

HACIA LA CALIBRACIÓN DE SIMULADORES DE CAPACITANCIA PARA EL INTERVALO DE 100 μ F A 100 mF EN EL CENAM

J. Angel Moreno, Felipe L. Hernández

Centro Nacional de Metrología – División de Mediciones Electromagnéticas

km 4,5 Carr. a los Cués, 76241, El Marqués, Qro., México

Tel: +52 (442) 211 05 00, Fax: +52 (442) 211 05 48, jmoreno@cenam.mx, fhernand@cenam.mx

Resumen: Este artículo presenta las bases para la calibración de calibradores multifunción de mediana exactitud en la magnitud de capacitancia, particularmente para sus intervalos de mayor alcance, teniendo como punto de partida el principio de funcionamiento de estos equipos y su utilización para la calibración de puentes RLC de baja exactitud o industriales y de multímetros de mano. Adicionalmente, se plantean las líneas de desarrollo que el CENAM pretende seguir para lograr el establecimiento de un sistema de medición que permita esta calibración con el alcance y exactitud requeridos con trazabilidad a patrones nacionales.

1. INTRODUCCIÓN

En México, una gran mayoría de laboratorios acreditados en el área eléctrica, y muchos otros laboratorios industriales, emplean calibradores multifunción de mediana exactitud (CM) como patrón de referencia o de trabajo. Estos CM permiten la calibración de medidores de referencia o de trabajo en diversas magnitudes, en particular de puentes RLC (PRLC) de baja exactitud o industriales y de multímetros de mano (MM) en la magnitud de capacitancia. En Junio de 2010, se encontraron registrados un total de 13 laboratorios acreditados en México que ofrecen servicios de calibración en la magnitud de capacitancia [1]. Estos servicios son realizados empleando como referencia patrones de capacitancia, PRLC y CM, donde éstos últimos son usados particularmente para la calibración de capacitancia para valores mayores a 1 μ F.

Los CM con la función de simulación de capacitancia tienen una fuerte presencia en el mercado desde hace un poco más de una década, durante la cual la compañía Fluke ha mantenido liderazgo. Fluke lanzó al mercado un primer modelo de CM, el 5500A, con la función de simulación de capacitancia para la calibración de PRLC y MM, cuyo alcance va de 0.33 nF hasta 1.1 mF, dividido en 14 intervalos distintos. Su frecuencia mínima de operación es de 50 Hz para todo el alcance de capacitancia, mientras que la frecuencia máxima de operación es de 1 kHz para capacitancias menores a 3.3 μ F, disminuyendo hasta 100 Hz para valores mayores a 110 μ F [2], tal como se ilustra en la figura 1.

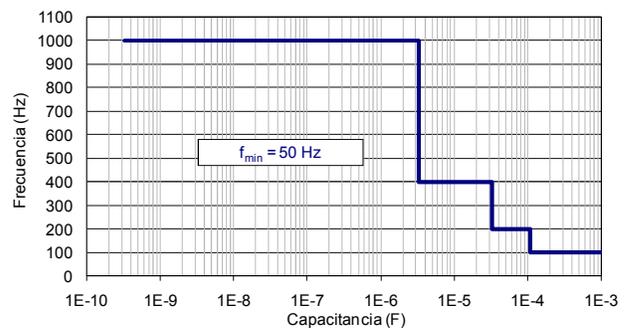


Fig. 1 Frecuencia de operación del 5500A.

Desde hace varios años el CENAM ha realizado la calibración de este equipo en cada uno de sus intervalos empleando como referencia un PRLC, el cual es a su vez calibrado en 5 puntos de calibración dentro del intervalo comprendido entre 100 pF y 1 μ F a 1 kHz, empleando patrones de capacitancia, y en 4 puntos de calibración dentro del intervalo comprendido entre 1 μ F y 1 mF a 100 Hz, empleando un patrón de capacitancia de 1 μ F y un transformador de relación.

Pocos años después de que el 5500A comenzó a emplearse como patrón de referencia por muchos laboratorios acreditados e industriales en México, Fluke lanzó al mercado un segundo modelo de CM, el 5520A, cuya función de simulación de capacitancia tiene un alcance mayor con características de operación en frecuencia distintas.

Nota: La mención de alguna marca o modelo de equipos de medición no representa en ningún momento su recomendación por parte de los autores ni del CENAM.

El alcance del 5520A en capacitancia cubre el intervalo que va de 0.19 nF hasta 110 mF dividido en 18 intervalos distintos. Su frecuencia mínima de operación es de 10 Hz para capacitancias menores a 1.1 mF y de 0 Hz para el resto del alcance, mientras que la frecuencia máxima de operación es de 10 kHz, para los dos intervalos de capacitancia más bajos, disminuyendo hasta una frecuencia de 0.2 Hz para el intervalo de capacitancia más alto [3], tal como se ilustra en la figura 2.

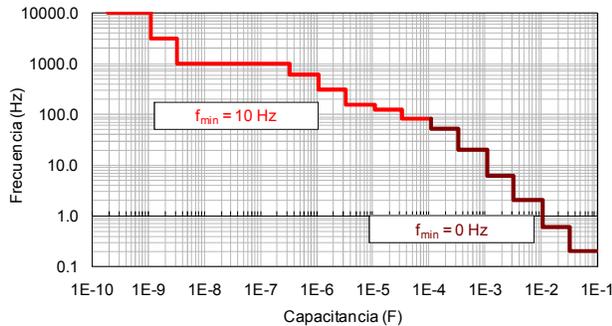


Fig. 2 Frecuencia de operación del 5520A.

Debido a estas características, la calibración del 5520A en el CENAM se realiza para valores de hasta 100 μ F solamente, tomando en cuenta que para capacitancias mayores el fabricante no proporciona ningún dato relacionado con su desempeño para frecuencias mayores o iguales a 100 Hz.

La calibración del 5520A para valores de capacitancia de 100 μ F a 100 mF es objeto de un análisis cuidadoso por parte del CENAM, pues en este intervalo de capacitancia la frecuencia máxima de operación se reduce hasta niveles de 0.2 Hz, lo cual impide emplear un puente RLC como patrón de referencia, e invita al desarrollo de un sistema de medición que sea capaz de realizar la calibración del 5520A a muy baja frecuencia. El desarrollo de este sistema debe basarse en el conocimiento del principio y límites de operación del 5520A, así como en el funcionamiento en conjunto con el instrumento bajo calibración (IBC), es decir con PRLC y MM, teniendo en cuenta todos aquellos efectos que de ello se deriven.

2. FUNCIONAMIENTO DE UN SIMULADOR DE CAPACITANCIA CON PUENTES RLC Y MULTÍMETROS DE MANO

2.1 Teoría de Operación de un CM Fluke

Los CM Fluke, para sus funciones de generación de valores de capacitancia y de resistencia, tienen un principio de funcionamiento similar. El CM, en estas funciones, no dispone de patrones materializados de capacitancia ni de resistencia que se pudieran conectar directamente al IBC, sino que realiza una simulación de estas magnitudes con base en un módulo de síntesis de impedancia. Este módulo recibirá una señal de estímulo generada por el IBC, la cual es una corriente $i(t)$ que ingresará por las únicas dos terminales del módulo. Como respuesta a este estímulo, el módulo entregará, en estas mismas dos terminales, una señal correspondiente a la caída de tensión $v_o(t)$, la cual es igual en valor a la que aparecería en las terminales de un capacitor o de un resistor al circular la corriente $i(t)$.

En particular, para sintetizar capacitancia este módulo se basa en el principio de funcionamiento de un circuito integrador, empleando para ello amplificadores, un convertidor A/D y un capacitor, tal como se ilustra en la figura 2 [4].

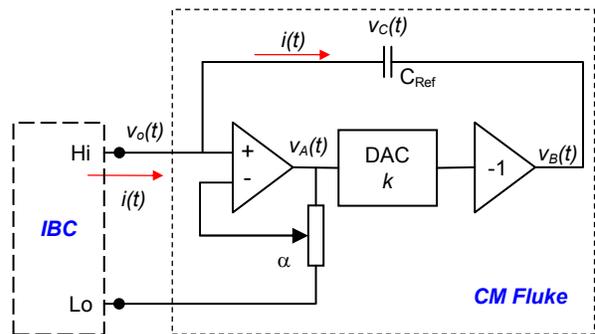


Fig. 2 Módulo de síntesis de impedancia para la función de simulación de capacitancia de los CM Fluke.

Cuando el CM está en operación en conjunto con el IBC, la corriente $i(t)$ circula a través del capacitor C_{Ref} , en el cual habrá una caída de tensión $v_C(t)$ dada por la ecuación 1.

$$v_C(t) = v_o(t) - v_B(t) = \frac{1}{C_{Ref}} \int i(t) dt \quad (1)$$

El convertidor A/D actúa como un amplificador con ganancia k , de tal modo que la tensión $v_B(t)$ es:

$$v_B(t) = -k v_A(t) \quad (2)$$

El amplificador de entrada tiene una retroalimentación negativa a través de un divisor de tensión con relación de división α , de tal manera que $v_A(t)$ y $v_o(t)$ guardan la siguiente relación:

$$v_A(t) = \frac{v_o(t)}{\alpha} \quad (3)$$

Sustituyendo las ecuaciones 2 y 3 en la ecuación 1, se encuentra que la respuesta del módulo es la tensión $v_o(t)$ dada por la ecuación 4.

$$v_o(t) = \frac{1}{C_{Ref} \left(1 + \frac{k}{\alpha}\right)} \int i(t) dt = \frac{1}{C_{Sim}} \int i(t) dt \quad (4)$$

De esta expresión resulta evidente que el módulo se comporta como un circuito integrador de la corriente $i(t)$, y que el valor de la capacitancia simulada C_{Sim} se logra seleccionando la ganancia k del convertidor A/D y la relación α del divisor de tensión, cumpliendo la ecuación 5.

$$C_{Sim} = C_{Ref} \left(1 + \frac{k}{\alpha}\right) \quad (5)$$

2.2 Operación del CM en conjunto con un PRLC

Los PRLC operan en general utilizando la técnica de medición de impedancia de 4 terminales, la cual consiste en hacer circular por la impedancia bajo medición una corriente $i(t)$, a través de un par de terminales (I_+ e I_-), y midiendo la caída de tensión $v_o(t)$, a través de un par de terminales distinto (V_+ y V_-), tal como se muestra en la figura 3a. La corriente $i(t)$ es una señal sinusoidal con características de amplitud y frecuencia programable, de tal modo que $v_o(t)$ será también una señal sinusoidal con la misma frecuencia que $i(t)$, pero con distinta amplitud y fase respecto a $v_o(t)$, ver figura 3b.

El PRLC procesa la relación existente entre $i(t)$ y $v_o(t)$ para determinar diversos parámetros de la impedancia, entre ellos su componente resistiva, inductiva o capacitiva, o una combinación de éstas, según sea el caso.

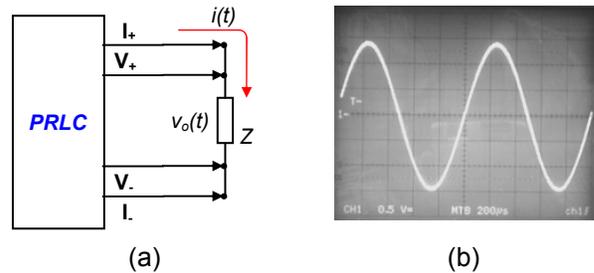


Fig. 3 Técnica de medición de 4 terminales de un PRLC con señales sinusoidales.

Típicamente, los PRLC manejan señales con amplitudes en tensión de 10 mV a 1 V y frecuencia de 50 Hz a 10 kHz, y dado que el 5520A tiene una frecuencia máxima de operación de 40 Hz para el intervalo de 1.1 mF a 3.29 mF, disminuyendo para intervalos superiores, el 5520A no puede ser medido con un PRLC para valores mayores a 1 mF.

2.3 Operación del CM en conjunto con un MM

Para el caso de un MM la situación es distinta a la de un PRLC, pues para la medición de capacitores estos equipos emplean la técnica de carga y descarga, que consiste en hacer circular por el capacitor una corriente $i(t)$ constante en el tiempo a través de sus dos únicas terminales, determinando las características de la caída de tensión $v_o(t)$ en el capacitor, las cuales están relacionadas justamente con los procesos de carga y descarga de éste, tal como se ilustra en la figura 4a.

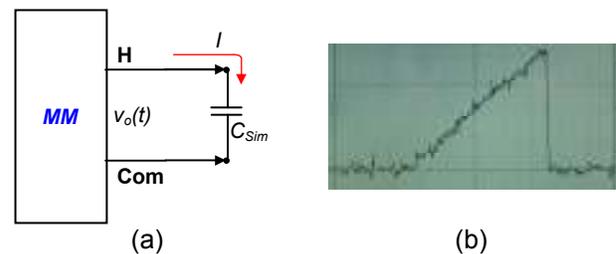


Fig. 4 Técnica de medición de carga y descarga de un MM.

Evaluando la ecuación 4 para $i(t) = I$ se obtiene la ecuación 6, de la cual se observa que $v_o(t)$ será una rampa de tensión cuya pendiente es el cociente de I y de C_{Sim} , la cual representa físicamente el proceso de carga de un capacitor.

$$v_o(t) = \frac{I}{C_{Sim}} t \quad (6)$$

En teoría, $v_o(t)$ seguirá incrementando linealmente su valor con el tiempo en tanto la corriente I siga circulando por el capacitor, sin embargo en la práctica, los MM tienen un límite máximo de tensión de operación y son programados para que el proceso de medición tome algunas décimas de segundo o algunos segundos en el peor de los casos. Por ello, los MM incluyen en su proceso de medición una secuencia que interrumpe la circulación de la corriente por el capacitor, evitando así que la tensión $v_o(t)$ aumente más allá de los límites de operación del MM, para posteriormente provocar que $v_o(t)$ disminuya hasta un valor mínimo, no necesariamente cero, mediante un circuito de descarga, tras lo cual el MM toma un tiempo para procesar y desplegar información para después iniciar un nuevo ciclo de medición. Esta secuencia se puede apreciar en la figura 4b.

Sabiendo que $v_o(t)$ cambia linealmente dentro del periodo de tiempo en el que sucede la carga del capacitor, su valor puede ser determinado a partir de la ecuación 6 conociendo el valor de la corriente I y el cambio que tiene $v_o(t)$ respecto al tiempo, es decir, la pendiente m de la rampa de tensión se puede conocer a partir de la ecuación 7.

$$C_{Sim} = \frac{t}{v_o(t)} I = \frac{\Delta t}{\Delta v_0} I = \frac{1}{m} I \quad (7)$$

donde:

$$m = \frac{\Delta v_0}{\Delta t} \quad (8)$$

Cuando un MM realiza la medición de un capacitor, la tensión $v_o(t)$ tiene la particularidad de ser periódica en el tiempo tras varias secuencias de medición sucesivas, tal como se aprecia en la figura 5, de tal modo que esta señal tiene asociada una frecuencia, que es en general baja, y dependerá de la secuencia de medición de cada MM en particular.

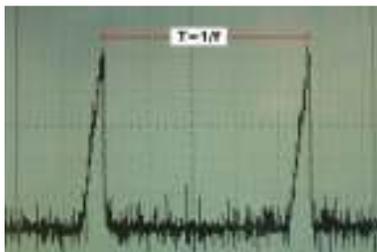


Fig. 5 Forma periódica de la señal de tensión de un MM para mediciones sucesivas de un capacitor.

En el CENAM se han realizado experimentos de medición de distintos valores de capacitancia simulados por un 5520A usando una muestra de varios MM, encontrando que algunos de ellos tienen distintas frecuencias de secuencia medición para distintos valores de capacitancia, los cuales se resumen en la tabla 1, donde se observa que la frecuencia de secuencia de medición disminuye conforme la capacitancia simulada aumenta, llegando a ser hasta de 0.2 Hz, lo cual coincide con la frecuencia máxima de operación del 5520A para capacitancias mayores a 3.3 mF. Se puede entender que para medir capacitancias de mayor valor, se requiere una frecuencia menor de secuencia de medición.

C_{Sim}	f (Hz)
10 μ F	1.8 a 4.2
100 μ F	1.7 a 4
1 mF	0.2 a 2.2
10 mF	0.2 a 1.1

Tabla. 1 Valores de frecuencia de la secuencia de medición para distintos valores de capacitancia simulados.

Es importante resaltar que para un MM esta frecuencia se entiende bajo el contexto de una secuencia programada de medición, y no está asociada a las características de la corriente $i(t)$, la cual es constante, mientras que para un PRLC esta frecuencia es una característica propia de la señal $i(t)$. En ambos casos se trata de señales periódicas, sin embargo su origen es distinto y no deberán confundirse en ningún momento.

En operación conjunta con un CM, un MM hará circular la corriente I a través de las terminales del CM, y éste entregará por respuesta una rampa de tensión con pendiente m , la cual depende directamente de I y del valor de capacitancia a simular. Sabiendo de antemano que el valor de I puede ser distinto para cada MM y para distintos valores de capacitancia, se hace necesario tener conocimiento de las características del valor de m como respuesta del CM. Como resultado de los experimentos de medición ya citados, se encontró que cada MM tiene una secuencia de medición particular, pudiendo ésta cambiar incluso entre intervalos del mismo MM, lo cual se ilustra en la figura 6, donde se aprecia claramente en todos los casos el proceso de carga y de descarga del capacitor simulado.

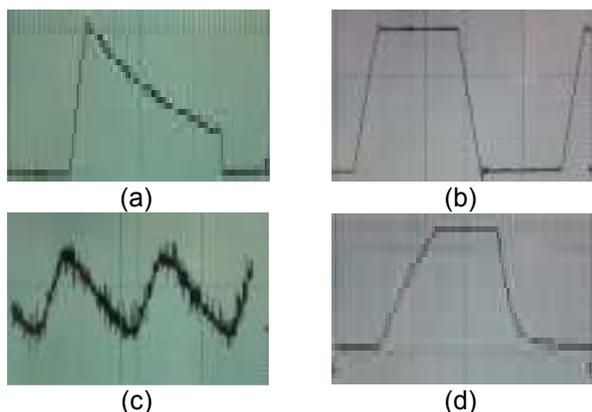


Fig. 6 Señales de medición para distintos MM.

Se encontró también que la rampa de tensión no rebasa 1 V, y en muchos casos no inicia en 0 V. Solo se encontraron dos MM cuya rampa de tensión llega a valores de 1.9 V y de 3.5 V, donde para este último caso el CM aborta la simulación debido a que se rebasa su límite de operación en tensión.

El resultado más importante de los experimentos realizados hasta este punto ha sido la obtención de las características de la pendiente m durante la carga del capacitor simulado, pues esta característica es la que contiene la información sobre el valor de capacitancia simulada. Se encontró que para un mismo valor de capacitancia el CM puede recibir como estímulo distintos valores de I , dependiendo de cada MM en particular, y por consiguiente la respuesta del CM será una rampa de tensión con pendiente m distinta en cada caso. En la tabla 2, se muestra un resumen del valor de m encontrado para distintos valores de capacitancia medidos con distintos MM en distintos intervalos de los mismos.

C_{Sim}	m (V/s)
10 μ F	0.17 a 12.7
30 μ F	3.6 a 13.2
100 μ F	0.23 a 9.1
300 μ F	0.35 a 4.9
1 mF	0.1 a 1.6
3 mF	0.04 *
10 mF	0.01 a 0.68

* Para un solo MM en dos intervalos distintos.

Tabla. 2 Valores de m para distintos valores de capacitancia simulados.

Con la información hasta ahora reunida, se ha planteado en el CENAM la necesidad de desarrollar un sistema de medición que permita investigar más a fondo las características metroológicas del 5520A, con la visión de que este sistema pueda servir como sistema de referencia para la calibración del 5520A en el CENAM en los intervalos altos de capacitancia.

3. PROPUESTA DE DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN

Como se ha visto, para valores de capacitancia de 100 μ F a 100 mF simulados por el 5520A, en operación conjunta con MM, resulta muy importante conocer los efectos que pudieran presentarse en la simulación de capacitancia bajo distintas condiciones de medición, en particular aquellos que pudieran suceder al recibir como estímulo valores de corriente distintos para un mismo valor de capacitancia simulado. La investigación de estos posibles efectos requiere el desarrollo de un sistema de medición que permita reproducir los fenómenos y condiciones de medición descritos en la sección anterior para MM, dentro de los límites de operación del 5520A.

Se ha propuesto la conformación de un sistema de medición que cuente con un módulo de generación y medición que haga circular una corriente por las terminales del 5520A como estímulo, y que mida la tensión que produce éste como respuesta a dicho estímulo, basando su operación en la técnica de medición de 4 terminales, tal como lo haría un PRLC, pero bajo condiciones de medición en corriente continua, tal como lo haría un MM. Así mismo, dado que las secuencias de medición a reproducir con el sistema pueden durar desde algunas décimas de segundo hasta algunos segundos, es importante que el sistema cuente con la sincronización necesaria entre el 5520A y el módulo de generación y medición, de tal manera que sea posible la apropiada adquisición y procesamiento de datos. La figura 7 muestra la estructura básica del sistema de medición propuesto, cuyas características particulares se describen a continuación.

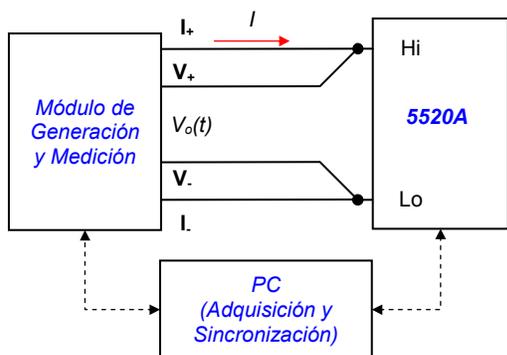


Fig. 7 Estructura básica del sistema de medición propuesto.

3.1 Características Particulares

El sistema deberá reunir distintas características para poder reproducir las condiciones de medición que permitan realizar las caracterizaciones necesarias para conocer los efectos que tiene el 5520A al simular el intervalo de capacitancia de 100 μF a 100 mF. Estas características se basan no solo en los límites de operación del 5520A, sino también en los resultados de los experimentos que hasta ahora se han descrito.

Sabiendo que en lo general los MM operan a tensiones menores a 1 V y que la máxima tensión que puede generar el 5520A como respuesta a la corriente de estímulo es de 3 V [3], se ha establecido que el módulo de generación y medición del sistema sea capaz de medir tensiones de respuesta máximas de 1 V. Con esta característica será posible reproducir la gran mayoría de condiciones de medición, respetando en todo momento los límites de operación del 5520A.

Con base en los resultados de los experimentos realizados para determinar el valor de la pendiente de la rampa de tensión para distintos valores de capacitancia, resumidos en la tabla 2, y sabiendo que el 5520A soporta como estímulo una corriente máxima de 150 mA para valores de capacitancia menores a 1.1 mF, y un máximo de 100 mA para valores de capacitancia mayores a 1.1 mF [3], se ha determinado que el módulo de generación y medición sea capaz de generar estímulos de corriente dentro del intervalo desde 1 μA hasta 100 mA. Con esta característica, será posible provocar que el 5520A genere como respuesta rampas de tensión con pendientes desde 10 mV/s hasta 14 V/s. La tabla 3 resume tanto el intervalo de valores de la

rampa de tensión que se pretende provocar, como el valor de la corriente que se usará para ello para distintos valores de capacitancia.

C_{Sim}	m (V/s)	I
10 μF	0.1 a 14	(1 a 140) μA
30 μF	0.1 a 14	(3 a 420) μA
100 μF	0.1 a 14	10 μA a 1.4 mA
300 μF	0.1 a 10	30 μA a 3 mA
1 mF	0.1 a 10	(0.1 a 10) mA
3 mF	0.01 a 6	30 μA a 18 mA
10 mF	0.01 a 6	(0.1 a 60) mA
30 mF	0.01 a 2	(0.3 a 60) mA
100 mF	0.01 a 1	(1 a 100) mA

Tabla. 3 Valores de I para distintos valores de capacitancia simulados y de m .

Cabe resaltar que han sido considerados adicionalmente los puntos de capacitancia de 10 μF y de 30 μF , debido a que en éstos, más el punto de 100 μF , es posible medirlos usando un PRLC calibrado, con lo cual será posible evaluar el desempeño del sistema y determinar su utilidad para ser usado como sistema de referencia de calibración del 5520A.

Respecto a la generación de corriente por parte del módulo de generación y medición, es necesario considerar una característica adicional relativa a la impedancia de entrada del 5520A.

Como ya se explicó reiteradamente, como respuesta al estímulo de una corriente constante I , el 5520A responderá con una rampa de tensión $v_o(t)$, de tal manera que es fácil deducir mediante la ley de Ohm que la impedancia de entrada Z_{in} del 5520A se incrementará de manera proporcional a $v_o(t)$, tal como se expresa en la ecuación 9.

$$Z_{\text{in}} = \frac{v_o(t)}{I} \tag{9}$$

Normalmente, una fuente de corriente opera bajo condiciones de carga constante, es decir, se espera que la impedancia del circuito al cual provee corriente no cambie, o que los cambios que tenga sean pequeños, muchas veces ocasionados por el efecto de auto calentamiento. Si estos cambios son pequeños entonces la fuente realiza ajustes pequeños de su fuente interna de tensión para mantener la corriente constante. Un esquema básico de lo anterior se ilustra en la figura 8.

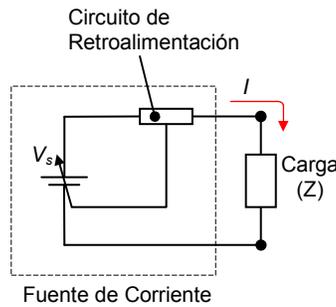


Fig. 8 Esquema básico de una fuente de corriente bajo condiciones de carga constante.

Para el caso particular de una capacitancia simulada por el 5520A de $10 \mu\text{F}$, si se usa como estímulo una corriente constante de $140 \mu\text{A}$ se obtendrá como respuesta una rampa de tensión cuya pendiente será $m = 14 \text{ V/s}$, llegando a un valor de 1 V en aproximadamente 71 ms . Bajo estas condiciones, la impedancia de entrada del 5520A sufrirá un cambio de $10 \text{ k}\Omega$ en apenas una décima de segundo, tal como se ilustra en la figura 9.

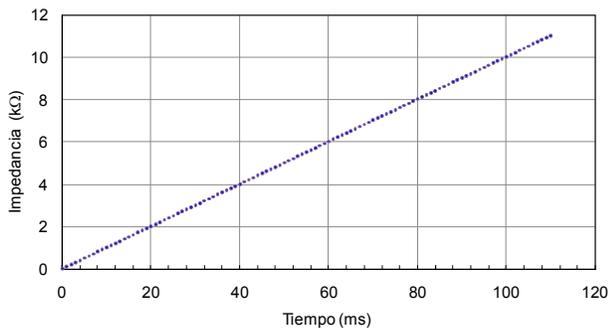


Fig. 9 Impedancia de entrada de un 5520A para $C_{SIM} = 10 \mu\text{F}$ y $m = 14 \text{ V/s}$.

Por lo anterior, el módulo de generación y medición del sistema propuesto deberá contar con una fuente de corriente cuyas características le permitan mantener la corriente constante ante cambios tan grandes y rápidos de la impedancia de la carga como el ilustrado.

Otro aspecto importante, será la velocidad de muestreo de la tensión $v_o(t)$. Habiendo determinado que el módulo de generación y medición será capaz de medir tensiones de respuesta máximas de 1 V , y considerando la información de la tabla 3, se sabe que las rampas de tensión podrán tener una duración que va desde aproximadamente 71 ms hasta 100 s , dependiendo del valor de I y de la capacitancia simulada. Por lo tanto, se hace necesario que el sistema propuesto

sea capaz de tomar suficientes muestras de la rampa de tensión en intervalos de tiempo tan cortos como 71 ms y que pueda adaptar su velocidad de muestreo para tiempos tan largos como 100 s evitando la adquisición excesiva de datos.

La sincronización del sistema, la velocidad de la transferencia de datos y el procesamiento de los mismos será fundamental en la correcta operación del sistema y obtención de resultados. Se ha establecido que la sincronización del sistema evite sobrepasar los límites de operación del 5520A en todo momento, y mantenga las condiciones de operación del módulo de generación y medición de acuerdo a las características hasta ahora establecidas. Las características de la transferencia de datos serán establecidas considerando los límites de operación de los módulos de comunicación de los instrumentos a ser utilizados, estableciendo la necesidad de que esta transferencia no interfiera con los procesos de medición, principalmente para aquellos procesos que tienen una duración muy corta. El procesamiento de datos no se considera crítico en cuanto a su velocidad de operación, pero sí en cuanto a su capacidad de manejo de datos y generación de resultados empleando, por ejemplo, algoritmos para la estimación del valor de la rampa de tensión medida y su incertidumbre estándar mediante una regresión lineal.

Por último, durante el desarrollo de este sistema de medición y con la visión de que resulte útil para la calibración del 5520A en la magnitud de capacitancia para valores de $100 \mu\text{F}$ a 100 mF en el CENAM, se realizarán las estimaciones de incertidumbre necesarias, y se cuidarán todos aquellos aspectos de trazabilidad de las mediciones a los patrones nacionales de tensión y corriente continua y de tiempo, así como las evaluaciones de desempeño necesarias utilizando patrones con trazabilidad al patrón nacional de capacitancia.

4. CONCLUSIONES

Por la importancia que ha tomado en los últimos años la utilización de CM en laboratorios de calibración e industriales en México, resulta indispensable brindar servicios de calibración de estos instrumentos en la magnitud de capacitancia.

Gracias a la comprensión del funcionamiento del CM Fluke, de PRLC y de MM en operación conjunta, así como los resultados obtenidos de

varios experimentos realizados con estos instrumentos, en particular del MM en conjunto con el 5520A, se ha propuesto el desarrollo de un sistema de medición cuyas características permitan la investigación sobre las características metrológicas del 5520A.

Se ha establecido poner el cuidado necesario para que este sistema sirva de referencia para calibrar el 5520A para valores de capacitancia de 100 μF a 100 mF con trazabilidad a patrones nacionales en un corto plazo, ampliando y fortaleciendo de esta manera las capacidades de medición y calibración del CENAM para cubrir y satisfacer las necesidades actuales y futuras de la industria mexicana en esta materia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Dr. René Carranza López Padilla, director del Área de Metrología

Eléctrica del CENAM, por su apoyo y confianza para el desarrollo de este trabajo, y por sus valiosas aportaciones para la realización de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] Entidad Mexicana de Acreditación, <http://www.ema.org.mx>, Junio 2010.
- [2] Fluke Corporation, "5500A Multi-Product Calibrator Operator Manual", Rev.11, 7/06, December 1994, USA.
- [3] Fluke Corporation, "5520A Multi-Product Calibrator Operator Manual", Rev.6, 1/03, August 1998, USA.
- [4] Fluke Corporation, "5520A Multi-Product Calibrator Service Manual", Rev. 1, 12/02, April 1999, USA.