico más simple [Muthuswamy, 2010].

Pershin y Di Ventra presentaron un emulador conformado por un microcontrolador, un convertidor analogico-digital y un potenciómetro digital, en ADC convierte la señal analógica a digital y dicha señal es procesada por el microcontrolador para ajustar el potenciómetro digital al valor de resistencia requerido [Pershin, 2010].

En 2011 Valsa desarrolló un circuito que modela un memristor conformado por un transistor JFET que provee la conductancia controlada por voltaje y un integrador basado en amplificadores operacionales para obtener un Voltaje que representa el flujo magnético que se utiliza para la conductancia. [Valsa, 2011].

La emulación recoge las características trascendentales de los memristores, es posible realizar la emulación memristiva tanto en simulación como la implementación preservando los fenómenos eléctricos asociados [Torres, 2016].

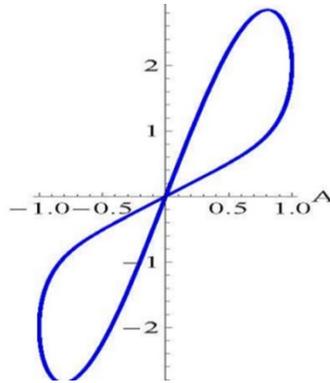
[Duan, 2012] propone un esquema para crear memorias RAM resistivas basadas en memristores (MRRAM por sus siglas en inglés) aprovechando que la resistencia de los estados internos del memristor varía dinámicamente y depende del historial de excitación y de donde dicho esquema representa una memoria binaria que es compatible con los sistemas computacionales actuales.

Mientras que [Chiu, 2012] presenta una aplicación específica en dispositivos móviles con la integración de distintos tipos de memoria tanto volátil como memristiva no volátil.

En este trabajo se presenta un circuito que busca emular, mediante componentes comerciales, el comportamiento de un memristor. El circuito utiliza amplificadores operacionales, resistencias, capacitores y multiplicadores para que, al pasar corriente por medio de este, nos muestre un comportamiento similar al que se esperaría de un memristor.

2. Métodos

En el caso del memristor, éste cuenta con tres características únicas. La primera de ellas es que su ciclo de histéresis tiene forma de un moño, como se muestra en la Figura 1, y su punto de inicio es el origen como primera referencia de observación, esto independientemente de la frecuencia o amplitud que se aplica. La segunda característica importante es que el lazo de histéresis irá modificando su área conforme cambie la frecuencia. Por último, la tercera de ellas es que conforme se degenera el lazo de histéresis, este se convertirá en una línea recta cuya pendiente dependerá de la amplitud y señal de entrada, hasta que su comportamiento llegue a ser lineal como en el caso de una resistencia.



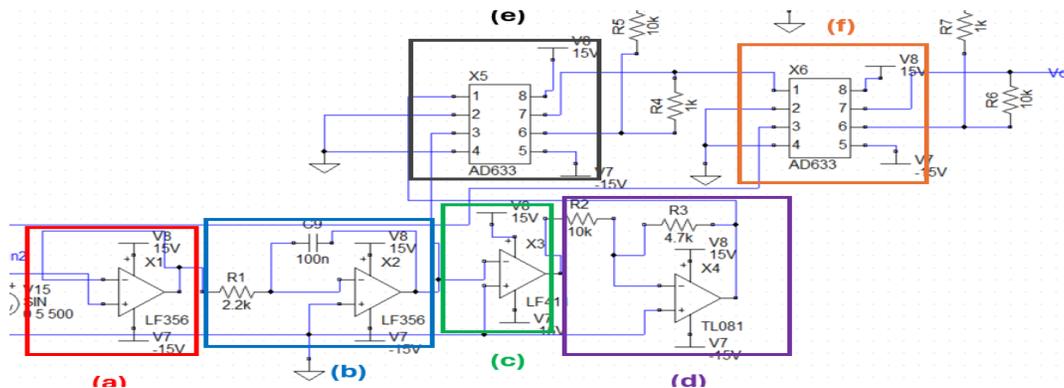
Fuente: [García, 2021]

Figura 1 Ciclo de histéresis característico del memristor.

A fin de contar con un módulo que cumpliera con las características ya descritas, se diseñó y simuló un circuito para emular el comportamiento característico de un memristor, mediante componentes electrónicos comerciales, esto mismo utilizando el programa TopSPICE. Para este fin, se utilizaron los amplificadores operacionales *LF356*, *LF411* y *TL081*, resistencias de diversos valores, capacitores y multiplicadores *AD633*.

El circuito propuesto para emular el comportamiento del memristor se muestra en la Figura 2, en el cual se puede observar que el amplificador operacional *X1* ha sido utilizado como seguidor de voltaje para evitar efectos de carga. El voltaje de salida de la sección (a) de la Figura 2 está dada por la Ecuación 1. Donde V_{out} es el voltaje de salida y V_{in} el de entrada del OPAMP

$$V_{out} = V_{in} \tag{1}$$



Fuente: elaboración propia

Figura 2 circuito emulador de un memristor simulado en computadora.

En la sección (b) de la Figura 2, el amplificador operacional X2 realiza la función de un integrador con voltaje de salida dado por la Ecuación 2.

$$V_{out} = -\left(\frac{1}{RC}\right)V_{in} \quad (2)$$

Donde:

R = valor de la resistencia que va a la entrada –.

C = valor del capacitor utilizado

V_{out} = voltaje de salida.

V_{in} = voltaje de entrada.

El amplificador X3, en la sección (b) de la Figura 2, funciona como un comparador de voltaje cuya salida está dada por la Ecuación 3.

$$V_{out} = V_s + V_1 > V_2 \ \& \ V_s - V_1 < V_2 \quad (3)$$

Donde:

$V_s +$ = Voltaje positivo.

$V_1 +$ = Voltaje de la entrada +.

$V_1 -$ = Voltaje de la entrada -.

$V_s -$ = Voltaje negativo.

El amplificador X4 en la sección (d) de la Figura 2, realiza la función de un amplificador inversor, cuyo voltaje de salida está dado por la Ecuación 4.

$$V_{out} = -V_{in} \frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

Donde:

R_1 = Valor de la resistencia a la entrada –.

R_2 = valor de la resistencia que va de R_1 a la salida.

Para controlar la ganancia de los multiplicadores AD633 se utilizaron resistencias de 10 y 1 $k\Omega$, buscando obtener una ganancia cercana a 1 en X5, el cual se muestra en la sección (e) de la Figura 2 y 0.1 en X6 en la sección (f) de la misma figura, de acuerdo con la Ecuación 5.

$$Ganancia = \frac{R_f}{R_f + R_1} \quad (5)$$

Donde:

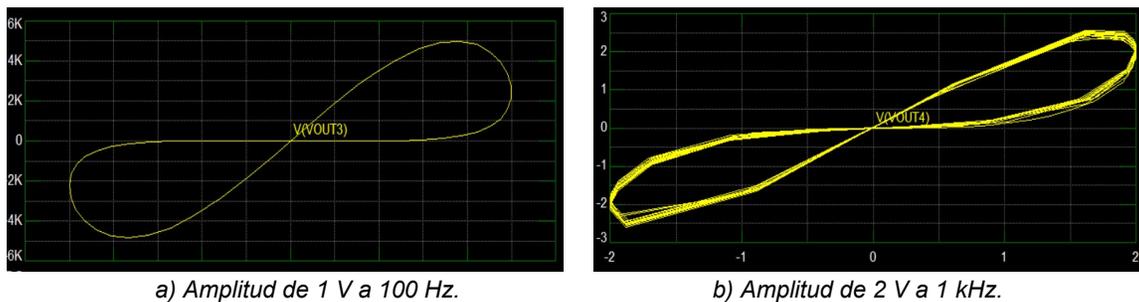
R_f = Valor de la resistencia a tierra

R_1 = Valor de la resistencia V_{out}

En X5 se conectó al pin 1 la salida del amplificador inversor y al pin 3 el integrador. Al multiplicador X6 se le conecto la salida del multiplicador X5 y la entrada de voltaje (V_{in2}), la salida de este mismo es la salida del circuito, es decir de donde se obtiene la medición de salida V_{out2} .

Para corroborar el funcionamiento del circuito, observó una gráfica en la cual se compara voltaje contra corriente buscando que presente el lazo característico, y de esta manera tomar como punto de partida la relación que existe entre carga eléctrica-flujo magnético.

En la implementación del circuito emulador de un memristor, se utilizó un voltaje de operación de +12 V en los amplificadores operacionales y multiplicadores; para la simulación se utilizó una entrada periódica con una amplitud entre 1 V a 100 Hz, mostrada en la Figura 3a, y hasta un máximo de 2 V a 1 kHz, Figura 3b.

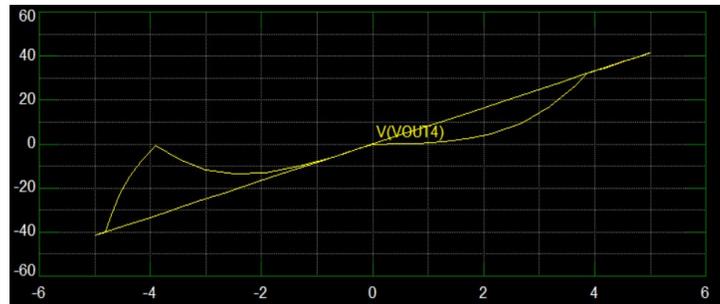


Fuente: elaboración propia

Figura 3 Ciclo de histéresis obtenido.

Esta simulación permite verificar que el ciclo de histéresis del circuito cumple con las características necesarias. Se realizó una última prueba aumentando la amplitud, para observar su comportamiento y poner a prueba su segunda característica única, la cual se presenta al aumentar la frecuencia. Conforme la

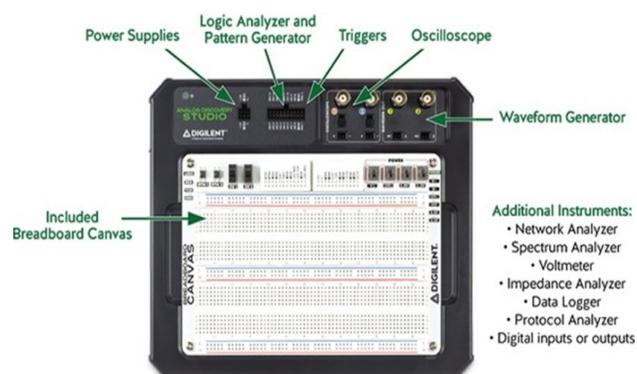
frecuencia de la entrada aumentaba, el lazo tendía más a semejarse a una línea recta, como se muestra en la Figura 4, como se esperaba que ocurriera de acuerdo a una de sus características antes mencionadas. De esta manera se comprobó el correcto funcionamiento del circuito en la simulación y nos preparamos para la construcción de este en su forma física.



Fuente: elaboración propia

Figura 4 Ciclo de histéresis con amplitud de 5 kHz a 1 V.

El circuito experimental, se realizó utilizando el laboratorio de circuitos portable Analog Discovery Studio de la marca Digilent en el cual se puede observar en la Figura 5, el cual cuenta con una interfaz para el uso de instrumentos de prueba y medición virtuales. Dicho dispositivo se conecta a la computadora por medio del programa WaveForms, disponible para su descarga en la plataforma en línea del dispositivo, esto para mostrar variables como el voltaje y la corriente presentes en el circuito en tiempo real, así como para modificar la señal enviada a través del circuito por medio de este mismo.



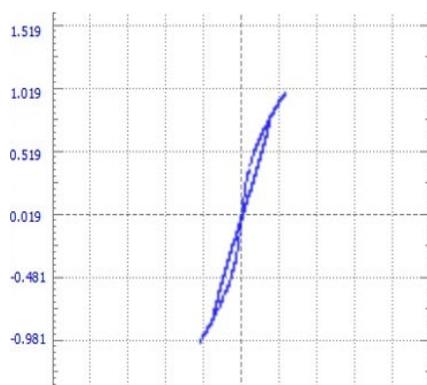
Fuente: Suconel S.A.

Figura 5 Analog Discovery Studio Digilent 410384.

El emulador fue construido físicamente utilizando las piezas electrónicas necesarias, alimentado los amplificadores y multiplicadores con un voltaje de +12 V. Una vez ensamblado se puso a prueba, esto mediante una entrada periódica, de onda senoidal y cuadrada, utilizando las funciones disponibles en WaveForms y con las cuales fue posible el modificar continuamente la entrada, aumentando y disminuyendo continuamente la amplitud y frecuencia, con el fin de observar de qué manera cambia el resultado obtenido de nuestro circuito.

Al observar la gráfica obtenida, se observa el ciclo de histéresis característico del memristor en distintas amplitudes, y pudimos corroborar el correcto funcionamiento del circuito.

En la Figura 6a se realizó la prueba con una amplitud de 1 V a 100 Hz, logrando como resultado su forma característica esperada. La frecuencia fue aumentada a 5 kHz, esperando ver cómo dicho lazo tiende a una línea recta con el aumento de la frecuencia, como se muestra en la Figura 6b, comprobando de esta manera una de las huellas de identidad propias del memristor.



a) Amplitud de 1 V a 100 Hz.



b) Amplitud de 1 V a 5 KHz.

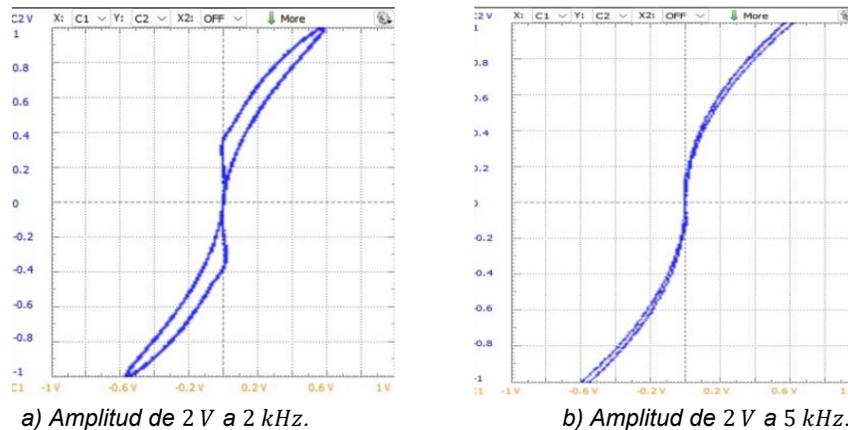
Fuente: elaboración propia

Figura 6 Ciclo de histéresis obtenido.

El siguiente paso del experimento fue buscar el límite aceptado por el circuito antes de una deformación en la forma del lazo por lo que aumentamos ambas características, es decir frecuencia y amplitud para medir el rango de funcionamiento del circuito. De esta forma se pudo observar a mejor detalle de qué manera cambia el gráfico obtenido al aumento de una o ambas características,

llegando a medir una forma similar al moño en amplitudes como 2 KHz a 2 V Figura 7a hasta una amplitud de 2 V a 5 kHz Figura 7b donde tiende cada vez más a la línea recta.

Los resultados obtenidos por medio de la gráfica cumplían con el comportamiento esperado de un memristor, por lo que el circuito emulador funcionaba correctamente en su realización física.



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Ciclo de histéresis obtenido.

3. Resultados

Por medio del análisis de ambos circuitos (simulado y físico), fue posible observar los rangos entre los cuales era posible al circuito emulador presentar un comportamiento memristivo ya sea en su amplitud o bien en su frecuencia, esto mediante prueba en distintas medidas de ambos parámetros.

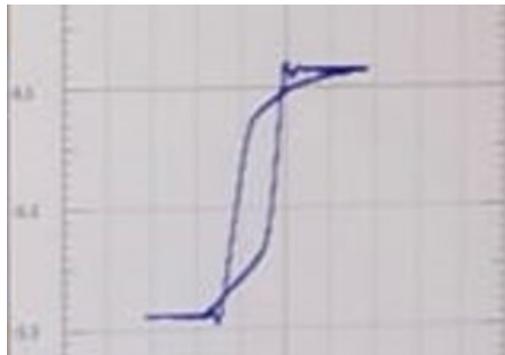
Se pudo comprobar también que al aumentar la frecuencia el ciclo de histéresis tendía a una línea recta, esto sin perder el origen como punto de partida, así como aumentar al mismo tiempo la amplitud, permitía que el ciclo característico apareciera a mayor frecuencia. Los límites se muestran en la Tabla 1, después del cual el ciclo de histéresis empezaba a cambiar o deformarse. El rango de funcionamiento mínimo fue igual en ambos circuitos (simulado y físico), sin embargo, mostró una diferencia en su máximo teniendo un rango de funcionamiento mayor en el circuito físico en comparación con el simulado donde presentó el comportamiento esperado en 1 KHz más en comparación.

Tabla 1 Rango de funcionamiento.

Circuito	Máximo	Mínimo
Simulado	2 V a 1 kHz	1 V a 100 Hz
Físico	2 V a 2 kHz	1 V a 100 Hz

Fuente: elaboración propia

Por medio de las pruebas realizadas en el circuito, se demostró que el ciclo de histéresis se deforma en mayor medida en frecuencias y amplitudes más altas, al mismo tiempo que para mantener formado el lazo es necesario aumentar ambas cosas a la vez, pues en caso de solo aumentar la frecuencia se forma una línea recta. Por otro lado, en caso de solo aumentar la amplitud, se pierde el moño característico, como se puede observar en la Figura 8. Esto es debido a que una de las características de memristor consiste en tender a una línea recta conforme se aumenta la frecuencia, mientras que el simple aumento de amplitud, se obtiene el efecto contrario, tendiendo a separarse hasta que la forma característica de moño se pierde o deforma.



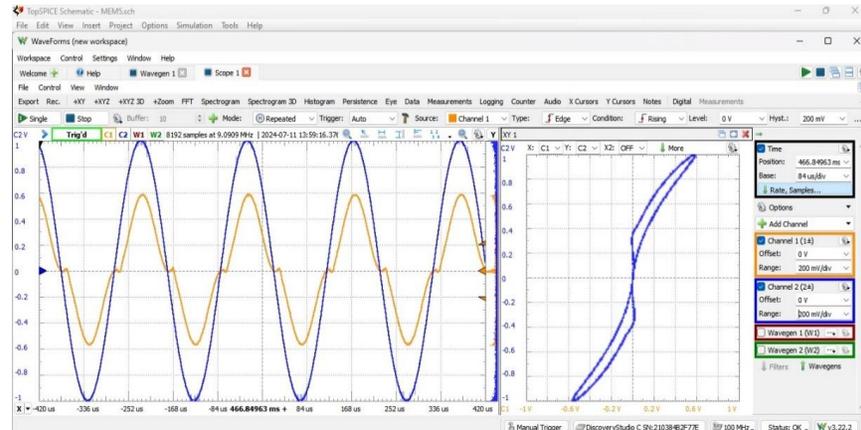
Fuente: elaboración propia

Figura 8 Ciclo de histéresis deformado.

Mediante la aplicación de escritorio WaveForms, fue posible observar de qué forma se comportaba el voltaje y corriente de entrada mediante una onda senoidal, y como cambiaba a la salida, tal como se puede ver en la Figura 9, en la cual se observa tanto la forma de onda, siendo la azul la de entrada y la anaranjada la de salida, así como el ciclo de histéresis obtenido tras analizar los datos recibidos.

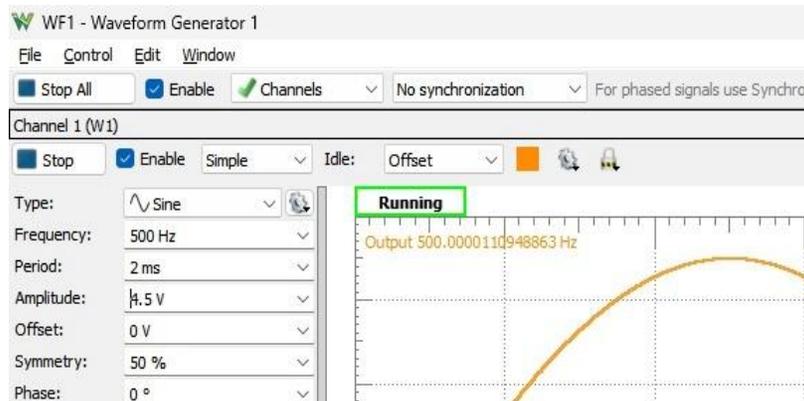
La aplicación permitió utilizar la función de osciloscopio para visualizar y analizar las señales eléctricas recibidas del circuito, y su función de generador de ondas para

enviar y modificar la señal de entrada del emulador, dicha señal, en este caso en forma de onda senoidal era posible de modificar en la aplicación, tal como se muestra en la Figura 10.



Fuente: elaboración propia

Figura 9 Obtención y análisis de las ondas de entrada y salida mediante WaveForms.



Fuente: elaboración propia

Figura 10 Parámetros modificables de la señal de entrada.

4. Discusión

Las pruebas realizadas en el circuito demostraron que el ciclo de histéresis estaba presente dentro de un rango de frecuencia/amplitud, mientras que este mismo se deforma en mayor medida en frecuencias y amplitudes más altas, al mismo tiempo que para mantener el lazo es necesario aumentar ambas cosas a la vez, pues en caso de solo aumentar la frecuencia se forma una línea recta y, por otro lado, en caso de solo aumentar la amplitud, se pierde el lazo característico.

El circuito presentado tiene un comportamiento memristivo en ambas realizaciones, tanto en la simulación como en la implementación física. Sin embargo, se busca disminuir la frecuencia mínima de funcionamiento para obtener un comportamiento óptimo de acuerdo con un memristor real, pues este último presenta un límite menor al obtenido.

El circuito muestra estabilidad en las frecuencias reportadas, por lo que es posible darle una aplicación para continuar el trabajo.

Por otra parte, se trabajó con OPAMP, debido a que es un circuito ampliamente utilizado en la electrónica, por lo que es más fácil de obtener, así como el factor de que su comportamiento eléctrico aproxima características ideales, como son impedancia de entrada, ganancias altas y un ancho de banda considerable, además de la facilidad para integrarlo en una gran variedad de circuitos.

5. Conclusiones

En este trabajo se presentó un circuito que busca emular el comportamiento de un memristor mediante el uso de piezas electrónicas de fácil acceso, buscando experimentar con el comportamiento de un memristor a diferentes frecuencias y amplitudes de entrada, buscando sus límites de aplicación en los cuales presenta un comportamiento memristivo.

Fue posible construir el circuito emulador para su caracterización, en forma experimental, de un memristor el cual ofrece resultados que concuerdan con los experimentos publicados hasta ahora, al mismo tiempo que ofrece una facilidad para modificaciones como es el caso de cambiar las resistencias presentes en los multiplicadores AD633 y de esta manera modificar su ganancia final buscando un mayor rango de funcionamiento.

Los resultados experimentales demuestran que el circuito presentado muestra el comportamiento esperado, tanto en la simulación como en un estado de construcción física. Sin embargo, muestran ligeras diferencias en su comportamiento en ambos casos, teniendo un rango de funcionamiento mayor en el circuito físico en comparación con el simulado donde presentó el comportamiento esperado en 1 *khz* más en comparación.

Se espera utilizar el circuito propuesto en aplicaciones como lo es un oscilador, para observar de qué manera cambia el funcionamiento de este al trabajar con un emulador de un memristor, a diferencia de su comportamiento habitual.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Abraham I. memristor – The fictional circuit element. *Scientific Reports*, Vol. 8, 2-15. 2018.
- [2] Biolek, Z., Biolek, D. y Biolkova, V. SPICE Model of memristor with Nonlinear Dopant Drift. *Radioengineering*, VOL. 18, NO. 2. 210-214, 2009.
- [3] Bo, B., Jian, X., Guo, Z., Zheng, M. y Ling, Z. Chaotic memristive circuit: equivalent circuit realization and dynamical análisis. *Chin. Physics. B* Vol. 20, No. 12, 120502-1 - 120502-7, 2011.
- [4] Chiu, M., Chang, F., Wu, W., Chuang, H., Sheu, S., Chen, S. y Tsai, J. Low Store Energy, Low VDD min, 8T2R Nonvolatile Latch and SRAM With Vertical-Stacked Resistive Memory (Memristor) Devices of Low Power Applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 47, No. 6, 1483-1496, 2012.
- [5] Chua, L. Memristor the missing circuit element. *IEEE Trans. Circuit Theory* Vol. 18, No. 5, 507-519, 1971.
- [6] Cruz, C. Modelización matemática de curvas experimentales en regímenes estacionarios y dinámicos de memristores. Tesis de Licenciatura, Facultad de ciencias, Universidad de Valladolid, Valladolid, 2020.
- [7] Duan, S., Hu, X., Wang, L., Li, C., Mazumder, C. Memristor-based RRAM with applications. *Science China Information Sciences*, Vol. 55, No. 6, 1446-1460, 2012.
- [8] García, J. Elaboración y análisis de un macromemristor y su aplicación a los circuitos electrónicos analógicos activos. Tesis de Doctorado, Facultad de Ingeniería, UNAM, ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021.
- [9] Lara, C. y Fernández, F. memristores: Teoría, Desarrollo y Aplicaciones del “Eslabón Perdido” en la Elenica. UTM. 2010.

- [10] Moya, K. Caracterización y pruebas de funcionamiento de memristores tipo Marconi. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019.
- [11] Muthuswamy, B. y Chua, L. Simplest Chaotic Circuit. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol. 20, No. 05, 1567-1580, 2010.
- [12] Naranjo, A. Desarrollo de modelos del memristor para aplicaciones en circuitos electrónicos, Tesis de maestría, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), San Andrés Cholula, Puebla, 2018.
- [13] Pershin, Y. y Ventra M. Practical Approach to Programmable Analog Circuits With Memristors. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, Vol. 57, No. 8, 1857-1864, 2010.
- [14] Torres, K. Modelos Neuronales Memristivos. Tesis de maestría, Colegio de Profesores de la División de Matemáticas Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí, 2016.
- [15] Valsa, J., Biolek, D. y Biolek, Z. An analogue model of the memristor. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, Vol. 24, No. 4, 400-408, 2011.