



Universitat Autònoma de Barcelona

Escuela de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Electrónica

Trabajo de Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica de Telecomunicaciones

Efecto del ruido en el memristor:

Desarrollo del set up, procedimiento de medidas y análisis de resultados

Autor

Francel Eduardo Vargas Mosquera

Directora

Dra. Rosana Rodríguez Martínez

Bellaterra, Barcelona, Julio de 2019



**Universitat Autònoma
de Barcelona**

La firmante, Rosana Rodríguez Martínez, Profesora de la Escuela de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Barcelona,

CERTIFICA:

Que el proyecto presentado en esta memoria de Trabajo de Fin de Grado ha estado realizado bajo su dirección por el alumno Francel Eduardo Vargas Mosquera.

Y, para que conste a todos los efectos, firma el presente certificado.

Firma:

Dra. Rosana Rodríguez Martínez

Bellaterra, Barcelona, Julio de 2019

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, me gustaría agradecer a la Dra. Rosana Rodríguez Martínez por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo de investigación, y por toda su dedicación, paciencia y ayuda que me ha brindado durante todos estos meses. También quiero extender este agradecimiento al Dr. Albert Crespo Yepes por sugerirme este proyecto y haberme puesto en contacto con quien es ahora mi directora de tesis, así mismo por brindarme su ayuda en despejar las dudas y por todas sus sugerencias. Gracias a ellos este trabajo se ha hecho realidad.

Agradecer infinitamente toda mi vida a mis padres y a mis abuelos por su apoyo incondicional, consejos, motivación, sabiduría, comprensión, fuente de inspiración y enseñarme a no rendirme jamás ante cualquier obstáculo que se me presente en la vida. Toda su ayuda, esfuerzo, sacrificio y confianza en mí, me ha permitido sacar adelante mi carrera de Ingeniería.

Agradecer a Dios por la oportunidad que me ha dado de nacer en esta maravillosa familia. Finalmente, siempre estaré agradecido del Dr. Ramiro Toapanta, un buen amigo de la familia por toda su ayuda, amabilidad y consejos que me ha sabido transmitir durante su vida. Gracias a todos ellos he logrado ser un profesional.

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación quiero dedicarlo a la memoria de mis abuelitos, de mi tía María y al Dr. Ramiro Toapanta, quienes me animaron desde muy pequeño a seguir estudiando y me inculcaron a poner en práctica los valores como persona, lo que me ha permitido alcanzar las metas que me propuesto en mi vida.

Dedico en especial a mis padres, por ayudarme en cada momento de mi vida, tanto en los buenos momentos como en los malos. Enseñándome que en mi diccionario no existe la palabra imposible y nunca rendirme ante cualquier adversidad que me encuentre en mi vida. Que con sacrificio, persistencia y esfuerzo todo se puede lograr. Su apoyo, confianza y ánimos han sido fundamentales para lograr terminar mi carrera.

ÍNDICE

RESUMEN	7
CAPÍTULO 1 - PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.1 Justificación del problema	8
1.2 Objetivos	9
CAPÍTULO 2 - INTRODUCCIÓN AL MEMRISTOR	10
2.1 Memristor	10
2.1.1 Memristancia.....	13
2.1.2 Analogía del memristor.....	14
2.2 Fenómeno del Resistive Switching	15
2.2.1 Proceso de Forming ($V_{FORMING}$)	17
2.2.2 Proceso de RESET (V_{RESET}) y Proceso de SET (V_{SET})	17
2.2.3 Muestras unipolares y bipolares.....	18
2.2.4 El efecto del ruido	19
CAPÍTULO 3 - PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	21
3.1 Muestras	21
3.2 Aparatos y su correspondiente configuración	22
3.2.1 Analizador de parámetros semiconductores (SPA).....	22
3.2.2 Generador de pulsos.....	22
3.2.3 Osciloscopio	23
3.2.4 Mesa de puntas y microscopio óptico	24
3.2.5 Cableado empleado	24
3.3 Programas utilizados	25
3.4 Configuraciones y conexiones de los instrumentos	26
3.4.1 Etapa 1: Forming y estabilización de la muestra	26
3.4.2 Etapa 2: Realización de las medidas	30
CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LAS MEDIDAS	36
4.1 Procedimiento de análisis	36
4.2 Resultados	38
4.2.1 Etapa 1	38
4.2.2 Etapa 2	45

CAPÍTULO 5 - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52
REFERENCIAS	53

RESUMEN

El presente trabajo de fin de grado consiste en realizar medidas experimentales en el memristor, con el objetivo de encontrar unas características de ruido que produzcan la resonancia estocástica en este dispositivo y a su vez reduzca su variabilidad para mejorar su comportamiento. Esto se consigue mediante el estudio del fenómeno de conmutación resistiva en la muestra. Se explicará el propósito y la configuración de cada uno los distintos instrumentos que intervienen en esta investigación, se detallará también el procedimiento de medida y como se han analizado estos resultados.

RESUM

El present treball de fi de grau consisteix a realitzar mesures experimentals en el memristor, amb l'objectiu de trobar unes característiques de soroll que produueixin la ressonància estocàstica en aquest dispositiu i al seu torn redueixi la seva variabilitat per a millorar el seu comportament. Això s'aconsegueix mitjançant l'estudi del fenomen de commutació resistiva en la mostra. S'explicarà el propòsit i la configuració de cadascun els diferents instruments que intervenen en aquesta recerca, es detallarà també el procediment de mesura i com s'han analitzat aquests resultats.

ABSTRACT

The present work of end of degree consists in carrying out experimental measures in the Memristor, in order to find noise characteristics that produce stochastic resonance in this device and in turn reduce their variability to improve their behavior. This is achieved by the study of the resistive switching phenomenon in the sample. It will explain the purpose and the configuration of each one the different instruments that intervene in this investigation, the measurement procedure will also be detailed and how these results have been analyzed.

CAPÍTULO 1 - PLANTAMIENTO DEL PROBLEMA

La electrónica desde sus inicios hasta el día de hoy ha experimentado una increíble evolución, que ha permitido crear y desarrollar diferentes componentes. Esto ha proporcionado que actualmente se disponga de una amplia variedad de tecnología. La tendencia que sigue la electrónica es conseguir una tecnología escalable, aumentando la capacidad de trabajo y de reducir las dimensiones físicas de los dispositivos hacia el futuro.

1.1 Justificación del problema

En el ámbito de las memorias se puede aumentar la capacidad, pero se enfrenta a varios problemas, como pueden ser reducción de su tamaño y la limitación del número de ciclos de lectura-borrado que acaban degradando la memoria. En cuanto a las memorias flash tienen este número de ciclos limitado generalmente entre 10.000 y 100.000, incluso hasta un millón de ciclos, dependiendo del voltaje utilizado para el proceso de borrado, de la precisión en el proceso de fabricación y de la celda [1]–[4].

Tratar de miniaturizar las memorias flash basadas en silicio, presenta el problema que interfieren eléctricamente las celdas de memoria entre ellas. Esto es a causa de que las puertas de estos transistores son más gruesas y acaben interfiriendo con las celdas vecinas, provocando que funcionen mal [5].

En el caso de las memorias DRAM presenta el inconveniente, que al tratarse de una memoria volátil (memoria que pierde la información en ausencia de alimentación), necesita refrescar los datos que almacena. Esto se traduce en que sea energéticamente ineficiente en comparación a otras soluciones [6].

Para solventar los problemas anteriormente mencionados sobre las memorias, se presenta el memristor con la idea de remplazar las tarjetas de memoria flash, SSD, DRAM y SRAM. Una definición básica del memristor, es un dispositivo a nanoscalas con una resistencia variable capaz de mantener los datos en ausencia de energía, por lo tanto, es no volátil. Según R. Stan Williams, (2010) investigador senior de HP y director del laboratorio de sistemas cuánticos y de información de HP, afirma que *“la memoria de memristores puede soportar hasta un millón de ciclos de lectura y escritura en las pruebas de laboratorio”* [7].

Los memristores serán el futuro de los procesadores y de las memorias, porque permitirá unificar tanto la memoria RAM como el procesador en un solo chip, eliminando los retardos y tiempos de espera. Son pequeños, más rápidos y necesitan menos energía para funcionar en comparación con las actuales memorias DRAM [6].

Permiten tener múltiples ventajas como pueden ser dispositivos más pequeños, más finos, que consumirán menos recursos y aumentarán la capacidad de datos a ser procesados. Los memristores se comportan de manera que pueden emular ciertas características de las neuronas humanas. Otros ámbitos de aplicación de los memristores son en redes neuronales celulares para realizar operaciones de procesamiento de imagen, operaciones lógicas o en el diseño de puertas lógicas para realizar operaciones de OR, NOT y AND [8].

1.2 Objetivos

El memristor, como veremos, tiene un comportamiento no lineal. En sistemas no lineales, tiene lugar el fenómeno de la resonancia estocástica, que consiste en que el ruido de unas determinadas características puede introducir un beneficio en el sistema.

En este proyecto, se analizará el fenómeno de la resonancia estocástica en memristores y se observará si tiene lugar y en qué condiciones. Así, se caracterizará los memristores añadiendo ruido adicional y se observará si este tiene influencia positiva en el comportamiento del memristor.

CAPÍTULO 2 - INTRODUCCIÓN AL MEMRISTOR

En este capítulo se realiza una presentación del memristor y se detallará una de las propiedades del memristor, la memristancia. Se explicará en qué consiste el fenómeno del resistive switching y cuáles son los procesos que lo constituyen. También se describirá el fenómeno de la resonancia estocástica y se presentarán algunos ejemplos del mismo.

2.1 Memristor

Antes del año 1971, los tres elementos fundamentales de un circuito (resistencia, condensador y el inductor) establecían las relaciones entre las cuatro variables eléctricas básicas de un circuito (voltaje, corriente, carga y flujo magnético) [9]. Observando la figura 1 se puede evidenciar que:

- El voltaje (v) y la corriente (i) se relacionan a través de una resistencia.
- La corriente (i) y el flujo magnético (ϕ) se relacionan a través del inductor.
- El voltaje (v) y la carga (q) se relacionan a través del condensador.

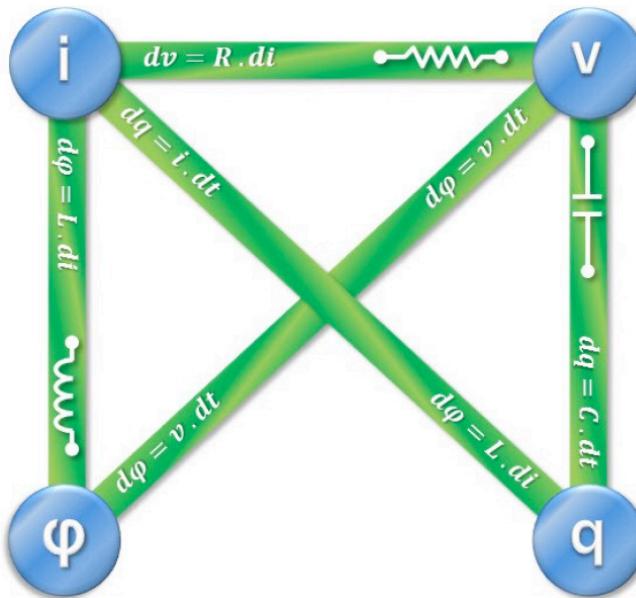


Figura 1. Muestra las relaciones establecidas entre las cuatro variables eléctricas básicas de un circuito a través de los tres elementos fundamentales de un circuito antes de 1971 [9].

Se destaca de la figura 1, que no hay un elemento fundamental que permitiera establecer una relación teórica directa entre la carga y el flujo magnético.

El concepto de memristor surge en el año 1971 propuesto por el ingeniero Leon Ong Chua, y es la concatenación de las palabras “memoria” y “resistencia”. Se trata del cuarto elemento fundamental del circuito, uniéndose a los otros tres elementos fundamentales ya conocidos hasta entonces. Permitiendo establecer la relación teórica entre el flujo magnético (φ) y la carga (q) denominándose memristancia, cerrando así el ciclo de relaciones entre las variables de carga y flujo magnético, como se puede observar en la figura 2 [10].

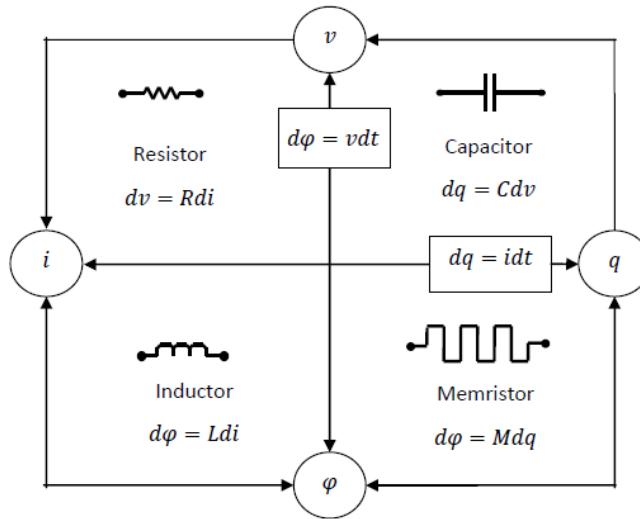


Figura 2. Relaciones establecidas entre las cuatro variables eléctricas básicas de un circuito a través de los cuatro elementos fundamentales de un circuito [9].

Un memristor es un dispositivo electrónico pasivo no lineal de dos terminales, se destaca por tener dos cualidades importantes, la primera es la capacidad de cambiar el valor de su resistencia en función de la corriente que ha circulado a través de él. La segunda cualidad que se manifiesta en ausencia de alimentación es que es capaz de recordar su último valor resistivo. Por lo tanto, el memristor funciona como una resistencia variable con la habilidad de memoria no volátil, conservando el último valor óhmico [8]–[11].

Los memristores se pueden construir con muchas estructuras o también se pueden hacer con una estructura sencilla basada en una capacidad MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) o MIM (Metal-Insulator-Metal). El memristor está constituido por dos electrodos, el electrodo superior es de metal, mientras que el electrodo inferior puede ser de metal o de un material semiconductor. Ambos electrodos se encuentran separados por un dieléctrico, generalmente es un óxido metálico de transición. [12], [13]. En la figura 3 se observa tanto el símbolo correspondiente al memristor como las dos estructuras mencionadas anteriormente.

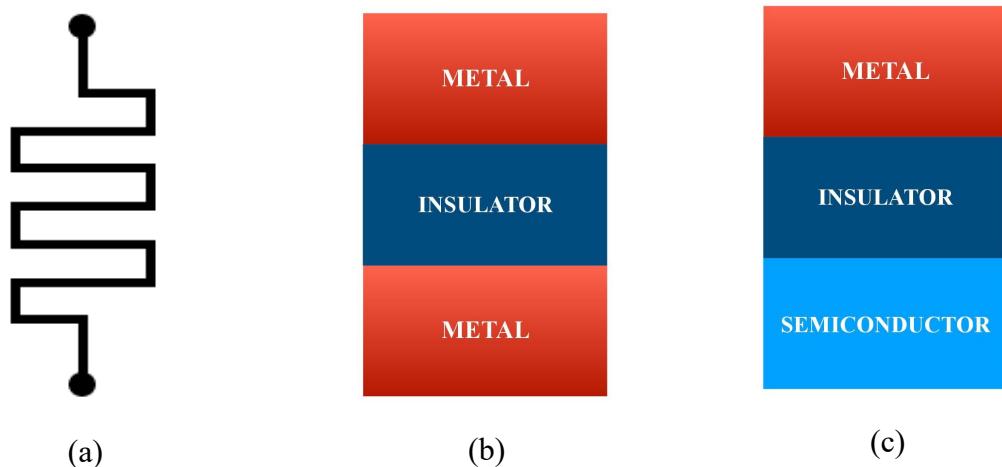


Figura 3. En (a) es el símbolo correspondiente al memristor [14]. En (b) corresponde a la estructura MIM (Metal-Insulator-Metal) en cambio (c) pertenece a la estructura MIS (Metal-Insulator-Semiconductor).

En los laboratorios de la compañía de Hewlett-Packard (HP) en 2008 se realizó la primera implementación del memristor a nanoscala. Su estructura consistía en dos electrodos de platino (Pt) separados por dos capas que se encontraban en el centro. De ellas, la capa inferior consistía en dióxido de titanio puro TiO_2 que actúa como dieléctrico.

Mientras que la capa superior consistía en dióxido de titanio deficiente en oxígeno TiO_{2-x} , que actúa como conductor. Esto es debido a los vacíos de oxígeno que actúan como donadores de electrones, quedando con carga positiva [9], [11]. En la figura 4 se puede observar la estructura anteriormente mencionada.

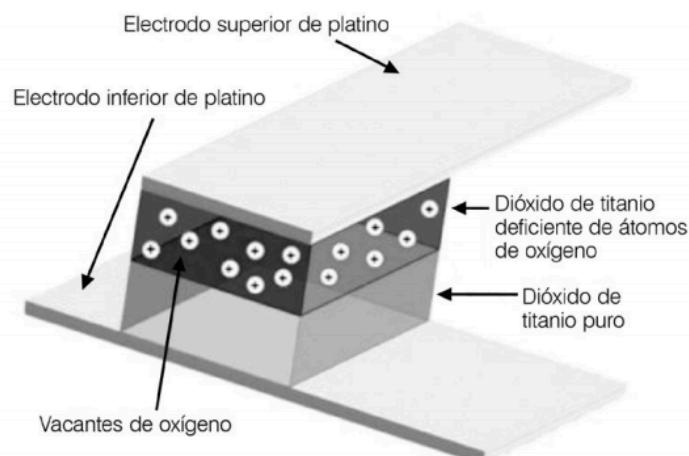


Figura 4. Estructura del memristor implementada por HP en 2008 [11].

2.1.1 Memristancia

La memristancia [15] es un fenómeno que aparece en los sistemas a nanoscala y es una propiedad del memristor. Este fenómeno consiste que cuando la carga fluye a través del circuito en una dirección, se incrementa la resistencia del memristor. En cambio, disminuye la resistencia del memristor cuando la carga que fluye a través del circuito lo hace en sentido contrario.

Cuando no se aplica voltaje no hay flujo de carga, por lo tanto, el memristor es capaz de recordar el último valor de resistencia. Posteriormente cuando se reanuda la aplicación voltaje, la resistencia inicial será igual al valor que presentaba cuando estaba inactivo el memristor [16], [17].

Para obtener la expresión de memristancia, en primer lugar, se debe tener en cuenta tanto la definición diferencial de voltaje como la de corriente, estas expresiones se pueden observar en (1) y (2) respectivamente.

$$v(t) = \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (2)$$

En segundo lugar, tener en cuenta la hipótesis inicial de que el memristor es una resistencia y, por lo tanto, se mide en ohms. Para definir la memristancia se establece la relación que se observa en la expresión (3).

$$M(t) = \frac{v(t)}{i(t)} \quad (3)$$

Aplicando las definiciones de (1) y (2) en (3), se obtiene la expresión (4)

$$M(t) = \frac{\frac{d\phi}{dt}}{\frac{dq}{dt}}$$

$$M(q) = \frac{d\phi}{dq} \quad (4)$$

De la expresión (4) se observa que la memristancia permite establecer la relación entre el flujo magnético (ϕ) y la carga (q), y se mide en ohms (Ω) [9], [11].

2.1.2 Analogía del memristor

La analogía brinda una forma de entender con mayor precisión el funcionamiento dinámico del memristor al compararlo con una tubería de agua. En la entrada de la tubería existe una presión de agua que representa el voltaje aplicado, mientras que el agua que circula simboliza la carga eléctrica y la velocidad con que fluye esta agua representa la corriente eléctrica.

Si se piensa en una resistencia, el diámetro de la tubería será constante al no existir variación del flujo de agua. En cambio, para un memristor es diferente porque la contracción y la expansión del diámetro, está relacionada según la dirección con que circula el agua. Cuando el agua circula en una dirección, el diámetro de la tubería se incrementa con el objetivo que el agua corra con mayor velocidad (circulando más corriente eléctrica, lo que se traduce en una menor resistencia), en cambio si el agua circula en sentido contrario el diámetro disminuirá con la finalidad de reducir el flujo de agua (circulando menos corriente eléctrica y aumentando la resistencia).

En el momento que no exista flujo de agua, la tubería mantendrá el último diámetro hasta cuando se reanude la circulación del agua. De esta manera la tubería es capaz de recordar la cantidad de agua que ha circulado a través de ella, así como un memristor recuerda la corriente que ha circulado a través de él [9], [13], [16].

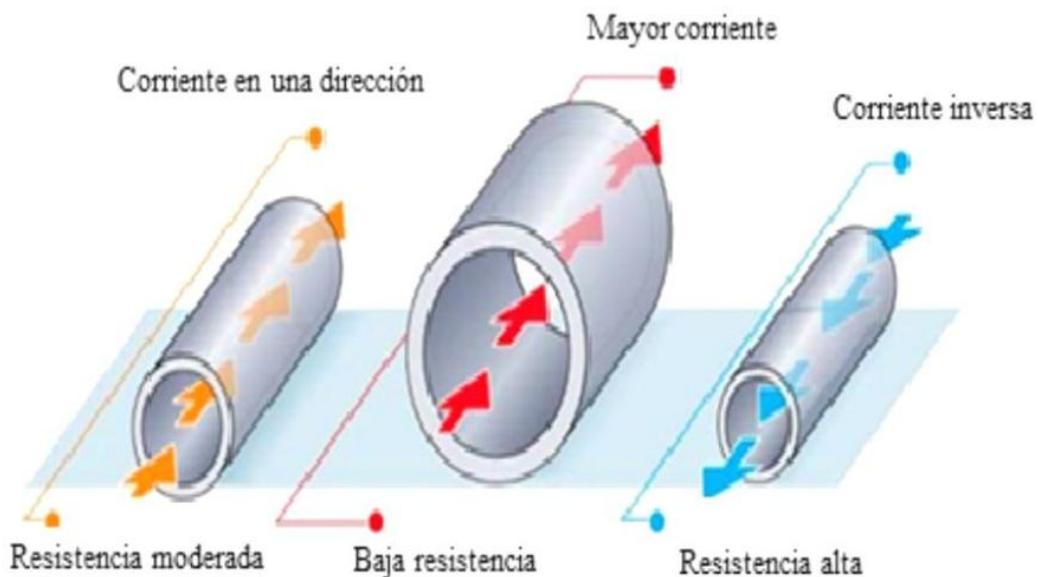


Figura 5. Analogía del memristor con tuberías por las cuales fluye de agua [16].

2.2 Fenómeno del Resistive Switching

Este fenómeno de resistive switching (RS) se produce en el memristor [13], [18] y se fundamenta en los cambios sucesivos de resistencia eléctrica de una capa dieléctrica por aplicación de una corriente eléctrica o una tensión. Este cambio resistivo [12] se trata de un mecanismo reversible y no volátil.

El fenómeno [19] se ha estudiado tanto en estructuras MIM como en estructuras MIS, presentando dos estados conductivos separados por varios ordenes de magnitud, lo que permite diferenciarlos claramente [18]. El primer estado es de alta resistencia (High Resistance State, HRS) o también conocido como estado ‘OFF’, en este estado la corriente que fluye a través del dieléctrico es bastante baja. El segundo estado es de baja resistencia (Low Resistance State, LRS) o también denominado estado ‘ON’, presentando en este estado una corriente elevada que circula por medio del dieléctrico. A continuación, se pueden observar estos estados en la figura 6.

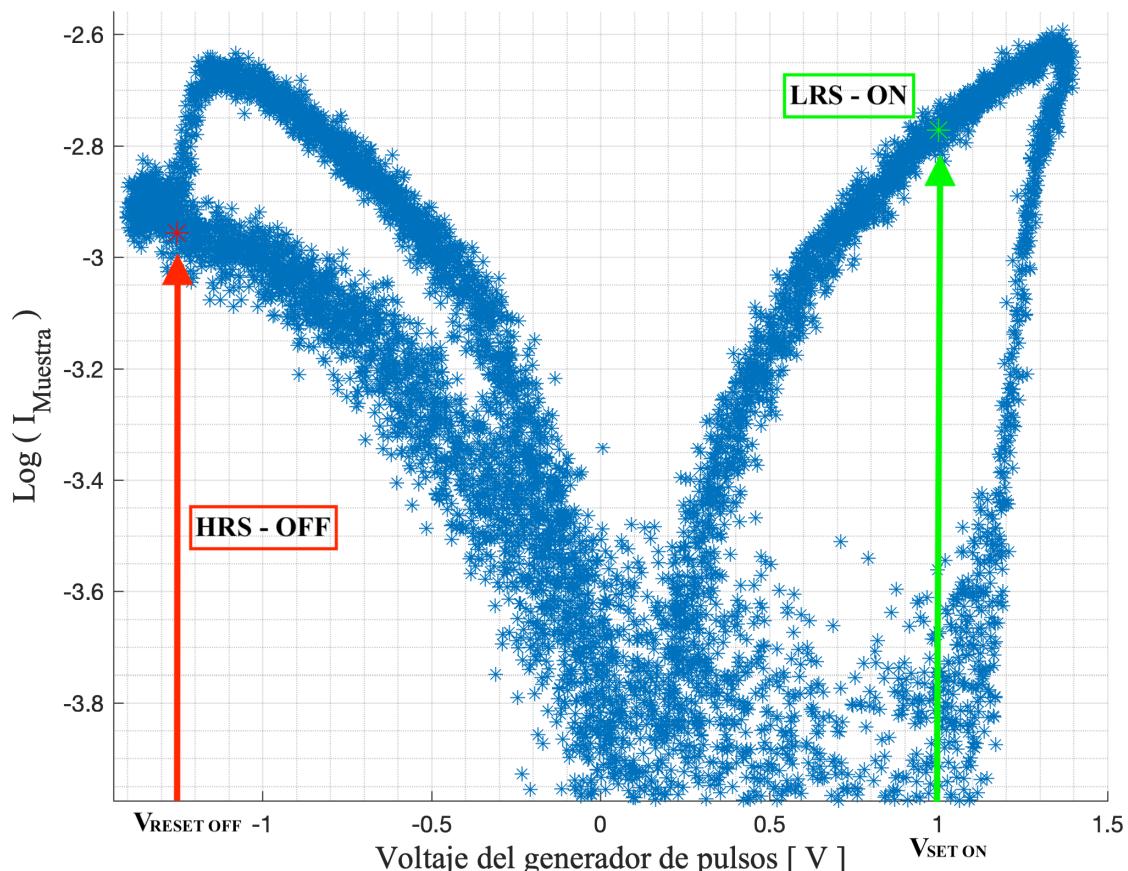


Figura 6. Representación de la mariposa correspondiente a la curva I-V del memristor, en ella se puede ver la ubicación de ambos estados.

El fenómeno de resistive switching presenta dispersión. En una misma muestra las tensiones y corrientes de SET y RESET varían de un ciclo a otro. Dependiendo de cómo se efectúe la conmutación [12], da lugar a diversos escenarios en el memristor. Una de las explicaciones más aceptadas es la conmutación por filamentos que es independiente del área. Los filamentos se forman por defectos en el óxido (rotura de los enlaces de los elementos que lo forman, difusión de los materiales etc.), que generan este camino conductor. La conmutación por filamentos se observa en la figura 7.

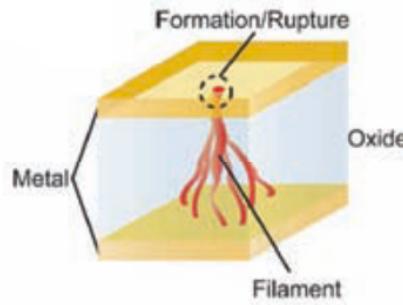


Figura 7. Conmutación por filamentos [12].

Para realizar los cambios sucesivos de resistencia [18] se realizan por medio de tres diferentes procesos eléctricos que se conocen principalmente como forming, reset y set. Estos procesos forman parte del resistive switching y se puede ver su representación en la figura 8.

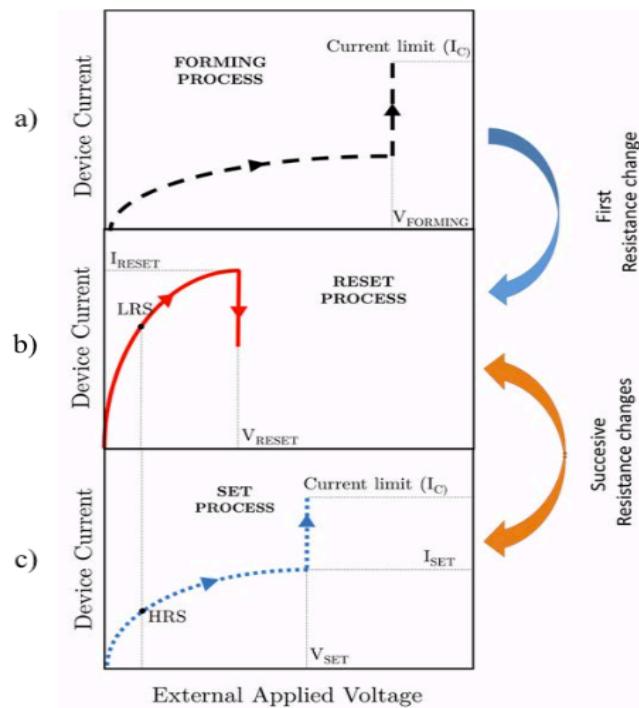


Figura 8. Representación esquemática de los procesos forming, reset y set correspondientes para el caso de resistive switching unipolar [18].

2.2.1 Proceso de Forming ($V_{FORMING}$)

El primer proceso [12] que se aplica a una muestra fresca de memristor se conoce como forming o electroforming (figura 8a), y solo se debe aplicar una única vez a la muestra fresca. Este proceso [15], [18] se basa en crear un filamento conductor en el dieléctrico para que circule corriente, a través de la aplicación de una determinada tensión ($V_{FORMING}$) entre los dos electrodos del memristor con el objetivo que la muestra que se encuentra en un estado de alta resistencia (HRS) realice su primera conmutación hacia el estado de baja resistencia (LRS).

2.2.2 Proceso de RESET (V_{RESET}) y Proceso de SET (V_{SET})

Se realiza por medio de la aplicación de sendas tensiones [13] a través de los dos electrodos del memristor, con esto se consigue cambiar la resistencia eléctrica de este dispositivo, y por lo tanto, la conmutación entre los dos estados [19]. Para llegar a LRS y HRS respectivamente tienen lugar los eventos de RESET (figura 8b) y SET (figura 8c).

En el estado ON o también conocido como el estado LRS, presenta una resistencia baja ' $R_{MEM\ ON}$ ', donde la corriente eléctrica es elevada. En cambio, en el estado OFF o también denominado HRS tiene una resistencia elevada ' $R_{MEM\ OFF}$ ', lo que se traduce en una corriente eléctrica menor.

En la figura 9 'A' [15], se puede observar el aislante en el estado de alta resistencia (HRS). A continuación, en 'B' se produce la creación de filamentos conductores en el óxido por medio del proceso forming, aplicando una tensión ($V_{FORMING}$). En 'C' tiene lugar el proceso de SET, para cerrar el filamento en el dieléctrico por medio de la aplicación de una tensión (V_{SET}), que produce la transición desde el estado HRS hacia el estado LRS, disminuyendo la resistencia del memristor hasta alcanzar $R_{MEM\ ON}$.

En el caso de querer retornar al estado OFF como se puede observar en 'D', se debe utilizar el proceso de RESET. Este proceso consiste en aplicar una tensión (V_{RESET}) de polaridad opuesta o no, dependiendo del tipo de muestra (el tipo de muestra se explicará en el punto 2.2.3). Esta tensión provoca la transición desde el estado LRS hacia el estado HRS abriendo el filamento que se había cerrado en el dieléctrico, lo que significa que la resistencia del memristor aumentará hasta alcanzar $R_{MEM\ OFF}$.

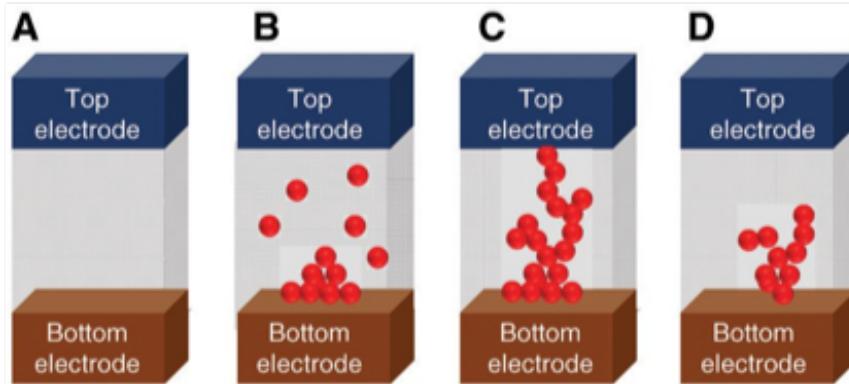


Figura 9. Representación esquemática del resistive switching correspondiente al modelo de conmutación por filamento [15].

2.2.3 Muestras unipolares y bipolares

Existen dos tipos principales de muestras [13], [19] donde ocurre el fenómeno del resistive switching:

- Las muestras unipolares son aquellas donde los procesos de SET y RESET se producen aplicando tensiones de la misma polaridad, pero de amplitud diferente. Esta tensión que se aplica puede ser tanto positiva como negativa. El comportamiento unipolar se puede apreciar en la figura 10a.
 - Las muestras bipolares son aquellas donde el proceso de SET se produce a una polaridad distinta respecto del RESET. Por ejemplo, si se aplica una tensión (V_{SET}) positiva, la tensión (V_{RESET}) será negativa. El comportamiento bipolar se puede observar en la figura 10b y será el observado en los memristores utilizados en este trabajo.

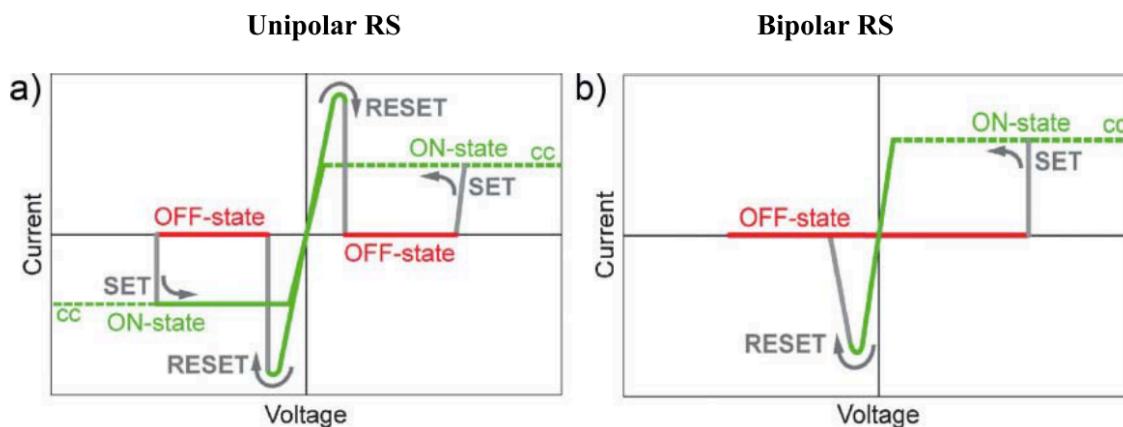


Figura 10. Representación de las características $I-V$ del efecto de resistive switching tanto para los comportamientos unipolares (a) y bipolares (b) [19].

2.2.4 El efecto del ruido

Desde el punto de vista de las telecomunicaciones, la presencia del ruido supone un inconveniente importante y perjudicial. En cambio, en este trabajo de investigación se desea enfocar desde otro punto de vista, el de aprovechar y aplicar ruido de una determinada amplitud, en beneficio de obtener un mejor comportamiento del dispositivo del memristor, para reducir la gran variabilidad a causa de la formación de filamentos, que es un fenómeno aleatorio [13]. También disponer de una ventana de medida grande, de varios ordenes de magnitud entre el nivel LRS y HRS.

Se plantea la hipótesis que el ruido, estadísticamente puede ayudar a compensar la dispersión, dado que dos procesos estocásticos no tienen porque sumarse en fase y producir una mayor variabilidad, sino que a lo mejor la dispersión de los dos procesos estocásticos se acabe compensando.

Otros estudios [20] han conseguido demostrar que el ruido tiene un papel constructivo para que haya un buen funcionamiento en los sistemas biológicos, por medio de un fenómeno que está presente en la naturaleza, y se trata de la resonancia estocástica.

La resonancia estocástica [21], [22] es un fenómeno que ocurre en los sistemas no lineales. En el caso de tener una señal débil, esta no sería detectada por estar debajo del umbral del sistema, pero en cambio con la ayuda del ruido, el sistema será capaz de detectarla estocásticamente, al haber superado este umbral. Esto se puede observar mediante la representación de la figura 11.

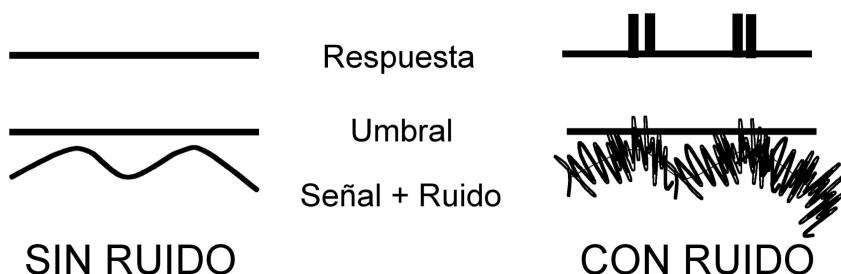


Figura 11. Representación esquemática de una señal débil, que no puede ser detectada por el sistema. Cuando a esta señal débil se le añade ruido, es capaz de ser detectada por el sistema [20].

Un primer ejemplo de este fenómeno tiene lugar en el estudio [23], [24] que se realizó por parte de los científicos de ciencias experimentales de la universidad Pompeu Fabra (UPF) junto al IDIBAPS del hospital Clínic de Barcelona para entender como el cerebro consigue ser ordenado. Llegaron a la conclusión, que el cerebro es ordenado gracias a un ruido de fondo provocado por las neuronas que se basan en el fenómeno de la resonancia estocástica. Otro ejemplo seria las glaciaciones de la Tierra [24] que ocurren por medio del efecto de resonancia estocástica. Mediante un ruido de fondo (fluctuaciones) que se añaden a la débil oscilación de rotación, permite otorgan una regularidad en las glaciaciones.

Un ejemplo para destacar es la primera implementación de un circuito de RF [25] que presenta el fenómeno de resonancia estocástica. Este circuito está formado por dos transistores bipolares entrecruzados que garantizan una operación bi-estable. Por medio de la aplicación de una señal periódica (0.5 GHz) y ruido blanco Gaussiano se consigue realizar saltos entre los estados estables gracias a una intensidad de ruido menor. Una de las conclusiones de este estudio fue la verificación del fenómeno de resonancia estocástica y del control de algunos de estos parámetros de este fenómeno a frecuencias de RF. Abriendo la investigación de este fenómeno en el campo de las microondas (1 GHz a 300 GHz) [26].

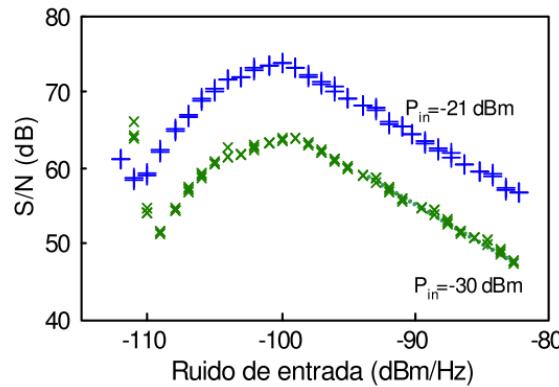


Figura 12. Representación del experimento del circuito RF con fenómeno de resonancia estocástica. Aplicando una señal periódica (0.5 GHz) junto con un ruido blanco gaussiano (efecto cooperativo entre ambos). Permite que para un valor óptimo de ruido produzca un máximo (pico de resonancia estocástica) en la S/N (señal a ruido), a mayores valores de ruido se cancela este efecto cooperativo. Este fenómeno se conoce como resonancia estocástica [25].

M. Lorenzo Gonzalez [27] afirma que “*no siempre el ruido tiene que verse como un elemento destructivo, en ocasiones una dosis adicional de aleatoriedad o estocasticidad en un sistema puede conducir a una mejora en el resultado deseado*”.

CAPÍTULO 3 - PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se explicarán las muestras que se han utilizado en el presente trabajo de investigación, así como su estructura y dimensiones correspondientes. También se realizará la descripción de los equipos, el cableado y los algoritmos empleados mediante una representación en diagramas de flujo. Estos algoritmos implementados servirán para el control de cada uno de los equipos involucrados en la investigación. Finalmente se detallará cada una de las etapas que se han realizado en este estudio.

Las medidas realizadas en esta investigación para observar el comportamiento de las muestras del dispositivo memristor, se han desarrollado en el laboratorio (QC-2063) de caracterización eléctrica y fiabilidad perteneciente al grupo REDEC (Departamento de Ingeniería Electrónica) ubicado en la Escuela de Ingeniería de la UAB.

3.1 Muestras

Las muestras utilizadas en este estudio [13] se tratan de memristores bipolares basados en la estructura MIM (Metal-Insulator-Metal). Donde el electrodo superior puede estar hecho por nitruro de titanio (TiN) o por titanio (Ti). En este caso se ha utilizado para el electrodo superior una capa de 200 nm de TiN.

El dieléctrico donde se produce el switching, se encuentra en medio de los dos electrodos, y está formado por HfO_2 (óxido de hafnio ‘IV’) con una capa de grosor de 10 nm. El electrodo inferior está conformado por una capa de 200 nm de wolframio (W). Las muestras de memristor empleadas tienen un área de $5 \times 5 \mu\text{m}^2$. En la figura 13 se puede observar la sección transversal de la muestra con los correspondientes materiales y grosores que la conforman.

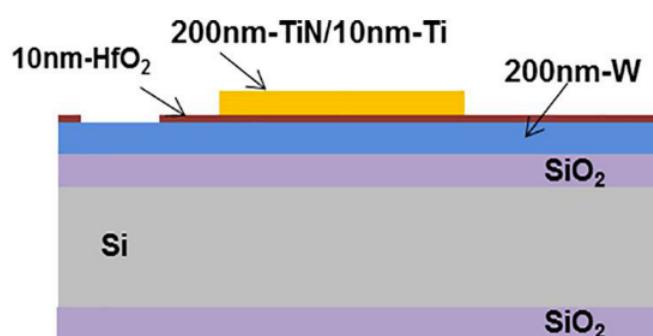


Figura 13. Muestra de memristor bipolar basado en una estructura MIM [13].

Las muestras utilizadas en esta investigación son estructuras fabricadas a nivel de oblea por parte del CNM-IMB¹. El procedimiento de fabricación consiste primeramente en una deposición de una capa de 10 nm de HfO₂ a través del ALD (Atomic Layer Deposition) a una temperatura de 225°C. Seguidamente por medio del magnetron sputtering se realiza la deposición de los electrodos [13].

3.2 Aparatos y su correspondiente configuración

A continuación, se realizará una descripción de los aparatos que se han utilizado en esta investigación.

3.2.1 Analizador de parámetros semiconductores (SPA)

El primer aparato que se utilizará en el caso que la muestra del memristor sea fresca es el analizador de parámetros de semiconductores o también conocido como SPA, fabricado por Agilent, modelo 4156C. Este instrumento es muy importante porque servirá para realizar el forming en la muestra para la generación del filamento en el dieléctrico, así como posteriormente servirá para la comprobación del estado de la muestra al realizar unos cuantos ciclos en la medida para intentar estabilizar la muestra, ambos procesos serán controlados por un algoritmo diseñado en Matlab.

3.2.2 Generador de pulsos

El segundo instrumento de vital importancia es el generador de pulsos de Keysight modelo 81150A para realizar la señal que se utilizará para los eventos del SET y RESET del memristor. Esta señal se enviará tanto a la muestra de memristor que estará colócala en la mesa de puntas, así como al osciloscopio. La principal ventaja que presenta este generador es en relación que permite sumar internamente la señal que se deseé elaborar más la amplitud de ruido que se requiera, de esta manera se puede aplicar señal y ruido simultáneamente.

La elaboración de la señal y del ruido para aplicar se realizará mediante un algoritmo implementado en Matlab en un ordenador, en este algoritmo podremos definir el tipo de señal y modificar las características de esta señal, de manera similar para el ruido. Se transmitirá estas instrucciones hacia el generador de pulsos mediante GPIB. Posteriormente se detallará

¹ Centro Nacional de Microelectrónica – Instituto de Microelectrónica de Barcelona.

del tipo de señal que se enviará a la muestra de memristor para observar el fenómeno de resistive switching. En la figura 14 se puede observar el generador de pulsos utilizado.



Figura 14. Generador de pulsos de Keysight modelo 81150A para la elaboración del tipo de señal y ruido para aplicar a la muestra de memristor.

3.2.3 Osciloscopio

El tercer aparato de vital importancia en esta investigación es el osciloscopio de Keysight modelo MSOS254A (figura 15). Este osciloscopio dispone de 4 canales de entrada, pero en este caso solo se utilizarán dos canales, por uno de estos dos canales se visualizará la señal que se envía a la muestra de memristor y por el otro canal se visualizará la señal que se recoge de la muestra.

El osciloscopio servirá para la captura de los eventos que se produzcan en las medidas realizadas en la muestra del memristor. Normalmente el osciloscopio presenta una impedancia elevada de $1M\Omega$ para que actúe solamente como un instrumento de medida que afecte lo menos posible a un circuito, pero en este caso será al revés, se programará una impedancia ($R_{\text{Osciloscopio}}$) baja de 50Ω con el objetivo que el osciloscopio sea el aparato de medida, que se introduzca a través de él para medir la tensión que se recoja proveniente de la muestra. Esta tensión proveniente de la muestra es proporcional a la corriente que ha circulado por el memristor.

El osciloscopio dispone de un sistema operativo de Windows 7, en el que se encuentra instalado el programa de Matlab. Esto será muy útil porque permitirá el diseño de un algoritmo de control para el osciloscopio para hacer las capturas de los eventos de las medidas que se realicen. De esta manera se evita transmitir el evento capturado por el osciloscopio mediante GPIB hacia un ordenador, reduciendo el tiempo entre las capturas que se realicen [28].

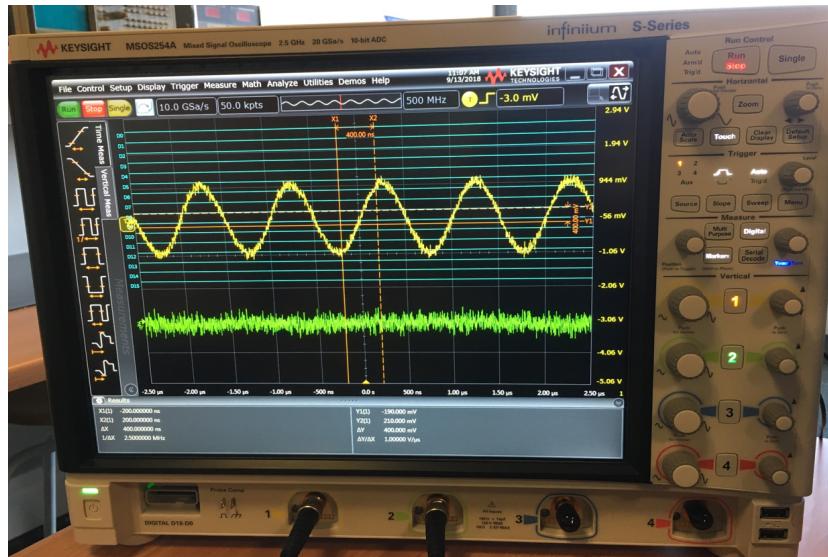


Figura 15. Osciloscopio de Keysight modelo MSOS254A, para la visualización de las señales de envío hacia la muestra como la señal que procede de la muestra. Este osciloscopio será controlado por un algoritmo implementado en Matlab para el control de captura de los eventos en las medidas que se realicen en la muestra del memristor.

3.2.4 Mesa de puntas y microscopio óptico

La mesa de puntas [13] está conformada por distintos elementos. El primer elemento es el ‘chuck’, que sirve como base para la colocación de la oblea y que esta quede fijada al vacío en la misma base, mediante una bomba de vacío. Luego se dispone también de unos posicionadores (segundo elemento) para realizar el contacto con la oblea y a su vez se cuenta con la ayuda de un microscopio óptico (tercer elemento) en la mesa de puntas, con la finalidad de encontrar la muestra en concreto que se está buscando en la oblea.

Una vez ubicada la muestra se procede con las puntas (cuarto elemento) situadas en los posicionadores, que están hechas de tungsteno o también conocido como wolframio (W) para acceder a los terminales de la muestra y poder aplicar las tensiones procedentes de la señal que se envía desde el generador de pulsos.

3.2.5 Cableado empleado

En esta investigación se han utilizado dos tipos de cables. En la primera parte, en el caso que la muestra del memristor sea fresca es necesario realizar el forming y la comprobación correspondiente del estado de la muestra. En esta parte se han utilizado cables SMU triaxiales, para efectuar la conexión entre el SPA y la mesa de puntas, donde se encuentra la muestra que se ha seleccionado de la oblea.

En la segunda parte, se ha utilizado cables coaxiales para enviar la señal procedente del generador de pulsos hacia la mesa de puntas donde se encuentra la muestra del memristor y hacia el osciloscopio por medio de una conexión en ‘T’ a la salida del generador de pulsos. De la misma manera se ha empleado otro cable coaxial para efectuar la conexión entre la muestra y el osciloscopio para visualizar a través de él, la señal procedente del memristor.

Existe una diferencia destacable entre el cable triaxial y el cable coaxial, el primero cuenta con tres conductores concéntricos y dos mallas protectoras, este blindaje adicional le permite ser más robusto frente a interferencias electromagnéticas o fugas. En cambio, el segundo cuenta con dos conductores y únicamente una malla protectora [13], [29].

Además de ello, los cables SMU nos permiten realizar dos acciones:

- Aplicar tensión y medir la corriente por el mismo cable.
- Aplicar corriente y medir tensión por el mismo cable.

3.3 Programas utilizados

En este apartado se detallan los dos programas informáticos que se ha utilizado, el primer software para la realización de la caracterización del dispositivo memristor, en cambio el segundo para la gestión de todas las fuentes consultadas que se pueden ver en el apartado de ‘referencias’.

- El primer software es Matlab (figura 16a), se trata de un sistema de cálculo numérico para el análisis y diseño tanto de productos como de sistemas en el ámbito científico y de la ingeniería [30]. En este trabajo de investigación Matlab sirve para realizar el control de los diferentes aparatos anteriormente mencionados mediante el diseño de un algoritmo específico para cada instrumento. También se utilizará este software para el análisis de los datos que se obtengan en cada una de las medidas que se realizarán.

Se ha elegido realizar el control de los aparatos mediante Matlab porque es un lenguaje flexible y fácil de programar. De esta manera se dispone de un repertorio amplio de instrucciones con la ayuda del manual del instrumento. Otro motivo

importante a la hora de elegir Matlab ha sido por el posterior tratamiento estadístico de la gran cantidad de datos que se obtendrán en las medidas realizadas y para la creación de los distintos gráficos que posteriormente se podrán observar.

- El segundo programa utilizado en esta investigación es Mendeley (figura 16b) para la gestión de las referencias de documentos de investigación como de páginas webs consultadas. Este programa se puede utilizar como buscador de referencias o documentos científicos por su autor, título o palabras clave y también para almacenar y organizar la información [31].

a)



b)



Figura 16. En (a) se puede observar el logotipo correspondiente de Matlab, mientras que en (b) corresponde al logotipo de Mendeley [32], [33].

3.4 Configuraciones y conexiones de los instrumentos

En el presente apartado se detallarán las configuraciones realizadas a los distintos aparatos, especificando los pasos a seguir en cada fase, así como la descripción correspondiente de cada una de las señales programadas y de los procesos implementados en los diferentes algoritmos mediante la representación de un diagrama de flujo.

3.4.1 Etapa 1: Forming y estabilización de la muestra

El primer procedimiento que se debe realizar en el caso que la muestra sea fresca es el forming, solo se debe realizar una única vez cuando la muestra es nueva. Consiste en la aplicación de una tensión elevada con el objetivo de generar un filamento conductor en el óxido para la circulación de la corriente.

En este proceso se aplican tensiones elevadas, superiores a las tensiones aplicadas para el resistive switching, es necesario establecer un límite de corriente para proteger a la muestra, como se puede observar en la figura 8a. Si no se pone este límite de corriente, la muestra se rompe generando un filamento que ya no sería reversible.

Para esta etapa los instrumentos que se utilizan son los siguientes: el analizador de parámetros de semiconductores (SPA), la mesa de puntas junto con el microscopio y los cables SMU triaxiales. Seguidamente se detallan los pasos que se han seguido en esta etapa:

1. Encender el SPA, el ordenador y abrir la mesa de puntas.
2. Colocar la oblea, fijarla al vacío y mediante los posicionadores y el microscopio ubicar la muestra deseada.
3. Una vez encontrada la muestra, se debe bajar las puntas para realizar el contacto con la muestra, una punta se debe colocar en el terminal o electrodo superior (color rojo de la figura 17) y la otra punta se debe colocar en el electrodo o terminal inferior (color verde de la figura 17).
4. Conectar los cables SMU triaxiales desde el SPA hacia la mesa de puntas, en la parte externa de la mesa, se deben conectar estos cables en la parte inferior que es la conexión para cables triaxiales SMU. Los cables internos de la mesa de puntas también se deben conectar en la parte inferior, para hacer la conexión entre la parte externa de la mesa y las puntas que contactarán la muestra.
5. Cerrar la mesa de puntas para evitar posibles interferencias electromagnéticas.
6. Establecer la comunicación entre el ordenador y el SPA mediante GPIB.
7. Programar la señal rampa para la realización del forming, estableciendo el límite de corriente para proteger a la muestra y enviar las instrucciones mediante el comando '*fprintf*' al SPA a través de GPIB.
8. Aplicar la señal rampa a la muestra para hacer el forming.
9. Seguidamente del forming, se realiza 10 ciclos para estabilizar la muestra y verificar que su estado este correcto.

A continuación, en la figura 17 se puede observar la conexión realizada entre el SPA y la mesa de puntas para hacer contacto con la muestra.

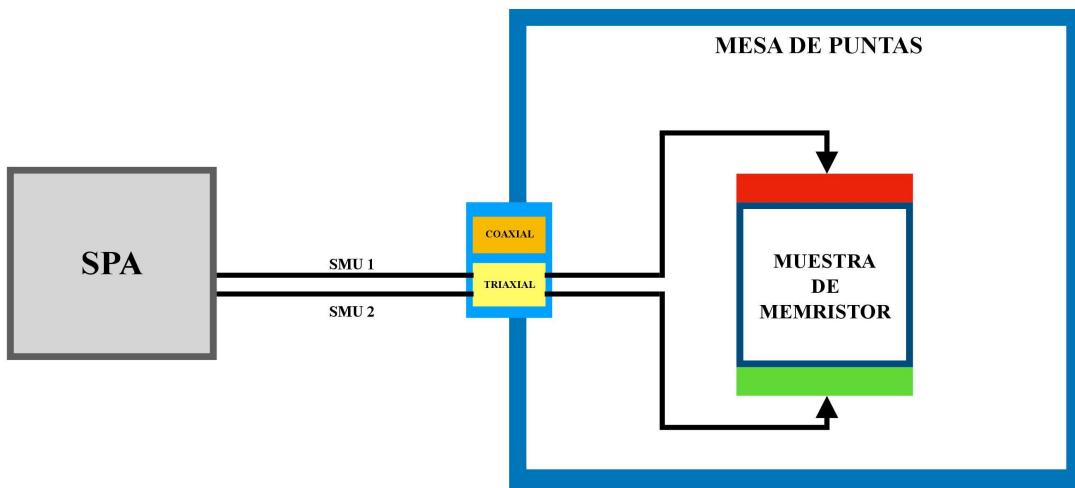


Figura 17. Representación esquemática de las conexiones realizadas entre el SPA y la mesa de puntas mediante cables SMU triaxiales. De color rojo representa el terminal superior del memristor, en cambio de color verde corresponde al terminal inferior del memristor.

En la figura 18 se puede observar el diagrama de flujo para la configuración y control del SPA. Este aparato se utiliza para la realización de los procesos del forming y los ciclos de estabilización de la muestra.

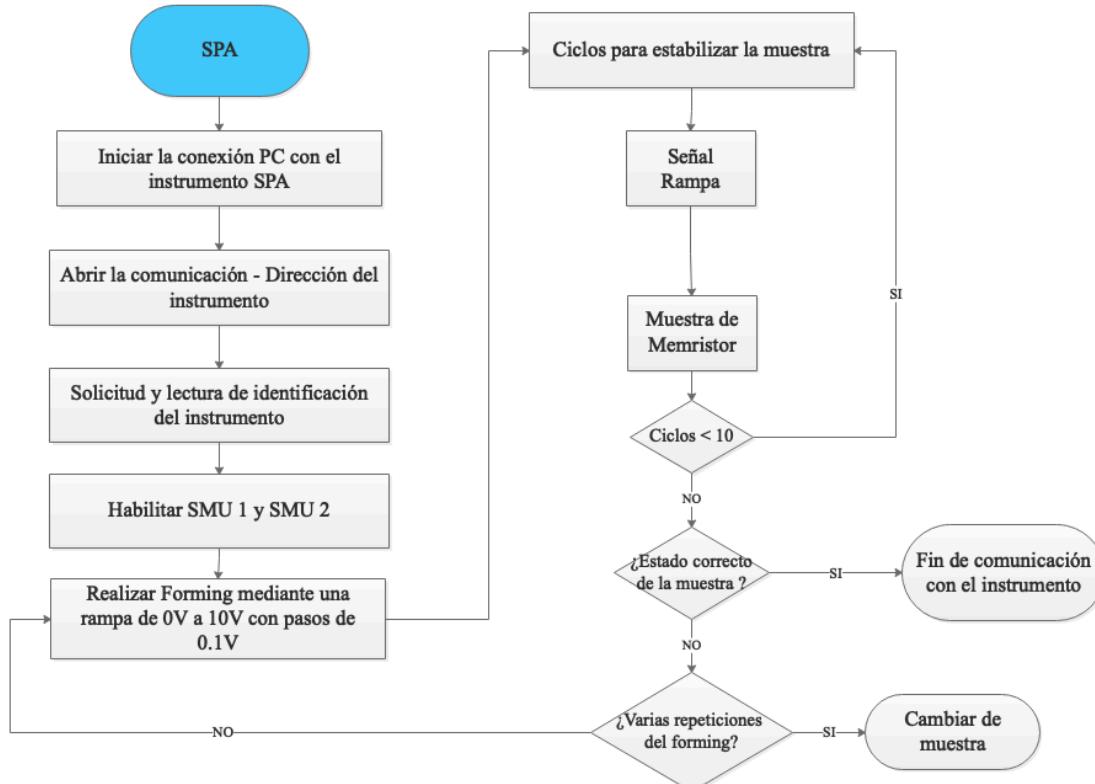


Figura 18. Diagrama de flujo correspondiente para el forming, así como para la realización de la comprobación del estado de la muestra del memristor.

Para la realización del forming se utiliza una señal rampa de tensión de 0 a 10V en incrementos de 0.1V. Para aplicar estas tensiones se hace uso de la instrucción ‘DV’ la que permite aplicar estas tensiones por el SMU correspondiente. Esta instrucción se compone de cuatro comandos, que son los siguientes:

1. Número de canal de salida.
2. Rango.
3. Voltaje.
4. Límite de corriente.

Un ejemplo de cómo se utiliza esta instrucción es la siguiente: “*fprintf (ag, ‘DV %e, %e, %e, %e’,[1,0,x,500e-6])*”. En primer lugar, el ‘1’ se refiere al canal de salida (canal 1), donde está conectado el SMU 1. En segundo lugar, el ‘0’ corresponde al auto rango. En tercer lugar ‘x’ corresponde a las tensiones aplicadas (de 0 hasta 10V). En cuarto lugar, ‘500e-6’ se refiere al límite de corriente impuesto. En cambio, para medir la corriente resultante de la aplicación de las tensiones anteriores se hace por medio del cable SMU 2, mediante el comando ‘TI?’.

Después del forming, se continua con el proceso de estabilizar la muestra. Esto se consigue aplicando en cada ciclo una rampa de ida y vuelta desde 0 a 2V y desde 0 a -2V (figura 19). Esta señal rampa servirá para la realización de los 10 ciclos con el propósito de observar el fenómeno de resistive switching, comprobando de esta manera el estado que presenta la muestra. En esta parte también se aplica un límite de corriente, como se puede observar en la figura 8c, para asegurar que la muestra no se rompa.

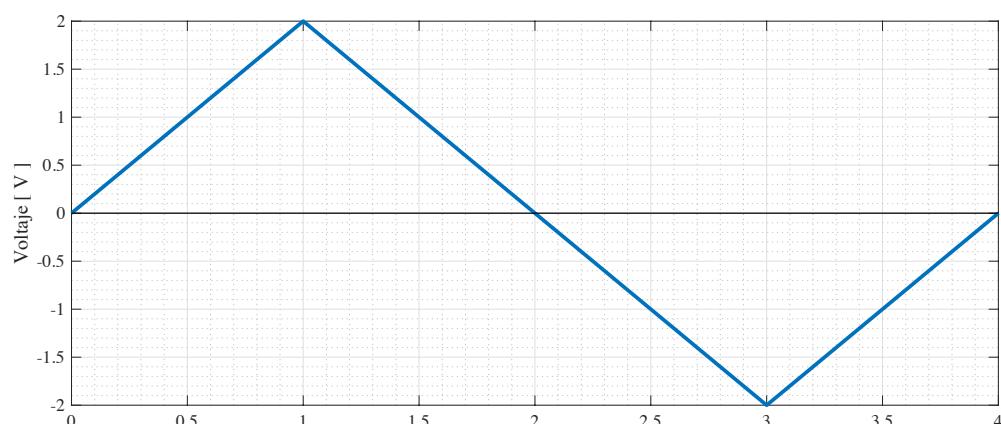


Figura 19. Representación esquemática de la señal rampa de ida y vuelta.

Una vez realizado el proceso de forming y comprobado que el estado de la muestra este correcto, se puede pasar al siguiente proceso, pero antes es necesario realizar los siguientes pasos:

1. A veces suelen quedar cargas en las puntas que hacen contacto con la muestra, si se levanta directamente las puntas se dañaría la muestra. Para evitar esto se aplican ceros por el SMU 1.
2. Se levanta cuidadosamente las puntas.
3. Cambiar los cables.
4. Bajar las puntas.
5. Se procede con el siguiente proceso.

3.4.2 Etapa 2: Realización de las medidas

La siguiente fase de esta investigación, se centra en la realización de las medidas en las muestras del memristor. El propósito es la aplicación de una determinada señal que permite efectuar los procesos de SET y RESET. Para esta etapa no se establece límite de corriente porque las tensiones que se aplicarán para el switching son menores que las tensiones aplicadas durante el forming y las aplicadas para la estabilización de la muestra.

Los instrumentos que intervienen en esta etapa son: el generador de pulsos y el osciloscopio. Para este caso se utilizarán los cables coaxiales en lugar de los cables triaxiales SMU para realizar las conexiones pertinentes. Seguidamente se presentan los pasos necesarios a realizar en esta etapa:

1. Levantar puntas.
2. Pasar de las conexiones inferiores que corresponden a los SMU hacia las conexiones superiores de los coaxiales.
3. Bajar puntas.
4. En la salida 1 del generador de pulsos, colocar una conexión en 'T'.
5. Conectar el primer cable coaxial desde una de las salidas disponibles en la parte superior externa de la mesa de puntas hacia el generador de pulsos, enchufar este cable a una de las salidas de la conexión 'T'.

6. Desde la otra salida disponible de la ‘T’ se conecta el segundo cable coaxial en dirección al osciloscopio, enchufándolo en el canal 2.
7. El último enlace se establece entre el osciloscopio y la parte externa de las salidas de la mesa de puntas. Conectando el tercer cable coaxial al canal 1 del osciloscopio hacia otra de las salidas disponibles en la parte superior externa de la mesa.
8. Establecer la comunicación entre el ordenador y el generador de pulsos mediante GPIB.
9. Programar la señal deseada para realizar los procesos de SET y RESET. Enviar las instrucciones mediante el comando *‘fprintf’* al generador de pulsos a través de GPIB.
10. Programar el osciloscopio para que detecte los eventos y capturarlos.
11. Enviar la señal a la muestra como al osciloscopio.
12. Capturar y guardar cada uno de los eventos en un formato archivo.

En la figura 20 se puede visualizar las conexiones que se han realizado mediante la representación del siguiente esquemático:

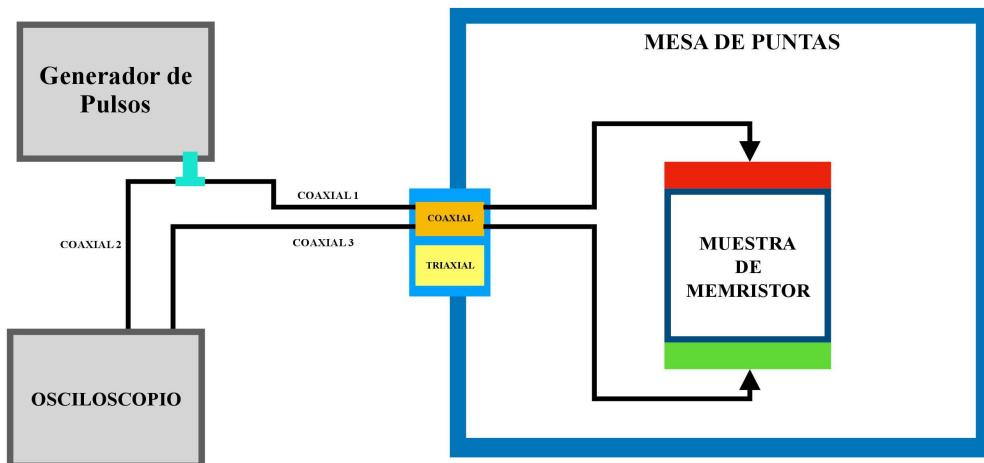


Figura 20. Representación esquemática de la conexión realizada entre el generador de pulsos, osciloscopio y la mesa de puntas. El color turquesa representa la conexión en ‘T’. El color rojo representa el electrodo superior del memristor. En cambio, el color verde se corresponde con el electrodo inferior del memristor.

Las muestras que se utilizan son memristores bipolares. Por lo tanto, se imponen los siguientes requisitos:

- Para producir el evento de SET se debe aplicar una tensión de polaridad positiva.
- Para efectuar el evento de RESET se suministra la misma tensión, pero de polaridad opuesta.

Para cumplir con estos requisitos, se aplica una señal en rampa de la misma forma que la utilizada en el SPA mediante el generador de pulsos, que tendrá una amplitud de 3V y una frecuencia de 10 Hz. Con esta amplitud, se consigue aplicar una V_{SET} de 1.5V y una V_{RESET} de -1.5V para efectuar los eventos correspondientes. La impedancia de carga conectada a la salida del generador de pulsos es de $1M\Omega$.

Dos comandos de mucha utilidad para efectuar esta señal han sido: “*APPL*” y “*FUNC*”, el primero permite aplicar el tipo de señal que se desea con su amplitud y frecuencia correspondiente. Mientras que el segundo permite editar las características de la señal que se aplica. La secuencia de pasos para programar esta señal se puede ver en la figura 21.

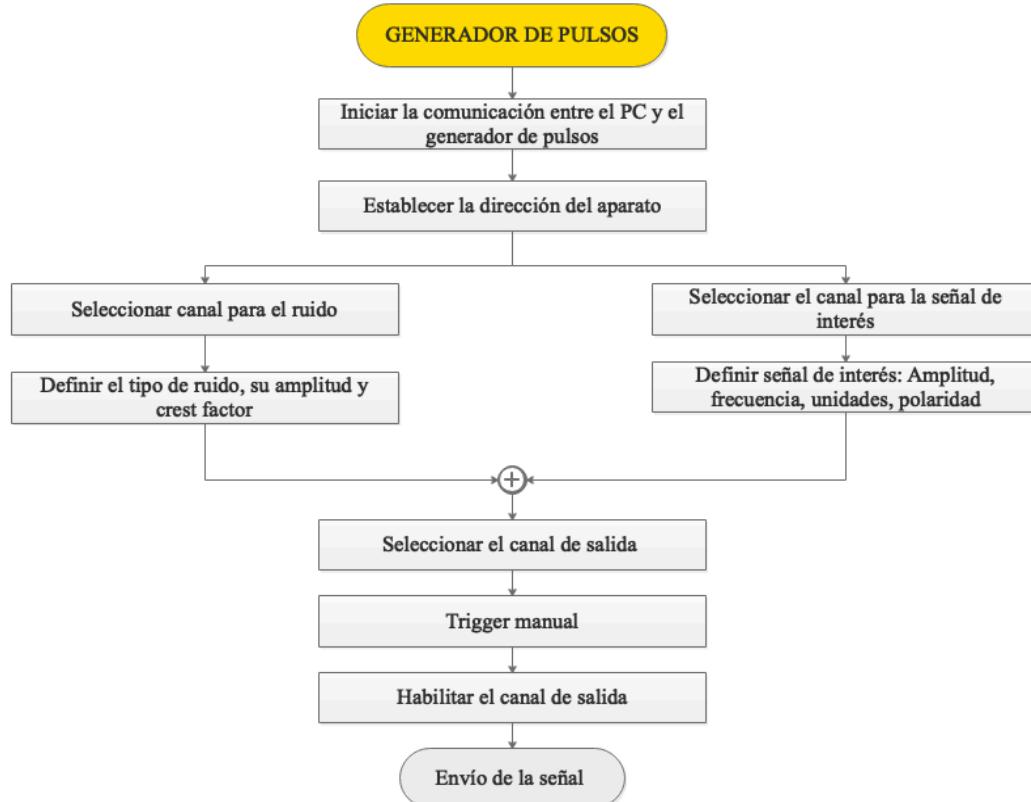


Figura 21. Diagrama de flujo para la representación de los pasos que se han seguido para realizar esta señal de interés que se enviará al generador de pulsos a través de GPIB.

La ventaja de utilizar el generador de pulsos en lugar del SPA para esta etapa es porque este generador nos permite generar el ruido que se sumará internamente a la señal que se programa, como se puede ver en el diagrama de flujo de la figura 21. Definiendo este ruido por su amplitud, offset y por el canal seleccionado. Un parámetro que nos permite editar este ruido que se desea aplicar, es el crest factor.

El crest factor [34] permite precisar cuan picudo será el ruido y se define como la relación entre el voltio pico (V_p) y el valor eficaz (V_{RMS}), como se puede observar en la expresión (5).

$$\text{Crest Factor} = \frac{V_p}{V_{RMS}} \quad (5)$$

Si:

\uparrow Crest Factor $\rightarrow \downarrow V_{RMS} \rightarrow$ **Más estrecha y picuda será la señal**

\downarrow Crest Factor $\rightarrow \uparrow V_{RMS} \rightarrow$ **Más ancha y menos picuda será la señal**

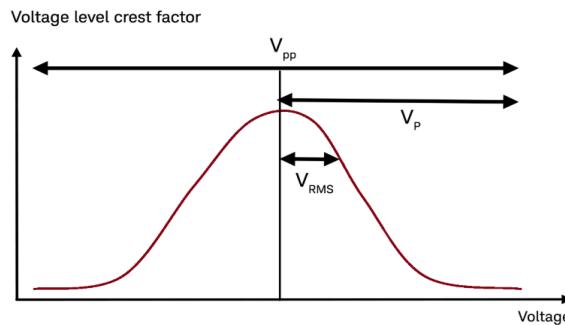


Figura 22. Representación de los parámetros para la definición de la relación del Crest Factor [34].

Este parámetro se utiliza a través de seleccionar una densidad de probabilidad (PDF), la cual especifica una distribución gaussiana. La siguiente línea de código se utiliza como ejemplo para definir el crest factor del ruido: “`fprintf(pg2, ‘:FUNC2:NOIS:PDF2’)`”. Aplicando esta determinada densidad de probabilidad (PDF2), se debe mirar el manual del equipo para conocer el valor de crest factor que corresponde.

Una vez definido el crest factor del ruido, se procede a sumar internamente este ruido a la señal de interés. En este caso el generador de pulsos solo tendrá una única salida, que será la suma resultante del ruido y la señal deseada, que posteriormente se enviará tanto a la muestra del memristor como al osciloscopio por medio de los cables coaxiales, cada envío se realizará manualmente (presionando el botón ‘Man’ del generador de pulsos).

El osciloscopio, como se puede ver en la figura 20, se pondrá en serie a la mesa de puntas con el objetivo que sea el aparato de medida, para medir las tensiones que provienen de la muestra de memristor. Es necesario realizar una configuración adecuada para que el

osciloscopio actué como aparato de medida y que sea capaz de capturar cada evento que se produzca en el memristor por acción de la señal aplicada por el generador de pulsos.

Cuatro aspectos importantes que se destacan de la configuración sobre el osciloscopio son:

- Este aparato cuenta con un sistema operativo, en el que se encuentra instalado Matlab, por lo tanto, es posible realizar su configuración sin necesidad de un PC externo. La diferencia con los anteriores instrumentos (SPA y generador de pulsos) radica que el osciloscopio se debe llamar a sí mismo, mediante la especificación de su puerto por defecto.
- Es necesario realizar una reserva inicial de memoria, porque si se le permite al osciloscopio elegir el número de puntos para que este seleccione la profundidad la memoria más optima puede acabar afectando a la hora de realizar el análisis de los datos que se obtengan. Derivando en bloqueos del programa Matlab por la gran cantidad de puntos que se han adquirido.
- En este caso se ha trabajado únicamente con dos canales del osciloscopio, por el canal 1 se recibe las tensiones provenientes de la muestra del memristor y por el canal 2 llega la señal que se envía desde el generador de pulsos. Por lo tanto, es necesario establecer un nivel de trigger para cada canal. El nivel de trigger del canal 1 es muy importante para que el osciloscopio sea capaz de capturar los distintos eventos que se produzcan en la muestra. Cuando se supera este nivel de trigger, el osciloscopio captura este evento.
- Cada uno de los eventos producidos, será una medida realizada a la muestra de memristor, entonces es necesario guardar cada evento, tanto de la señal que se envía a la muestra (V_{in}) como la señal que se recoge de la muestra (V_{out}). Se ha decidido guardar cada evento en un archivo ‘bin’. Este formato [28] ofrece ventajas en cuanto al espacio que ocupa cada fichero y velocidad de guardado.

En la figura 23 se presenta un diagrama de flujo sobre la configuración que se ha realizado al osciloscopio teniendo en cuenta los cuatro aspectos mencionados anteriormente.

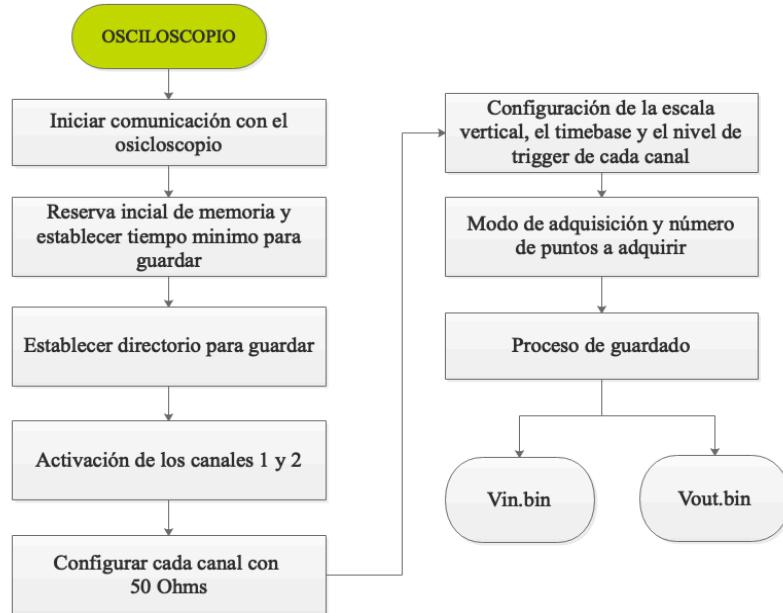


Figura 23. Representación de la configuración realizada en el osciloscopio para capturar y guardar el evento.

Para el caso del proceso de adquisición se destaca la utilización del modo en tiempo real y estableciendo el número de puntos a 100000 por cada medida a realizar. En la figura 24 se puede observar el proceso de la realización de medidas.

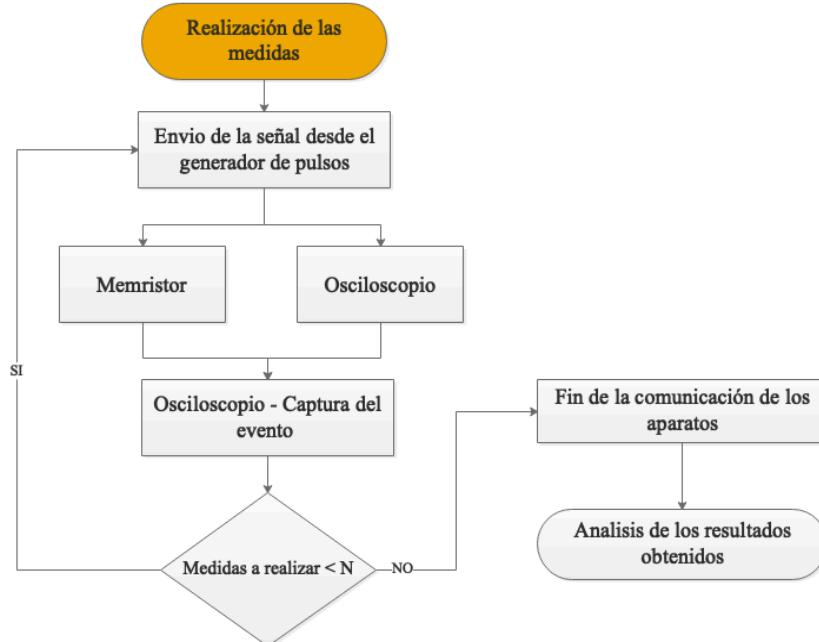


Figura 24. Diagrama de flujo para la representación de la etapa de la realización de las medidas.

Como se observa en la figura 24, 'N' corresponde al número de medidas que se desean realizar. En el siguiente capítulo se especificarán los resultados experimentales obtenidos.

CAPÍTULO 4 - ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LAS MEDIDAS

En el actual capítulo se explicará en primer lugar como se ha procedido a analizar los datos resultantes de las medidas. Justificando los procesos a los que se someten los datos obtenidos con la finalidad de realizar una estadística de cómo afecta el ruido en la muestra. En segundo lugar, se presentarán los resultados correspondientes a las dos etapas efectuadas sobre el procedimiento de medida.

4.1 Procedimiento de análisis

Los datos obtenidos de las medidas se utilizarán para elaborar una estadística de cómo influye el ruido en el comportamiento de la muestra mediante la comparación con el caso sin ruido. Esto permitirá verificar si existe algún tipo de ruido con una determinada amplitud que provoque el fenómeno de resonancia estocástica y a su vez ayude a mejorar el comportamiento del dispositivo memristor disminuyendo su variabilidad.

En primer lugar, los datos de las medidas están guardados en archivos ‘.bin’ por lo tanto presenta el inconveniente que este formato tiene los datos codificados por parte del fabricante. Como solución se encontró en la página web del fabricante Keysight una función implementada en Matlab [35] que permite descodificar los datos del archivo ‘bin’ a formato texto. Esta función devuelve dos vectores, el primero es un vector de tiempos ‘X’ con el tiempo de cada punto de la señal. Mientras que el segundo vector ‘Y’ contiene los diferentes valores en voltios de la señal en cada punto [28].

En segundo lugar, es necesario crear una función que en su interior incluya a la función implementada por el fabricante para poder traducir los datos y separar los vectores de tiempo y tensión. Esta función creada es aplicada para los tres motivos siguientes:

1. Se utiliza para eliminar los ceros que capta inicialmente el osciloscopio tanto en la señal que se envía a la muestra como la señal que se recoge de la muestra. Con el objetivo de quedarse solamente con las posiciones donde están las dos señales. Esto se consigue mediante el recorte de la señal en las posiciones de interés. Se debe destacar que estas posiciones han sido optimizadas para cada caso. En la figura 25, se puede observar el antes y el después de haber aplicado este proceso en la señal.

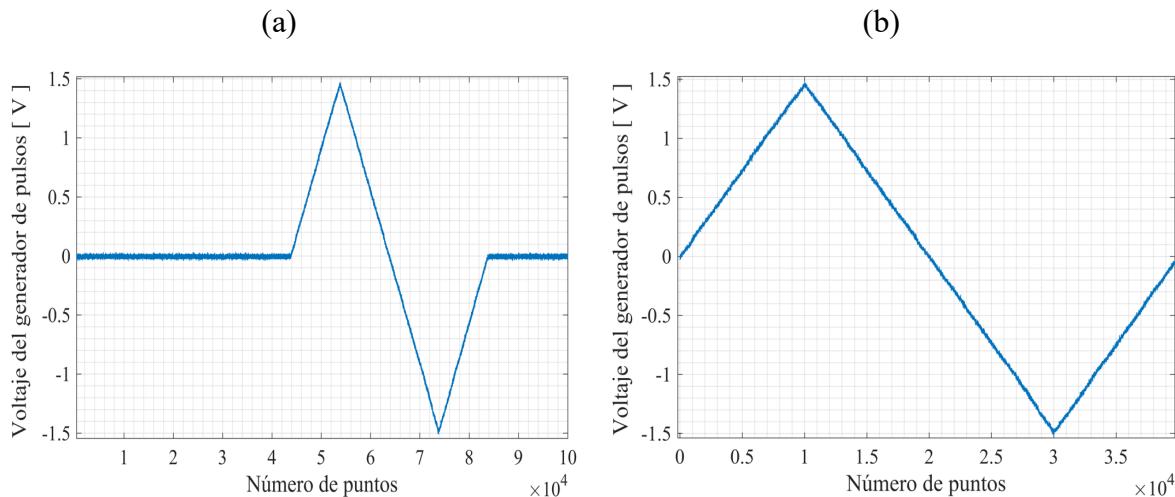


Figura 25. En (a) se puede observar la señal que se envía a la muestra (V_{in}) y es captada inicialmente por el osciloscopio, con los correspondientes 100000 puntos que se había establecido para el proceso de adquisición. En cambio, en (b) se puede contemplar la misma señal después de aplicar el proceso para la eliminación de los ceros que capta inicialmente el osciloscopio, quedándose con la señal de interés con un número de 39901 puntos.

2. Para conocer la corriente que ha circulado a través del memristor, que es proporcional a la tensión de salida procedente de la muestra (V_{out}). Por lo tanto, se puede determinar la corriente por medio de la aplicación de la ley de Ohm. Como se puede ver en la expresión (6).

$$I_{\text{Muestra}} = \frac{V_{\text{out}}}{R_{\text{Osciloscopio}}} \quad (6)$$

3. Se utiliza para poder verificar la frecuencia de la señal, a través del periodo (la diferencia entre el tiempo final y el tiempo inicial) de la misma señal.

En tercer lugar, se establecen dos puntos de tensiones de lectura. El primer punto corresponde al SET ($V_{\text{SET ON}}$) con valor a 1V y el segundo para el RESET ($V_{\text{RESET OFF}}$) con un valor de -1.25 V (figura 26). Estos dos puntos de lectura permiten conocer los valores exactos tanto de la corriente como de la tensión aplicada en estas dos posiciones. Estos dos valores (tensión y corriente) serán de gran ayuda para poder calcular los valores resistencia del RESET ($R_{\text{MEM OFF}}$) y del SET ($R_{\text{MEM ON}}$) mediante la ley de Ohm.

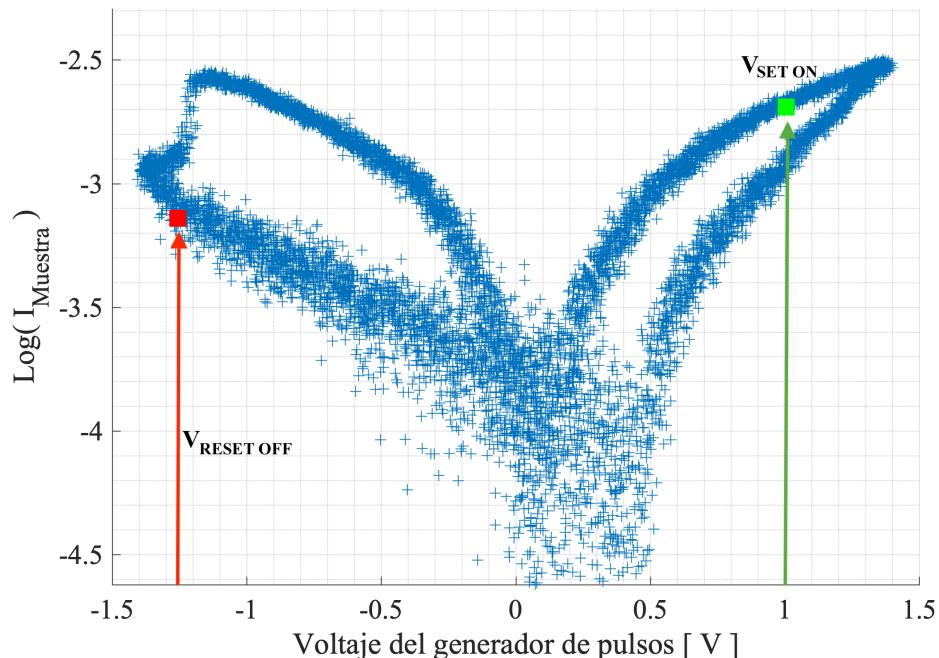


Figura 26. Curva I-V del memristor, en ella se puede ver la ubicación de los dos puntos establecidos. El cuadrado de color rojo, corresponde a $V_{RESET\ OFF}$ con una tensión de $-1.25V$. En cambio, el cuadrado de color verde pertenece a $V_{SET\ ON}$ con una tensión de $1V$.

En cuarto lugar, para poder analizar el efecto del fenómeno de la resonancia estocástica en la muestra, se ha tomado como parámetro de análisis la relación entre los valores medios de $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$ en función de las amplitudes de ruido aplicado.

4.2 Resultados

Seguidamente en esta sección se presentan los resultados que se han obtenido correspondientes a las dos etapas realizadas por medio de tablas y gráficas. Esto permitirá hacer comparaciones entre las medidas con y sin ruido, para ver que efecto tiene en la muestra.

4.2.1 Etapa 1

En primer lugar, en esta fase se ha realizado el procedimiento de medida en la misma muestra, primero enviando la señal sin ruido y posteriormente a esta señal se le ha añadido las amplitudes de ruido que se deseaban aplicar.

Para esta etapa se decide utilizar una tensión de $1.5V$ para producir el SET y una tensión de $-1.5V$ para el RESET con el objetivo de conseguir realizar el resistive switching. De esta manera se realizarán 50 ciclos de medida con esta señal de amplitud pico a pico de $3V$ y una frecuencia de $10\ Hz$. Un valor inicial de crest factor de 4 y después con un valor de 7.

Con estas condiciones se elaboran dos grupos de medidas (GM) con sus respectivos ruidos. Los 50 ciclos de la señal más un ruido de 100mV se puede observar en la figura 27a.

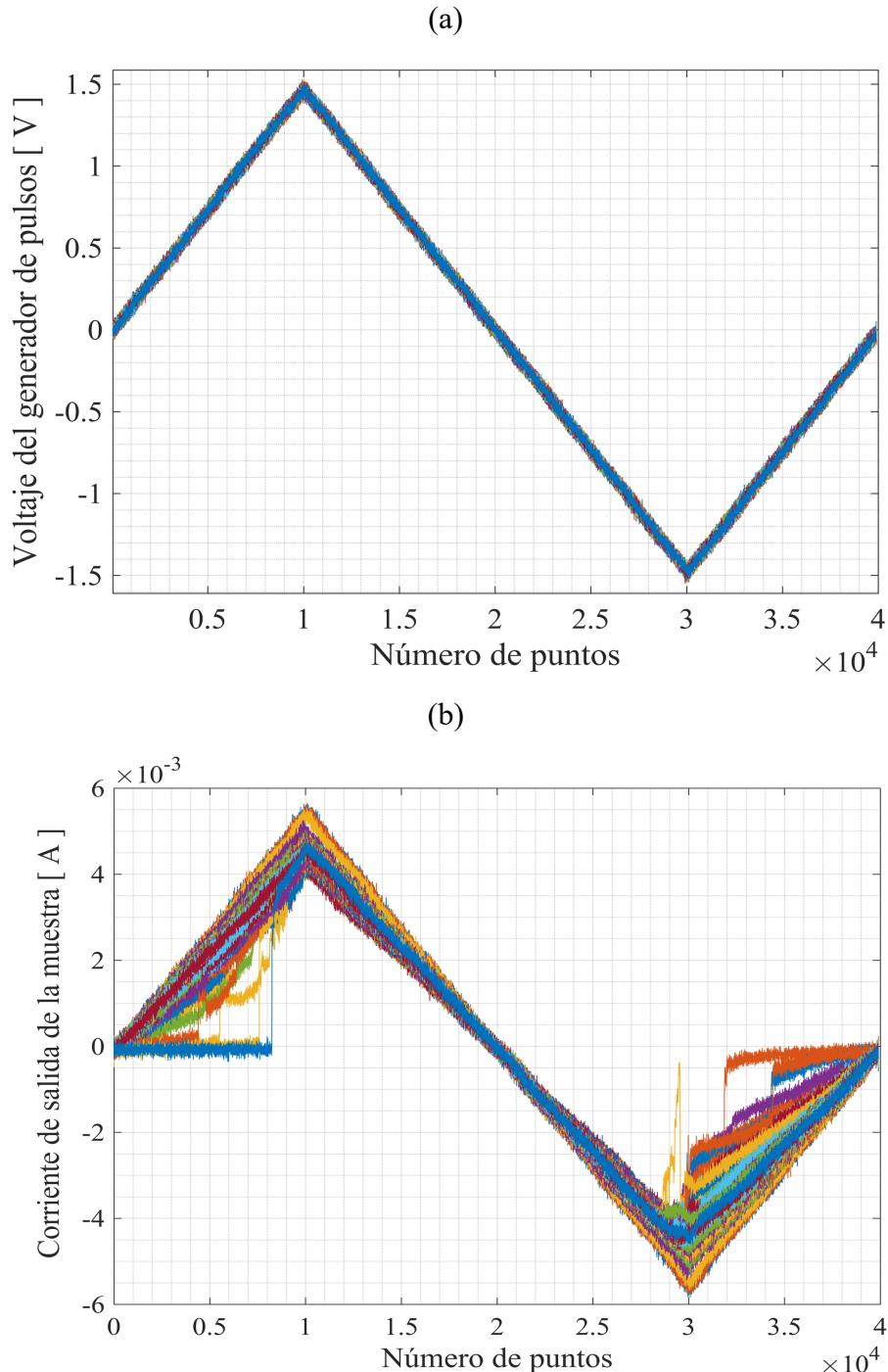


Figura 27. En (a) se puede ver los 50 ciclos superpuestos de la señal aplicada más una amplitud de ruido de 100mV que se envía a la muestra (V_{in}). En (b) se observa los 50 ciclos de señal correspondiente a la corriente que ha circulado por la muestra para la aplicación de 100mV de ruido. A su vez se visualiza el rango de todos los posibles valores que puede tomar la corriente en cada uno de los 39901 puntos.

En la figura 28 se puede observar el efecto que ha producido el ruido en la muestra por medio de la evolución de la relación entre $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$ en función de la amplitud del ruido aplicado.

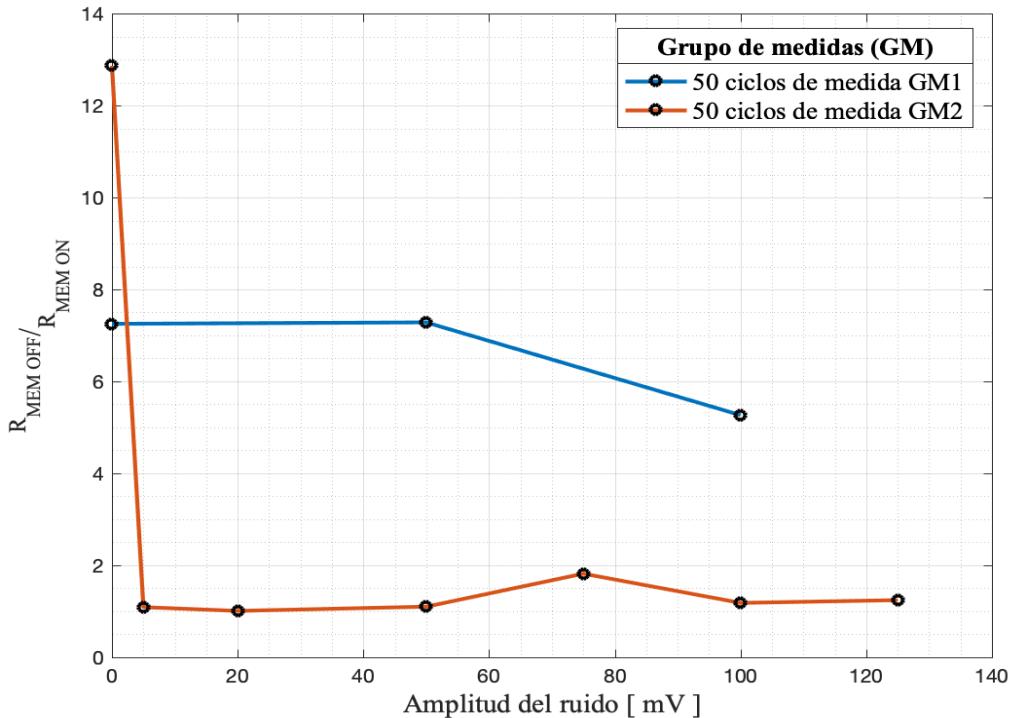


Figura 28. Evolución de $\frac{R_{MEM\ OFF}}{R_{MEM\ ON}}$ en función de la amplitud del ruido aplicado para cada uno de los grupos de medidas realizados. Cada punto de esta relación representa los 50 ciclos realizados para cada condición de ruido y de la misma manera para el caso sin ruido.

Como se puede observar en la figura 28, para los primeros 50 ciclos de medidas realizados del grupo 1 no se puede observar el fenómeno de resonancia estocástica debido a la causa que no hay una tendencia clara de lo que se desea observar.

Para los segundos 50 ciclos de medida del grupo 2, se puede observar que para el caso sin ruido se tiene una ventana de medida grande, lo que indica que la $R_{MEM\ OFF}$ es 12.87 veces más grande que la $R_{MEM\ ON}$. En cambio, todos los ruidos aplicados exceptuando el ruido de 75mV han provocado la ruptura de la muestra. Lo que significa que la $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$ son prácticamente iguales. En este caso no se podría distinguir entre el nivel superior e inferior de la ventana de medida.

A continuación, se presenta en la figura 29 la evolución que ha tenido la ventana de resistencias tanto para el caso sin ruido como para cada condición de ruido que se ha aplicado en el grupo 2.

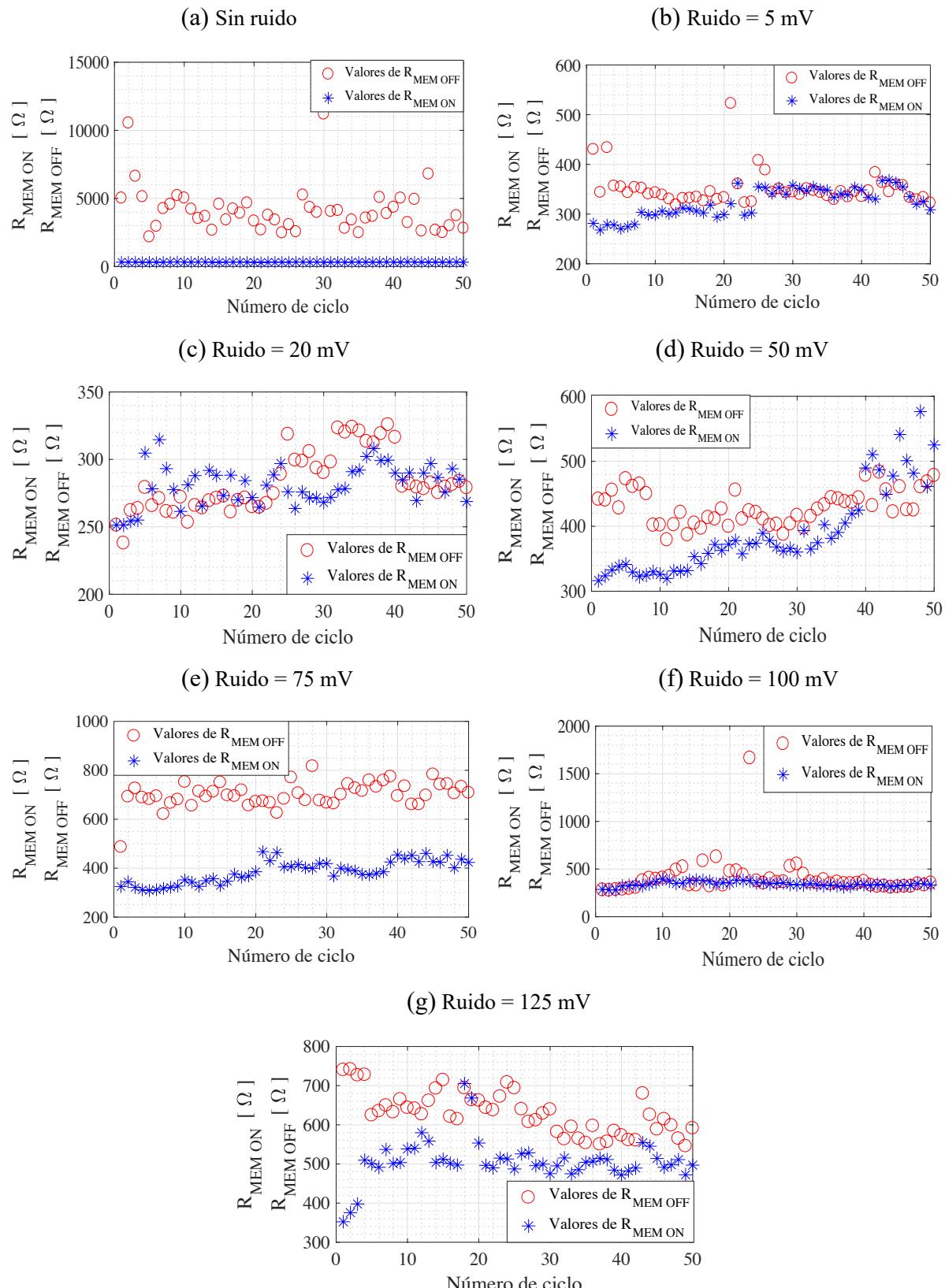


Figura 29. Evolución de la ventana de resistencias para los 50 ciclos de medida que se han realizado en la muestra con y sin ruido. En (a) corresponde al caso sin ruido. En (b) es ruido de 5mV. En (c) con ruido de 20mV. En (d) se trata de un ruido de 50mV. En (e) es para un ruido de 75mV. En (f) es un ruido de 100mV. Finalmente (g) corresponde al caso de 125mV.

En la figura 29 se puede observar que, para el caso sin ruido, la ventana de resistencias es grande. Seguidamente para los primeros ruidos (5mV, 20mV y 50mV) los valores correspondientes de la $R_{MEM\ OFF}$ se reducen considerablemente, produciendo que sus valores para los 50 ciclos son muy parecidos a los valores de $R_{MEM\ ON}$.

Esto afecta directamente que la ventana de resistencias se cierre y no permita distinguir claramente entre el nivel superior ($R_{MEM\ OFF}$) y el nivel inferior ($R_{MEM\ ON}$) indicando que la muestra está rota.

En el caso del ruido de 75mV sucede todo lo contrario, gracias al efecto que produce esta amplitud de ruido se consigue recuperar la muestra y se vuelve abrir nuevamente la ventana de resistencias. En cambio, para los últimos ruidos (100mV y 125mV) se cierra otra vez esta ventana indicando que la muestra de memristor finalmente se ha estropeado.

En la tabla 1, se pueden observar para cada caso: los valores medios, las desviaciones estándar y las relaciones entre $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$. Estos valores de relación son los que están representados en la figura 28 para el grupo de medidas 2 (GM2).

Amplitud de ruido (mV)	$R_{MEM\ OFF}$ MEDIA (Ω)	$R_{MEM\ OFF}$ DESVIACIÓN (Ω)	$R_{MEM\ ON}$ MEDIA (Ω)	$R_{MEM\ ON}$ DESVIACIÓN (Ω)	$\frac{R_{MEM\ OFF}}{R_{MEM\ ON}}$
0	4150.2	1734.1	322.5831	8.5668	12.8654
5	351.3622	34.4294	322.7473	29.1538	1.088
20	283.2790	22.1992	281.0192	14.7409	1.008
50	429.2710	26.6283	390.4629	66.1410	1.099
75	701.1731	51.0412	385.7402	46.5194	1.817
100	404.4761	198.9303	342.2526	25.0473	1.182
125	630.2024	53.7328	507.4274	54.3684	1.242

Tabla 1. Valores correspondientes a la media y desviación estándar para $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$ de cada caso. Junto con el valor de la relación entre estos dos niveles de resistencia en función de la amplitud de ruido aplicado.

Mirando la tabla 1, se puede observar que, hay ciertas amplitudes de ruido que consiguen disminuir la dispersión en la $R_{MEM\ OFF}$ o $R_{MEM\ ON}$ pero esto es debido a que ambos niveles presentan valores medios próximos. Pero en el caso de 75mV se consigue abrir la ventana de resistencias al existir una separación evidente entre ambos niveles.

Vistos los resultados que se ha conseguido hasta el momento, se decide cambiar el propósito de la señal que se envía a la muestra. Con el objetivo que el ruido añadido en este caso a la señal de interés sea capaz de provocar el fenómeno del resistive switching. Por lo tanto, la amplitud pico a pico de la señal aplicada se reduce a 2.4V (con una tensión de +1.2V para el SET y -1.2V para el RESET). De esta manera se realizarán 20 ciclos de medida con la amplitud de esta señal anteriormente mencionada y con una frecuencia de 10 Hz.

A continuación, en la figura 30 se puede observar cuál ha sido el efecto que se ha producido en la muestra del memristor por medio de la evolución que presenta la relación entre $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$ en función de la amplitud del ruido aplicado.

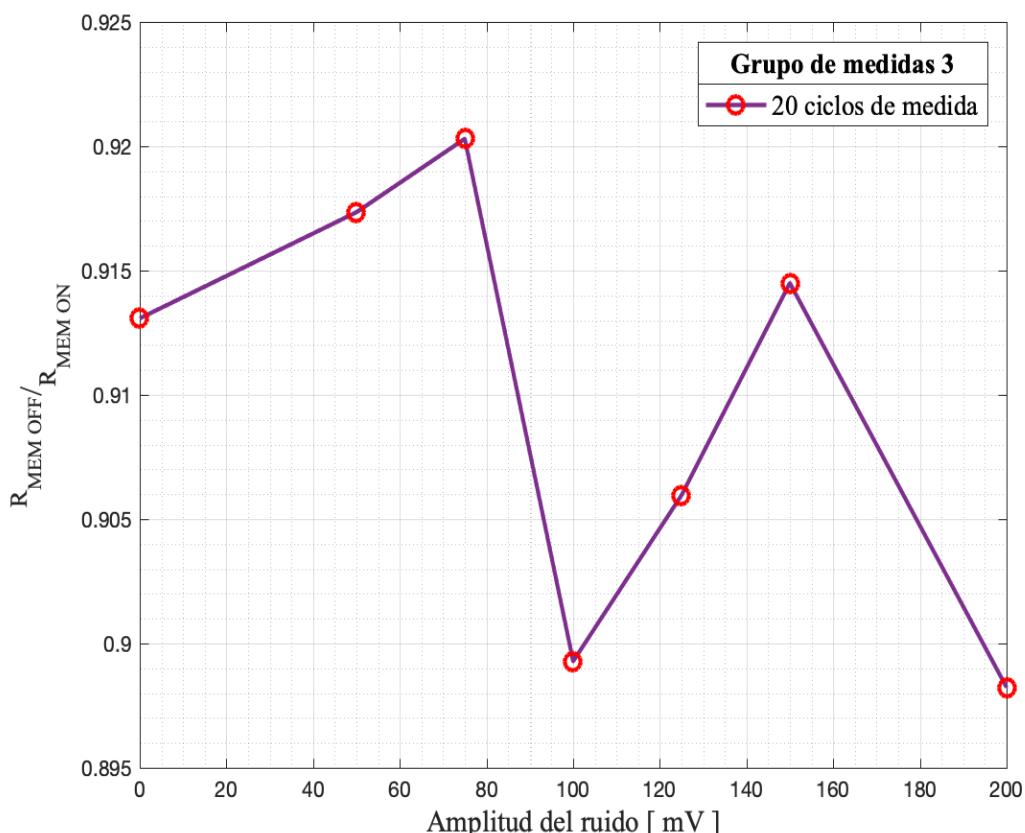


Figura 30. Evolución de $\frac{R_{MEM\ OFF}}{R_{MEM\ ON}}$ en función de la amplitud del ruido aplicado para el grupo de medidas 3. Cada punto de esta relación representa los 20 ciclos realizados para cada condición de ruido y de la misma manera para el caso sin ruido.

Como se puede comprobar en la figura 30, las diferentes amplitudes de ruido que se han utilizado en este caso permiten verificar que la muestra se ha dañado debido a la proximidad de cada punto de esta relación al valor de 1. Cuanto más cerca se este del '1', indica que ambos niveles ($R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$) son prácticamente iguales. Por lo tanto, la ventana de resistencias se cierra, lo que provoca que no se pueda distinguir entre ambos niveles.

Por consiguiente, se puede evidenciar que esta forma de realizar el procedimiento de medida en la misma muestra y posteriormente incrementar la amplitud del ruido ocasiona que se llegue a dos tipos de situaciones:

- ◆ Que no exista una tendencia clara para poder observar el fenómeno de resonancia estocástica.
- ◆ La muestra se deteriore y finalmente se acabe dañando por completo.

4.2.2 Etapa 2

Para esta fase se decide cambiar la forma de realizar el procedimiento de medida en la muestra. Consistirá que cada una de las medidas con y sin ruido se efectuarán en muestras frescas. Este método será más laborioso en el sentido que al tratarse de muestras nuevas es necesario realizar el forming antes de proceder con las medidas.

En esta etapa se realizarán 30 ciclos de medida de cada caso, este número de ciclos será suficientemente representativo para elaborar una estadística del efecto que ocasiona el ruido en la muestra. Con esta finalidad se utilizará una señal con una amplitud pico a pico de 2.8V (+1.4V para el SET y -1.4V para el RESET) con una frecuencia de 10 Hz.

Los resultados que se obtienen de este experimento efectuado se pueden contemplar en la figura 31, mediante la evolución que presenta la relación entre $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$ en función de la amplitud del ruido aplicado.

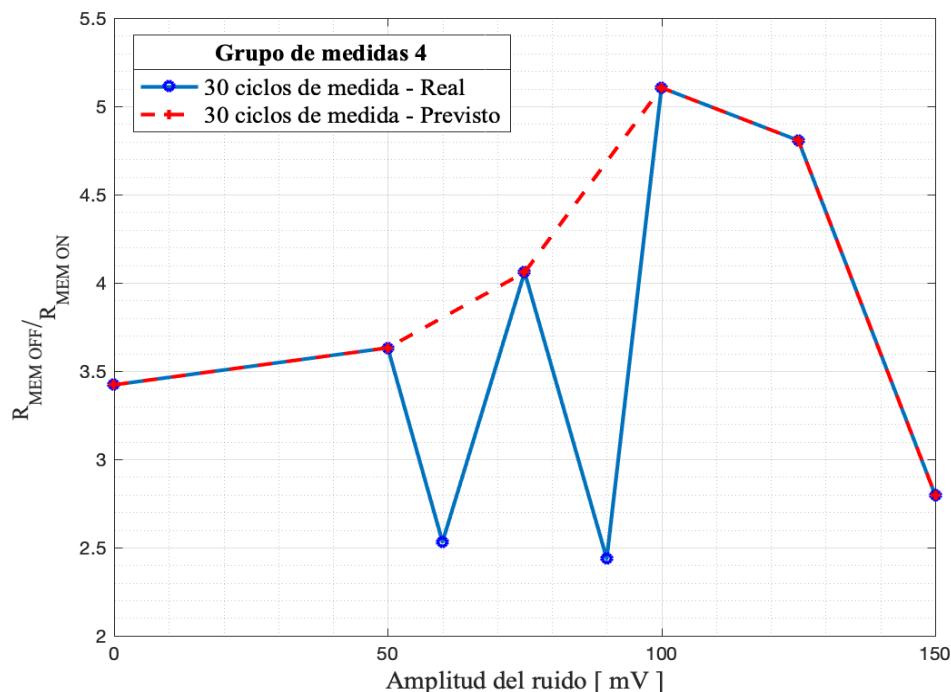


Figura 31. Evolución de $\frac{R_{MEM\ OFF}}{R_{MEM\ ON}}$ en función de la amplitud del ruido aplicado para el grupo de medidas 4. Cada punto de esta relación representa los 30 ciclos realizados para cada condición de ruido y de la misma manera para el caso sin ruido.

De la figura 31 se observa que la curva de color azul corresponde a los resultados que se obtienen en este experimento. En cambio, la curva de color rojo discontinua muestra la tendencia que se esperaba de la evolución de esta relación, si se compara con el caso sin ruido,

esta relación entre $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$ ha ido aumentando a medida que se ha incrementado la amplitud de ruido hasta alcanzar un ruido de 100mV, donde se produce el pico (punto máximo) de resonancia estocástica. Para esta amplitud de ruido se consigue que la $R_{MEM\ OFF}$ sea 5.11 veces más grande que $R_{MEM\ ON}$ (tabla 2). Por lo tanto, se podrá diferenciar claramente ambos niveles en este punto.

También de esta figura se puede evidenciar que los puntos correspondientes a los ruidos de 60 y 90mV se salen de la tendencia prevista. A continuación, se pueden ver cuatro gráficas que pertenecen al ruido de 60mV y serán de gran ayuda para demostrar cómo ha afectado este ruido en este punto de la relación de $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$ de la figura 31.

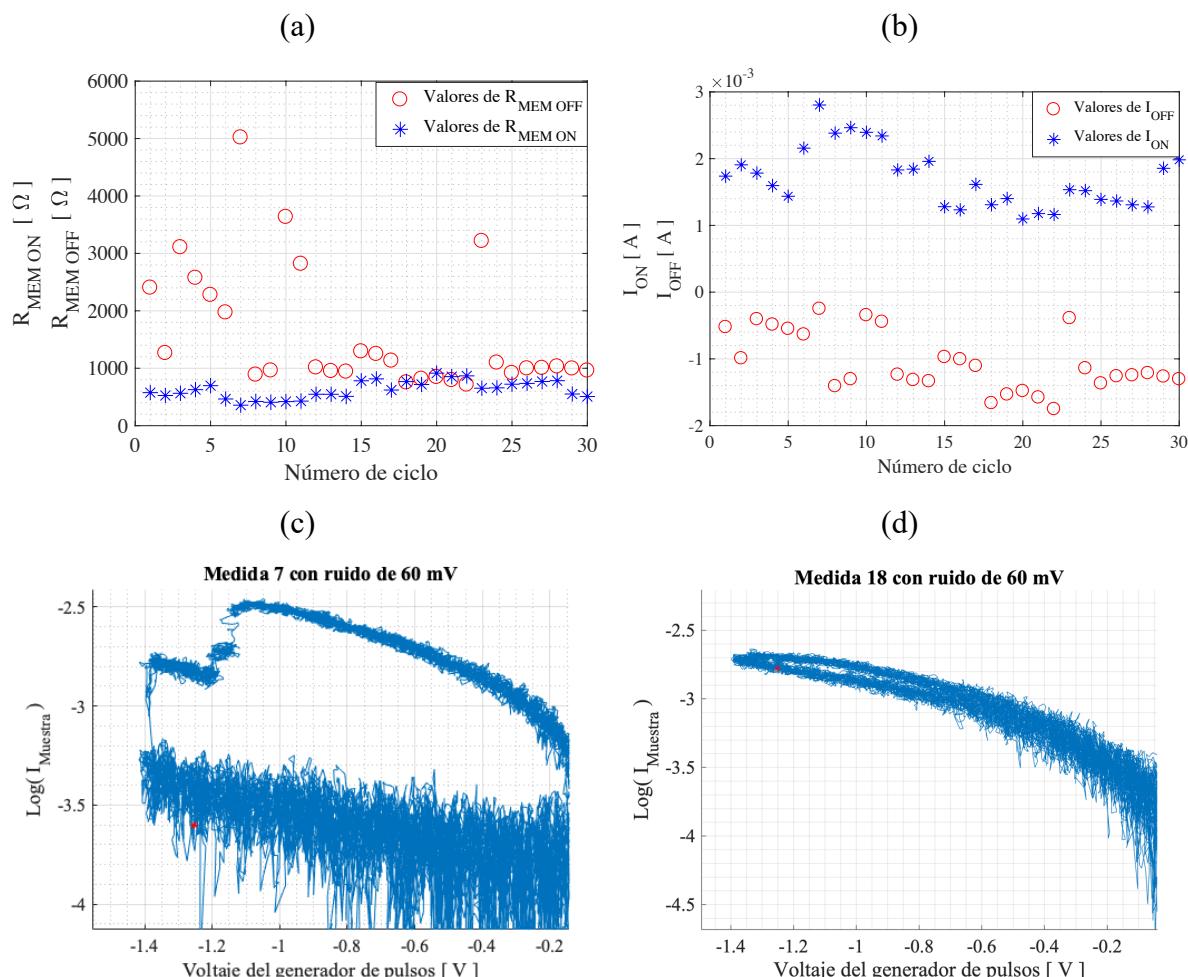


Figura 32. Las cuatro gráficas correspondientes al ruido de 60mV aplicado a la muestra. En (a) se puede ver los valores resistencia de $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$ en los 30 ciclos de medida realizados. En (b) corresponde al nivel de corriente para cada ciclo de medida en la muestra. En (c) se observa la ventana de medida del RESET del séptimo ciclo de medida efectuado, donde el eje 'Y' corresponde al valor absoluto de la corriente en escala logarítmica. En (d) pertenece a la ventana de medida del RESET de la medida número 18 producida en el memristor.

En la figura 32a, se puede evidenciar que para la medida número 18, el valor de $R_{MEM\ OFF}$ (752.30Ω) y de $R_{MEM\ ON}$ (768.042Ω) son prácticamente iguales. Esto es debido que la corriente I_{OFF} (-0.00166 A) y I_{ON} (0.00131 A) son quasi iguales en valor absoluto en este ciclo. Los niveles de corriente se pueden ver la figura 32b. Este mismo fenómeno ocurre para las medidas 19, 20, 21 y 22, donde los valores $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$ son muy parecidos.

Se puede evidenciar que desde la medida 25 hasta la 28 (figura 32a), ocurre que los valores de los dos niveles resistencia se diferencian únicamente por una distancia aproximada de 200Ω . En cambio, si compara con las medidas 12, 13 ,14, 29 y 30, estos dos niveles resistencia tienen una distancia entre ellos, de aproximadamente 400Ω .

Comparando la medida número 7 con la medida número 18 (figura 32a), se puede observar que la $R_{MEM\ OFF}$ presenta un valor de 5018.24Ω y la $R_{MEM\ ON}$ 357.09Ω . Esto permite disponer de una ventana de medida grande, como se puede visualizar en la figura 32c.

El caso contrario se encuentra en la medida número 18, con los valores de resistencia muy parecidos (anteriormente mencionados), ocasiona que la ventana de medida se cierre prácticamente y no se pueda diferenciar claramente entre ambos niveles, como se puede observar en la figura 32d.

Por lo tanto, todas las contribuciones de estos sucesos mencionados anteriormente para el caso de 60mV de ruido, han provocado que el valor medio de $R_{MEM\ OFF}$ disminuya. De forma consecutiva, este parámetro está en el numerador de la relación entre $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$ lo que ocasiona que esta relación se reduzca considerablemente. Si se compara con el caso sin ruido y los demás ruidos exceptuando el ruido de 90mV, esta relación se degrada para esta amplitud de ruido.

En la figura 33, se pueden observar las cuatro gráficas que pertenecen al ruido de 90mV, que servirán para demostrar el efecto que ha producido este ruido en el punto correspondiente de la relación de $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$ de la figura 31.

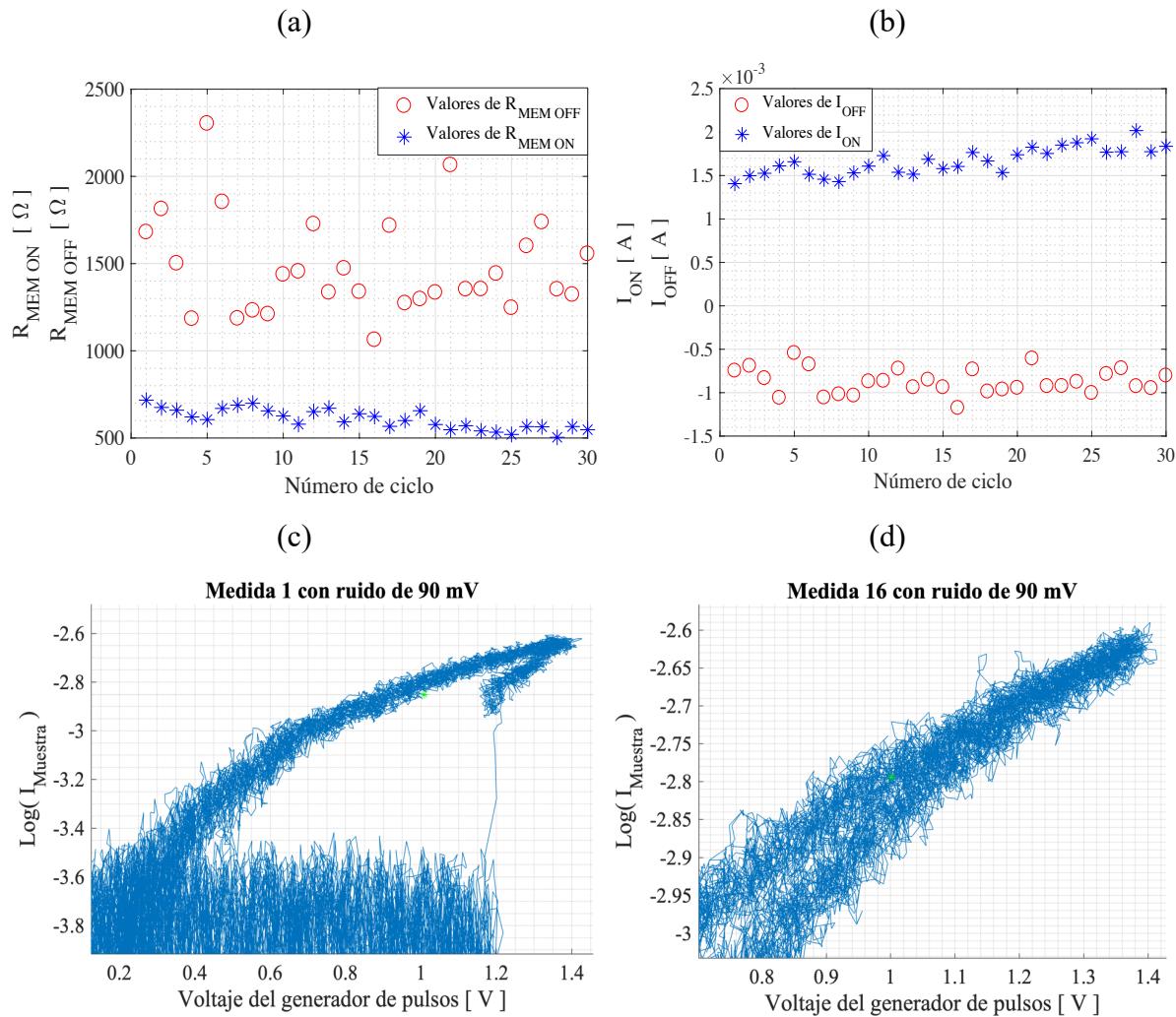


Figura 33. En (a) se puede ver los valores resistencia de $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$ en los 30 ciclos de medida realizados. En (b) corresponde al nivel de corriente para cada ciclo de medida en la muestra. En (c) se observa la ventana de medida del SET del primer ciclo de medida efectuado, donde el eje 'Y' corresponde a la corriente en escala logarítmica. En (d) pertenece a la ventana de medida del SET de la medida número 16 producida en el memristor.

De la figura 33a se puede notar que la $R_{MEM\ ON}$ tiene una tendencia a disminuir su valor a medida que se van realizando los ciclos de medida. De forma inversa sucede en la figura 33b donde la corriente I_{ON} tiene en cambio una tendencia a incrementar su valor, lo que indica que la muestra se degrada con el número de ciclos.

También se puede evidenciar que el valor medio de $R_{MEM\ OFF}$ disminuye en comparación a los demás ruidos aplicados (tabla 2). Esto provoca que la relación entre $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$ para esta amplitud de ruido sea incluso algo más baja que el caso de 60mV de ruido (tabla 2).

En la figura 33a se evidencia que, para el primer ciclo realizado en el memristor, presenta una separación entre ambos niveles de aproximada de $1\text{K}\Omega$. Esto ocasiona que la ventana de medida del SET sea grande, permitiendo distinguir entre ambos niveles como se puede ver en la figura 33c. En cambio, para el ciclo número 16 se ha reducido la separación entre los dos niveles, causando que la ventana de medida del SET prácticamente se cierre (figura 33d).

En la tabla 2, se pueden observar para cada caso: los valores medios, las desviaciones estándar y las relaciones entre $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$. Estos valores de relación son los que están representados en la figura 31 para el grupo de medidas 4.

Amplitud de ruido (mV)	$R_{MEM\ OFF}$ MEDIA (Ω)	$R_{MEM\ OFF}$ DESVIACIÓN (Ω)	$R_{MEM\ ON}$ MEDIA (Ω)	$R_{MEM\ ON}$ DESVIACIÓN (Ω)	$\frac{R_{MEM\ OFF}}{R_{MEM\ ON}}$
0	1911.5	486.1855	558.5878	28.3810	3.4221
50	2034.3	447.8472	560.1761	26.1968	3.6315
60	1587.7	1065.3	627.1622	153.8993	2.5315
75	2051.4	565.3510	505.3510	387.7315	4.0594
90	1481.2	279.6762	607.7807	57.6445	2.4371
100	1965.1	508.9986	384.8889	16.7938	5.1058
125	2658.6	580.7839	553.0575	26.4266	4.8070
150	1598.2	500.5544	571.1223	28.7043	2.7984

Tabla 2. Valores de la media y desviación estándar correspondientes a $R_{MEM\ OFF}$ y $R_{MEM\ ON}$ de cada caso. Se incluye el valor de la relación entre estos dos niveles de resistencia en función de la amplitud de ruido aplicado.

A continuación, se muestra una representación de la curva característica I-V del memristor que se obtiene para el caso de 100mV de ruido del grupo de medidas 4. Para la parte del RESET se destaca que el eje 'Y' corresponde a los valores de corriente en valor absoluto. Esto puede verse en las figuras 32c y 32d, y de igual manera en la figura 34.

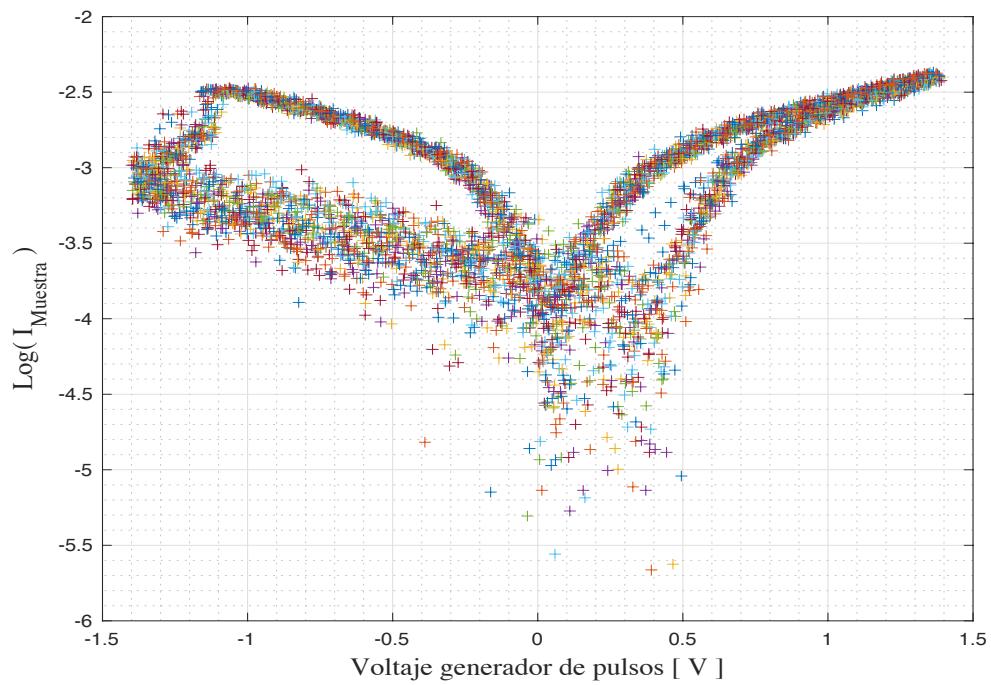


Figura 34. Representación de la curva característica $I-V$ del memristor para los 30 ciclos de medida realizados con ruido de 100mV.

En la figura 35a se presenta la evolución de la media de los valores de I_{ON} e I_{OFF} respecto a la amplitud de ruido que se aplica para este último grupo. Con el objetivo de poder contemplar cuál ha sido el efecto del ruido en relación con la variabilidad existente, se muestra el desarrollo de la desviación estándar en función del ruido aplicado como se puede evidenciar en la figura 35b.

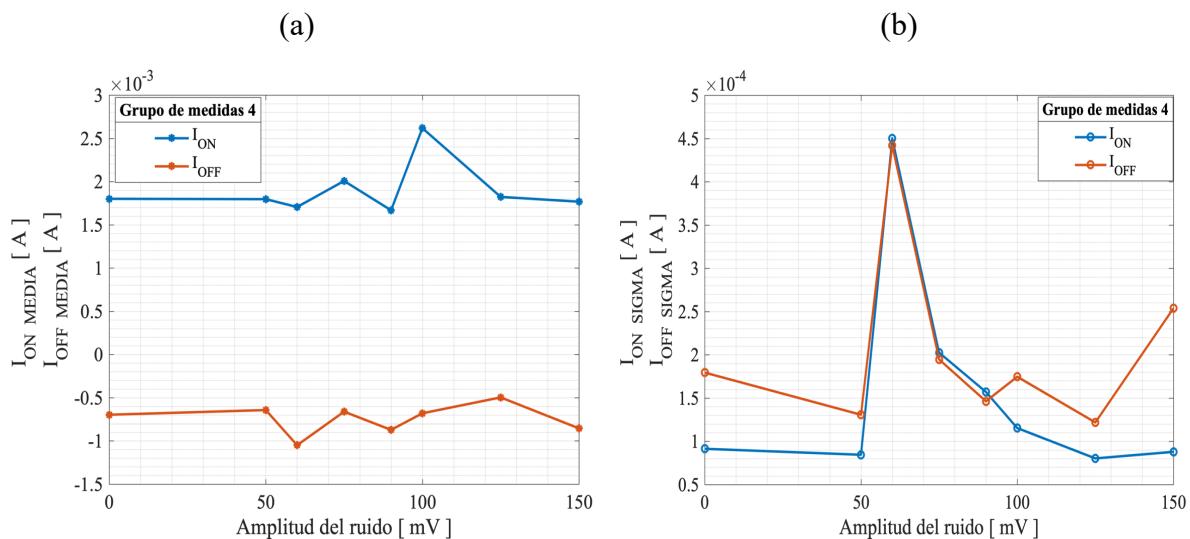


Figura 35. En (a) se puede observar la media de ambas corrientes para las diferentes amplitudes de ruido. En cambio, en (b) se puede ver cómo ha ido evolucionando la variabilidad de ambas corrientes en función de la amplitud del ruido aplicado.

Como se puede evidenciar en la figura 35a, la media de I_{ON} ha permanecido prácticamente constante tanto para el caso sin ruido como para los casos de 50mV y 150mV de ruido. En cambio, entre los ruidos utilizados de 60mV a 125mV, la media de I_{ON} e I_{OFF} ha ido aumentando o disminuyendo en comparación al caso sin ruido.

Observando la figura 35b, se puede apreciar que el ruido de 60mV ha provocado un aumento considerable de la dispersión en comparación al caso sin ruido. Para 100mV, que corresponde al pico de resonancia estocástica presenta por una parte una mayor una dispersión de I_{ON} , y una ligera disminución de su variabilidad en cuanto a I_{OFF} comparando ambas partes con el caso sin ruido.

Para un ruido de 125mV se evidencia que tanto para I_{ON} como para I_{OFF} se consigue disminuir la variabilidad existente, al compararlo con el caso sin ruido. Por lo tanto, con esto se obtiene un mejor comportamiento del memristor, a la vez que se logra una ventana de medida grande.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A partir de los resultados que se han obtenido en esta investigación sobre el efecto del ruido en el memristor, se presentan las siguientes conclusiones:

- Puedo manifestar que en la etapa 1 de los resultados solo se consigue llegar a dos situaciones, en la primera situación no hay una tendencia clara para poder observar el fenómeno de resonancia estocástica, mientras que en la segunda situación la muestra se daña por completo. Ambas situaciones se producen como consecuencia al cambio de ruido en el generador de pulsos.
- Con el método de medida realizado en la etapa 2 de los resultados se ha conseguido observar el fenómeno de resonancia estocástica en el memristor, presentando el punto máximo en 100mV de ruido.
- Se ha comprobado que la aplicación de una señal en rampa de amplitud pico a pico de 2.8V y una frecuencia de 10 Hz a la muestra, permite cerrar el filamento en el óxido para una tensión de +1.4V, mientras que para una tensión de -1.4V se logra abrir este filamento.
- Un suceso importante que destacar de los resultados de la etapa 2, es con relación al ruido de amplitud de 125mV, que añadido a esta señal en rampa de 2.8Vpp se logra disminuir la variabilidad existente mejorando el comportamiento del memristor, al mismo tiempo que se consigue una ventana de medida grande.

Sugiero que para próximas investigaciones se emplee el mismo procedimiento de medida descrito en la etapa 2 de los resultados. También recomiendo realizar más medidas con otras dimensiones de área del memristor y variar la frecuencia para observar que efectos más se pueden producir en el dispositivo.

REFERENCIAS

- [1] “Memorias FLASH (USB | Laby recupera tu disco duro,” 2015. [Online]. Available: <http://www.laby.es/blog/category/memorias-flash-usb/>. [Accessed: 04-May-2019].
- [2] “Tema 5: Organización de la memoria: memoria principal,” 2012.
- [3] “Guía de Memoria Flash,” 2006.
- [4] “¿Cuánto dura un USB y cómo puedo alargar su ciclo de vida?,” 2017. [Online]. Available: <https://www.usbpersonalizado.es/blog/cuanto-dura-usb/index.html>. [Accessed: 04-May-2019].
- [5] Katherine Bourzac, “La memoria flash seguirá encogiendo | MIT Technology Review,” 2011. [Online]. Available: <https://www.technologyreview.es/s/2196/la-memoria-flash-seguira-encogiendo>. [Accessed: 23-Apr-2019].
- [6] Alberto García, “ReRAM: la memoria que unificará el procesador y la RAM en un único chip,” 2017. [Online]. Available: <https://www.adslzone.net/2017/01/17/reram-la-memoria-unificara-la-procesador-la-ram-unico-chip/>. [Accessed: 23-Apr-2019].
- [7] Katherine Bourzac, “La memoria de memristores lista para la producción | MIT Technology Review,” 2010. [Online]. Available: <https://www.technologyreview.es/s/1253/la-memoria-de-memristores-lista-para-la-produccion>. [Accessed: 22-Apr-2019].
- [8] C. Dias, J. Ventura, and P. Aguiar, “Memristive-Based Neuromorphic Applications and Associative Memories,” in *Studies in Computational Intelligence*, vol. 701, 2017, pp. 305–342.
- [9] I. R. G. E. Chappotin, “Conferencia : El Memristor . Cuarto elemento perdido . Sumario ;,” no. 1971, pp. 1–7, 2018.
- [10] H. V. A. Gallardo and P. Titlacuatitla, “Descripción del modelo eléctrico del memristor,” vol. 58, pp. 113–119, 2012.
- [11] C. O. Marambio, K. C. Valenzuela, and A. R. Estay, “Memristor. Una perspectiva general,” *Interciencia*, vol. 39, no. 7, pp. 458–467, 2014.
- [12] X. Saura Mas, “Filamentos conductores de ruptura dieléctrica en aislantes delgados,” *Tesis Doctoral Univ. Autónoma Barcelona*, p. 212, 2014.

-
- [13] E. Salvador Aguilera, “Impacte del divisor de tensió en el fenomen del Resistive Switching. Anàlisi experimental incloent l’ efecte del soroll,” *Trabajo final de grado*, p. 35, 2017.
 - [14] Jim Walker, “Memristors and the future,” 2010. [Online]. Available: <https://www.nobeliefs.com/memristor.htm>. [Accessed: 06-May-2019].
 - [15] B. Mohammad *et al.*, “State of the art of metal oxide memristor devices,” *Nanotechnol. Rev.*, vol. 5, no. 3, pp. 311–329, Jan. 2016.
 - [16] S. González Montoya and D. Arias Varón, “El Memristor. Aplicaciones Circuitales Con Amplificadores Operacionales,” p. 135, 2014.
 - [17] J. A. Cárdenas Gutiérrez, “Memristor: Teoría y Aplicaciones,” vol. Capítulo 3, pp. 1–6, 2011.
 - [18] M. M. Izquierdo, “Analysis of the Resistive Switching phenomenon in MOS devices for memory and logic applications,” *Tesis Doctoral Univ. Autónoma Barcelona*, p. 184, 2017.
 - [19] A. Crespo Yepes, “Estudio de la reversibilidad de la ruptura dieléctrica en dispositivos MOS con dieléctrico de puerta high-k ultra delgado .,” *Tesis Doctoral Univ. Autónoma Barcelona*, p. 154, 2012.
 - [20] J. Carlos Aledo, “Ruido Vital,” *Departamento de Biología Molecular y Bioquímica. Facultad de Ciencias. Universidad de Málaga*, 2008. [Online]. Available: <http://www.encuentros.uma.es/encuentros120/ruido.htm>. [Accessed: 13-May-2019].
 - [21] R. Toral, “Ruido más allá de las orejas : Procesos estocásticos en biología,” p. 56.
 - [22] A. Utagawa, T. Asai, and Y. Amemiya, “Stochastic resonance in simple analog circuits with a single operational amplifier having a double-well potential,” *Nonlinear Theory Its Appl. IEICE*, vol. 2, no. 4, pp. 409–416, 2011.
 - [23] B. Sancristóbal, B. Rebollo, P. Boada, M. V. Sanchez-Vives, and J. Garcia-Ojalvo, “Collective stochastic coherence in recurrent neuronal networks,” *Nat. Phys.*, vol. 12, no. 9, pp. 881–887, Sep. 2016.
 - [24] “El ruido de fondo de las neuronas ayuda al cerebro a ser ordenado - EcoDiario.es,” 2016. [Online]. Available: <https://ecodiario.eleconomista.es/ciencia/noticias/7535701/05/16/El-ruido-de-fondo->

- de-las-neuronas-ayuda-al-cerebro-a-ser-ordenado.html. [Accessed: 13-May-2019].
- [25] F. Ramírez, A. Suárez, and J. M. Collantes, “Análisis y Síntesis de un Circuito con Resonancia Estocástica,” no. 1, pp. 0–3.
- [26] A. González Arias and Universidad de Salamanca., *¿Qué es el magnetismo?* Ediciones Universidad de Salamanca, 2001.
- [27] M. de las N. Lorenzo Gonzalez, “Influencia del ruido gaussiano correlacionado en la sincronización de sistemas caóticos,” *Tesis de Doctorado*, p. 167, 2000.
- [28] C. Guzman Ruiz, “Evaluación de prestaciones de un osciloscopio digital para la medida de señales ultrarrápidas,” *Trabajo final de grado*, p. 54, 2018.
- [29] M. Gannon, “What are triaxial cables?,” 2016. [Online]. Available: <https://www.wireandcabletips.com/what-are-triaxial-cables/>. [Accessed: 19-May-2019].
- [30] “Descripción del producto MATLAB - MATLAB & Simulink - MathWorks España.” [Online]. Available: https://es.mathworks.com/help/matlab/learn_matlab/product-description.html. [Accessed: 20-May-2019].
- [31] H. Martín Rodero, “Mendeley : guía básica de uso,” p. 66, 2018.
- [32] “Matlab Estudiantes y Profesores – Software UNAM.” [Online]. Available: <https://www.software.unam.mx/producto/matlab/>. [Accessed: 20-May-2019].
- [33] G. temáticas B. UC, “Guías temáticas: Alumnos de Postgrado: Recursos.” [Online]. Available: <https://guiastematicas.bibliotecas.uc.cl/postgrado/recursos>. [Accessed: 20-May-2019].
- [34] Keysight Technologies, Ed., “Keysight 81150A and 81160A Pulse Function Arbitrary Noise Generators - DATASHEET,” p. 35.
- [35] “Archivo de osciloscopio binario al programa de traducción de MATLAB | Keysight (antes Medición electrónica de Agilent).” [Online]. Available: <https://www.keysight.com/main/editorial.jspx?cc=HU&lc=eng&ckey=1185953&nid=-32542.1150183&id=1185953>. [Accessed: 26-May-2019].

Bellaterra, Julio de 2019

Firmado: *Francel Eduardo Vargas Mosquera*