

ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN DE ABSORCIÓN DE HUMEDAD EN AISLAMIENTOS Y CUBIERTAS PROTECTORAS DE CONDUCTORES ELÉCTRICOS POR EL MÉTODO ELÉCTRICO

José L. Nieto, Lorenzo Guzmán
Centro de Investigación y Desarrollo CONDUMEX
Carr. Constitución a San Luis Potosí, km 9.6,
Parque Industrial Jurica, 76120, Querétaro, Qro.
Tel. (442) 238 90 00 Fax. (442) 218 0717
jl Nieto@condumex.com.mx
lgmartinez@condumex.com.mx

José A. Moreno
Centro Nacional de Metrología
km 4.5 Carr. a los Cués, 76241,
El Marqués, Qro., México
+52 (442) 211 05 00, +52 (442) 211 05 48,
jmoreno@cenam.mx

Resumen: Para la determinación de la absorción de humedad en aislantes termoplásticos y termofijos de conductores eléctricos se usa el método eléctrico establecido en la norma NMX-J-040-1998-ANCE. Esta determinación se lleva a cabo en el Laboratorio de Pruebas Eléctricas del Centro de Investigación y Desarrollo CONDUMEX (CIDECE). En este trabajo se presenta la estimación de incertidumbre de uno de los resultados de esta determinación que consiste en evaluar el incremento de capacitancia durante 14 días, incluyendo la caracterización del sistema de medición del CIDECE.

1. INTRODUCCIÓN

Los cables con aislamientos termoplásticos y termofijos son sometidos a diversas pruebas para asegurar sus especificaciones antes de ser lanzados al mercado. Una de estas pruebas es la prueba de absorción de humedad, la cual es de las más estrictas a las que es sometido el aislamiento de un cable.

La absorción de humedad de un cable es posible determinarla mediante el método gravimétrico o por el método eléctrico, ambos establecidos en la norma mexicana NMX-J-040-1998-ANCE. Para el caso del método eléctrico se requiere además seguir un procedimiento de preparación definido en la norma NMX-J-205-1998-ANCE.

El Laboratorio de Pruebas Eléctricas (LPE) del Centro de Investigación y Desarrollo CONDUMEX (CIDECE) realiza esta prueba empleando el Método Eléctrico en sus instalaciones localizadas en la ciudad de Querétaro. Para acreditar esta prueba ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA) es necesario contar con la estimación de incertidumbre correspondiente, lo cual se llevó a cabo con la colaboración de la División de Mediciones Electromagnéticas del Centro Nacional de Metrología (CENAM), cuidando los aspectos metrológicos requeridos, entre ellos trazabilidad.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA

La prueba de absorción de humedad por el método eléctrico consiste en la determinación de distintos parámetros de una muestra de cable mediante mediciones de capacitancia y factor de disipación. La muestra debe tener una longitud de 5 m, de los cuales 3 m son sumergidos en una tina metálica de prueba con agua durante 14 días a una temperatura específica. Los parámetros a determinar se listan a continuación, los cuales deben cumplir las especificaciones del producto correspondiente:

- Incremento de capacitancia durante 7 días,
- Incremento de capacitancia durante 14 días,
- Factor de estabilidad al día 1,
- Factor de estabilidad al día 14,
- Alternancia durante 14 días, y
- Constante dieléctrica a las 24 horas.

En este artículo será de particular interés mostrar la estimación de incertidumbre del incremento de capacitancia durante 14 días, al cual nos referiremos como Δ_{1-14} , donde la medición de factor de disipación no es requerida.

De acuerdo a la norma, el valor de Δ_{1-14} se calcula mediante la medición de la capacitancia existente entre el conductor del cable y el agua de la tina de prueba al día 1 (C_1) y 14 (C_{14}) tal como lo expresa

la ecuación 1, siendo su valor expresado en porcentaje.

$$\Delta_{1-14} = \left(\frac{C_{14} - C_1}{C_1} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

La medición se realiza a una tensión de prueba V_O especificada por norma, que depende del espesor E del aislamiento del cable de acuerdo a la siguiente relación:

$$V_O = (E) (3150 \text{ V/mm}) \quad (2)$$

La tensión de prueba V_O es solo una condición de la medición y no influye en el cálculo del valor de Δ_{1-14} .

3. SISTEMA DE MEDICIÓN

El sistema de medición implementado en el CIDECA para la medición de capacitancia del cable C_X a 2 terminales consiste de una tina de prueba con agua con control de nivel y temperatura, un puente de capacitancia, un capacitor patrón C_N y una fuente de alta tensión V_O . La figura 1 muestra un esquema básico de conexión de este sistema, donde C_X se forma entre el conductor interno del cable y el agua que rodea el aislamiento del mismo, teniendo a éste como dieléctrico.

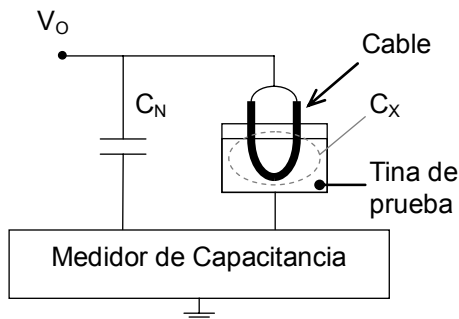


Figura 1 Sistema de medición para la medición de capacitancia.

El puente de capacitancia es un sistema de medición basado en un puente Schering, el cual emplea como referencia un capacitor patrón C_N de 100 pF y ofrece lecturas directas de capacitancia en pF, mientras que la fuente de tensión usada es capaz de aplicar hasta 20 kV a una frecuencia de 60 Hz.

4. MENSURANDO Y MODELADO

La ecuación 1 define el valor de Δ_{1-14} , sin embargo solo el numerador de la expresión contenida entre paréntesis involucra las variables que definen el cambio de capacitancia del cable debido a la absorción de humedad. Por ello, se usará la ecuación 3 como base del modelo de nuestra medición expresada en pF.

$$\Delta'_{1-14} = C_{14} - C_1 \quad (3)$$

El sistema de medición introduce un error en el valor de C_1 y C_{14} , cuyo efecto en el mensurando depende solo del cambio de su valor $\Delta\epsilon$ durante la prueba, por lo que no es necesario calibrar el sistema, solo conocer $\Delta\epsilon$. Adicionalmente, la prueba está definida para una longitud de 3 m de cable, por lo que debe considerarse el error de la medición de esta longitud ϵ_L . Con base en lo anterior, se estableció un modelo más completo al descrito en la norma para considerar los efectos descritos, el cual es mostrado en la ecuación 4.

$$\Delta'_{1-14} = \left(C_{14} - C_1 + \Delta\epsilon \right) \left(1 - \frac{\epsilon_L}{3 \text{ m}} \right) \quad (4)$$

5. FUENTES DE INCERTIDUMBRE Y SU ESTIMACIÓN

Con base en el modelo establecido se identifican las siguientes fuentes de incertidumbre:

- Dispersión de la lectura C_{14} ,
- Resolución de la lectura de C_{14} ,
- Dispersión de la lectura C_1 ,
- Resolución de la lectura de C_1 ,
- Valor de $\Delta\epsilon$,
- Valor de ϵ_L .

La estimación de estas fuentes de incertidumbre se detalla a continuación.

5.1 Estimación de incertidumbre de las lecturas de capacitancia C_1 y C_{14} .

Por experiencia, al realizar varias mediciones de C_1 ó C_{14} la dispersión típica de las mismas se mantiene dentro de 2 pF. Con base en ello, para efectos prácticos, solo se toma una lectura del

puente y se considera la dispersión típica como incertidumbre. La función de probabilidad asociada se considera uniforme con un número de grados de libertad de al menos 60, por lo que la incertidumbre estándar debida a la dispersión $u_D(x)$ de las lecturas C_1 y C_{14} es:

$$u_{DC_1}(x) = u_{DC_{14}}(x) = \frac{2 \text{ pF}}{\sqrt{3}} = 1,15 \text{ pF} \quad (5)$$

Por su operación, el indicador del puente de capacitancia se comporta como un indicador digital con resolución de 1 pF. Por ello, se considera que su incertidumbre tiene una función de probabilidad uniforme con límites de $\pm 0,5$ pF y un número de grados de libertad de al menos 1000. La incertidumbre estándar debida a la resolución $u_R(x)$ de las lecturas C_1 y C_{14} es entonces:

$$u_{RC_1}(x) = u_{RC_{14}}(x) = \frac{0,5 \text{ pF}}{\sqrt{3}} = 0,29 \text{ pF} \quad (6)$$

5.2 Estimación del valor e incertidumbre del cambio del error de medición $\Delta\epsilon$.

El error de medición que introduce el sistema de medición de capacitancia (Puente Schering y C_N en conjunto) no influye en el valor del mensurando debido a que se lleva a cabo una medición diferencial de dos capacitancias del mismo orden, sin embargo, el cambio de este error $\Delta\epsilon$ durante la prueba sí tiene influencia en el valor del mensurando, por lo que se requiere conocer el valor de $\Delta\epsilon$. Para realizar esto, se llevó a cabo la caracterización del sistema de medición bajo las condiciones en las que opera normalmente.

La caracterización del sistema se basó en 15 mediciones de un capacitor patrón con el sistema de medición, tal como se realizaría con un cable, durante un total de 19 días, registrando además la temperatura del laboratorio para evaluar el efecto de la temperatura en el sistema. Las mediciones se muestran en la figura 2.

Se encontró que las mediciones no tienen deriva, por lo que se espera que $\Delta\epsilon$ tenga un valor promedio de 0 pF durante la prueba, y que su dispersión sea menor a 2 pF con una distribución de probabilidad uniforme, para un intervalo de

temperatura de 25 °C a 29 °C. Con base en esto, la incertidumbre estándar de $\Delta\epsilon$, $u_{\Delta\epsilon}(x)$, es:

$$u_{\Delta\epsilon}(x) = \frac{2 \text{ pF}}{\sqrt{3}} = 1,15 \text{ pF} \quad (7)$$

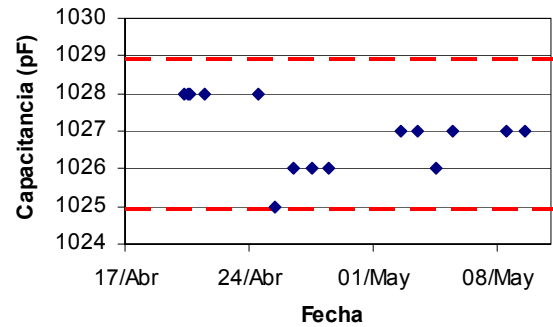


Figura 2 Mediciones para caracterizar el sistema de medición de capacitancia.

En la figura 3 se muestran las mediciones realizadas en función de la temperatura, donde el coeficiente de temperatura estimado m es menor a $-0,2$ pF/°C. Se considera que el efecto de las variaciones de la temperatura ambiental sobre el sistema de medición es despreciable y que se encuentra contenido en la incertidumbre $u_{\Delta\epsilon}(x)$.

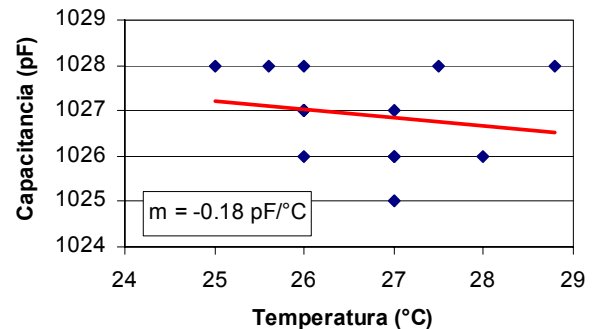


Figura 3 Mediciones de Capacitancia en función de la temperatura.

5.3 Estimación de incertidumbre del error de medición de la longitud del cable ϵ_L .

Este error es provocado por el error de medición de la longitud del cable, la colocación del mismo en la tina, la variación del nivel del agua durante la prueba y por el vapor de agua que existe entre la superficie del agua y la tapa de la tina. Se espera que el valor promedio de ϵ_L sea de 0 mm, con una dispersión máxima de 25 mm con una función de

probabilidad uniforme y al menos 60 grados de libertad, de modo que la incertidumbre estándar del error de medición de la longitud del cable $u_{\varepsilon L}(x)$ es:

$$u_{\varepsilon L}(x) = \frac{25 \text{ mm}}{\sqrt{3}} = 14,43 \text{ mm} \quad (8)$$

6. CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE COMBINADA Y EXPANDIDA

Usando la ecuación 4 se calcularon los coeficientes de sensibilidad para cada fuente de incertidumbre, los cuales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1 Coeficiente de sensibilidad de las fuentes de incertidumbre identificadas.

Fuente de Incertidumbre	Coeficiente de Sensibilidad
Dispersión de C_{14}	1
Resolución de C_{14}	1
Dispersión de C_1	-1
Resolución de C_1	-1
Valor de $\Delta\varepsilon$	1
Valor de ε_L	$-\left(\frac{C_{14} - C_1 + \Delta\varepsilon}{3 \text{ m}}\right)$

La contribución de incertidumbre $u_i(y)$ al mensurando se determina mediante el producto de la incertidumbre estándar $u(x_i)$ y su correspondiente coeficiente de sensibilidad c_i para cada fuente de incertidumbre, de acuerdo con la ecuación 9, mientras que la incertidumbre combinada u_c y sus grados efectivos de libertad v_{eff} quedan determinados por las ecuaciones 10 y 11 respectivamente.

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (9)$$

$$u_c = \sqrt{\sum [u_i(y)]^2} \quad (10)$$

Para poder ejemplificar estos cálculos se usarán los resultados de la medición de capacitancia de un cable de 3 m bajo prueba con aislamiento de PVC, cuyos valores C_1 y C_{14} fueron:

$$C_1 = 1918 \text{ pF} \quad \text{y} \quad C_{14} = 2050 \text{ pF}$$

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\sum \frac{[c_i \cdot u(x_i)]^4}{v_i}} \quad (11)$$

La tabla 2 resume la estimación del valor de Δ'_{1-14} , así como el cálculo de la incertidumbre combinada y sus grados efectivos de libertad, donde se aprecia que las mayores contribuciones de incertidumbre son las correspondientes a la dispersión típica de la medición de las capacitancias y al error de medición de la longitud del cable.

Para encontrar el valor de incertidumbre expandida U para un nivel de confianza nominal de 95,45 % se determinó el valor del factor de cobertura $k = 2,0$ con base en el número de grados efectivos de libertad y la función de probabilidad t . U se obtuvo multiplicando la incertidumbre combinada por el factor de cobertura:

$$U = (2,13 \text{ pF})(2,0) = 4,3 \text{ pF} \quad (12)$$

7. RESULTADOS

El resultado de la determinación de Δ'_{1-14} y su incertidumbre expandida, expresado tomando en consideración la resolución del sistema de medición, es el siguiente:

$$\Delta'_{1-14} = (132 \pm 4) \text{ pF} \quad (13)$$

Para que este resultado sea consistente con los requisitos de la norma se calcula el valor Δ_{1-14} , relativo al valor de C_1 , expresado en porcentaje empleando la ecuación 1:

$$\Delta_{1-14} = (6,88 \pm 0,21) \% \quad (13)$$

De acuerdo a las especificaciones de este cable en particular, el máximo valor de Δ_{1-14} es de 10%, por lo cual el cable probado cumple con la especificación de la norma, tomando en consideración la incertidumbre de la medición.

Es importante resaltar que la incertidumbre del valor de Δ_{1-14} es al menos 45 veces más pequeña que la especificación del cable, lo cual permite determinar con certeza si un cable bajo prueba cumple sus especificaciones.

Para asegurar la calidad y confiabilidad de los resultados de esta prueba el CIDEDEC fabricó un cable para ser usado como referencia, el cual es medido periódicamente durante la prueba de otros cables, verificando que sus parámetros conocidos sean obtenidos con el sistema de medición en todo momento. Adicionalmente, se han realizado comparaciones entre los laboratorios de la planta NACEL Potencia del Grupo CONDUMEX y el laboratorio Underwriters Laboratories (UL) de Estados Unidos, obteniendo resultados similares a los mostrados en este artículo.

8. CONCLUSIONES

El CIDEDEC lleva a cabo la prueba de Absorción de Humedad por el Método Eléctrico con un sistema de medición cuyas características ofrecen mucha confiabilidad en los resultados obtenidos. Así mismo, la incertidumbre de medición es estimada mediante un modelo matemático más completo al definido por la norma correspondiente y estimaciones provenientes de la experiencia y la caracterización del propio sistema de medición.

La identificación y estimación de las principales fuentes de incertidumbre permite establecer un mejor control sobre los principales parámetros de influencia junto con otras medidas para asegurar

la calidad de las mediciones y así cumplir con los requisitos de la EMA.

La prueba de Absorción de Humedad por el Método Eléctrico es una de las pruebas más severas a las cuales se somete el aislamiento de un cable, y puede ser determinante en la venta del mismo. Por ello, esta prueba es de suma importancia para el grupo CONDUMEX, pues garantiza la calidad de los productos que ofrece a sus clientes y permite el desarrollo de nuevos y mejores productos.

REFERENCIAS

- [1] NMX-J-040-ANCE-1988-ANCE, "Determinación de la Absorción de Humedad en Aislamientos y Cubiertas Protectoras de Conductores Eléctricos – Métodos de Prueba", ANCE, 1988.
- [2] NMX-J-205-ANCE-1988-ANCE, "Determinación del Factor de Disipación, Factor de Ionización, Capacitancia, y Permitividad en Conductores Eléctricos Aislados - Métodos de Prueba", ANCE, 1988.
- [3] NMX-CH-140-IMNC-2002, "Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones", IMNC, 2002.

Tabla 1 Resumen de la estimación del valor de Δ_{1-14} , su incertidumbre combinada y grados de libertad.

Fuente de Incertidumbre	Valor Estimado	Función de Probabilidad	Incertidumbre Estándar $u(x)$	Coefficiente de Sensibilidad c_i	Contribución de Incertidumbre $u(y)$	Grados de Libertad v
Disp. C_{14}	2050 pF	Uniforme	1,15 pF	1	1,15 pF	60
Res. C_{14}		Uniforme	0,29 pF	1	0,29 pF	1000
Disp. C_1	1918 pF	Uniforme	1,15 pF	- 1	- 1,15 pF	60
Res. C_1		Uniforme	0,29 pF	- 1	- 0,29 pF	1000
Valor $\Delta\epsilon$	0 pF	Uniforme	1,15 pF	1	1,15 pF	14
Valor Δ_L	0 m	Uniforme	0,014 43 m	-44 pF/m	0,63 pF	60
Δ'_{1-14}	132 pF				2,13 pF	110