

DESARROLLO DE UN PUEBTE MAXWELL-WIEN PARA EL MEJORAMIENTO DEL PATRÓN NACIONAL INDUCTANCIA

J. Angel 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 lograr que el valor del Patrón Nacional de Inductancia sea trazable a los Patrones Nacionales de Capacitancia y de Resistencia Eléctrica en Corriente Continua mantenidos en el Centro Nacional de Metrología (CENAM) se construyó un sistema de medición de inductancia basado en un puente Maxwell-Wien. Este artículo describe los principales detalles de su construcción y los resultados de la medición de los inductores del Patrón Nacional de Inductancia, con los cuales se mostrará que la estabilidad del sistema y de los inductores permitirá lograr la disminución de incertidumbre del Patrón Nacional de Inductancia en México.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, el Patrón Nacional de Inductancia (PNI) en México se define por el valor promedio a 1 kHz de tres inductores patrón con valor nominal de 10 mH [1], los cuales cuentan con un núcleo toroidal no magnético y un bajo coeficiente térmico, lo que les confiere excelentes características de estabilidad eléctrica, térmica y mecánica.

Desde 1995 uno de los inductores del PNI se calibra en el Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) de la República Federal Alemana. Con base en su valor se determina el valor del PNI y su incertidumbre expandida, la cual es del orden de $\pm 50 \mu\text{H}/\text{H}$ a una frecuencia de 1 kHz, teniendo así trazabilidad al Patrón Nacional de Inductancia de Alemania.

El mantenimiento del PNI se realiza con base en la comparación mensual de los inductores patrón que lo componen [2]. Anualmente se estima su estabilidad para corregir su valor y determinar el nuevo valor del PNI. Este proceso provoca un incremento paulatino de incertidumbre por lo que se requiere calibrar periódicamente uno de los inductores en el extranjero para mantener la incertidumbre del PNI a un nivel mínimo.

Para realizar la calibración de los inductores del PNI en el CENAM y lograr que su valor sea trazable a patrones mantenidos en el CENAM se decidió construir un sistema de medición de inductancia basado en un Puente Maxwell-Wien (PMW), similar al que tiene el PTB y otros laboratorios nacionales en el mundo [3]. El desarrollo de este sistema fue desarrollado con la colaboración del PTB y el Korea

Research Institute of Standards and Science (KRISS) de la República de Corea del Sur.

2. TEORÍA Y DISEÑO DEL PUEBTE MAXWELL-WIEN

Originalmente J.C. Maxwell desarrolló el PMW con propósitos balísticos, el cual fue adaptado por M. Wien para realizar mediciones en corriente alterna, en particular para medir una inductancia desconocida en términos de una capacitancia y dos resistencias conocidas [4, 5].

El circuito básico del PMW se muestra en la figura 1. Su balance se logra haciendo variar R_1 y C hasta que la magnitud y fase de las tensiones existentes en los puntos A y B sea la misma. Bajo esta condición el valor del inductor a medir L_x y su resistencia interna R_x quedan determinados conforme a las ecuaciones 1 y 2.

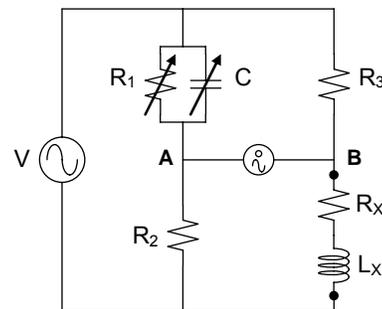


Fig. 1 Circuito básico del Puente Maxwell-Wien.

$$L_x = R_2 R_3 C \tag{1}$$

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad (2)$$

En la práctica el PMW es un circuito coaxial, donde aparecen capacitancias entre la guarda y los puntos A y B del circuito, lo que provoca un balance erróneo. Para minimizar estas capacitancias se usa un circuito de balance de guarda basado en un circuito Wagner [5], cuyos elementos variables son modificados hasta que la tensión de la guarda sea igual en magnitud y fase a la del punto A ó B. Este segundo balance se realiza de manera simultánea al primer balance hasta que ambos queden balanceados. El valor de los elementos que conforman el circuito de Wagner es irrelevante para determinar el valor del inductor bajo medición, solo se requiere su estabilidad a corto plazo. La figura 2 muestra el PMW junto con el circuito de Wagner diseñado y construido en el CENAM, donde $C=C_S+C_V$.

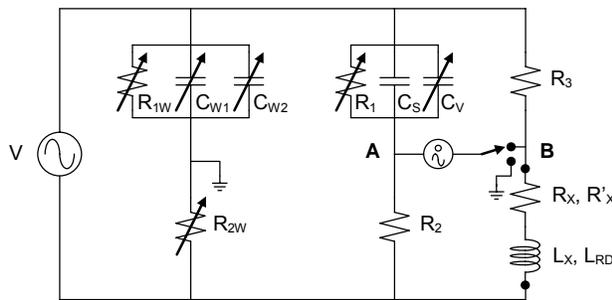


Fig. 2 Circuito del Puente Maxwell-Wien del CENAM.

3. CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE MAXWELL-WIEN EN EL CENAM

Para conformar el circuito principal del PMW se eligió un capacitor (C_S) de 10 nF y dos resistores (R_2 y R_3) de 1 kΩ. Por especificaciones, estos elementos tienen un coeficiente relativo de temperatura menor a $2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ y una estabilidad relativa menor a $\pm 5 \times 10^{-6}$ por año. Adicionalmente los resistores tienen un coeficiente de frecuencia menor a $0,2 \mu\Omega/\Omega$ por kHz conforme a su certificado de calibración.

En la conformación general del PMW se usaron diversos elementos comerciales. Se seleccionó un capacitor variable (C_V) de 11 pF con resolución de 1 fF, para lograr una resolución relativa de inductancia

de $0,1 \mu\text{H}/\text{H}$, mientras que para el circuito de Wagner se usó una década de resistencia (R_{1W}) de 10 mΩ a 1 MΩ y otra (R_{2W}) de 10 mΩ a 10 kΩ, además de una década de capacitancia (C_{W1}) de 1 pF a 1 μF y un capacitor variable (C_{W2}) de 110 pF.

En cuanto a la detección del balance y la alimentación del PMW se diseñaron y construyeron dos transformadores empleando núcleos toroidales de alta permeabilidad, para evitar pérdidas por transferencia magnética. Los transformadores se construyeron con doble blindaje eléctrico para disminuir ruido electromagnético.

Para completar la conformación del PMW y lograr la conexión de los elementos del circuito principal se construyó el resistor variable de balance R_1 y un cabezal de conexión. A continuación se detallan los principales detalles de su construcción y algunos aspectos relevantes del ensamble final del PMW.

3.1 Resistor Variable de Balance R_1

El valor de resistencia interna de los inductores del PNI varía entre $8,1 \Omega$ y $8,7 \Omega$, por lo que, de acuerdo a la ecuación 2, se requiere que R_1 tome valores entre 114Ω y 123Ω . Para lograr esto se conectaron en serie dos resistores de película metálica no inductivos de 10 kΩ y 100 kΩ, y tres resistores variables de precisión de 20 kΩ, 5 kΩ y 500 Ω, con lo que es posible determinar la resistencia del inductor con una resolución relativa de $5 \mu\Omega/\Omega$.

Debido a que uno de los inductores del PNI tiene un valor menor al producto $R_2 R_3 C_S$ se decidió incorporar un arreglo de impedancias para generar un efecto de “capacitancia negativa” en el resistor R_1 mediante un circuito “T” como el mostrado en la figura 3a [6]. Al encontrar el circuito equivalente delta de este arreglo (figura 3b) la capacitancia paralelo C_P de la impedancia Z_B queda determinada por la ecuación 3, donde f es la frecuencia de medición en hertz.

$$C_P = - \frac{R_{1T} R_{2T} C_T}{R_{1T}^2 R_{2T}^2 (2 \pi f)^2 C_T + (R_{1T} + R_{2T})^2} \quad (3)$$

El resistor R_1 se construyó con base en el circuito mostrado en la figura 4a, donde es posible seleccionar tres valores capacitivos distintos (-6 pF, -18 pF y -24 pF) mediante la acción de los interruptores S_1 y S_2 .



Fig. 3 a) Arreglo de impedancias en forma de circuito "T", b) Circuito equivalente delta del circuito "T".

El circuito fue montado en un chasis de aluminio con las dimensiones adecuadas para que pudiera ser conectado directamente en el cabezal de conexiones y fuera manipulado fácilmente. La figura 4b muestra el ensamble final de este elemento.

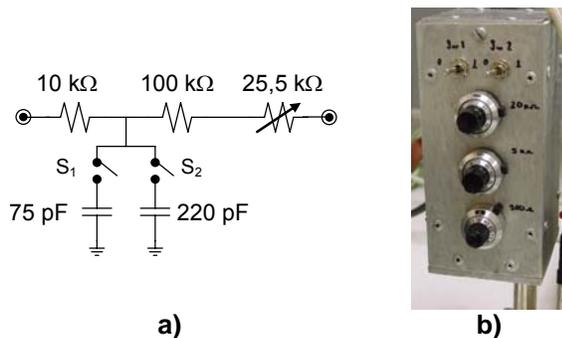


Fig. 4 Circuito (a) y ensamble final (b) del resistor variable de balance R_1 .

3.2 Cabezal de Conexión

Este elemento permite conectar los elementos del circuito principal del PMW. Se requiere que las impedancias parásitas de las conexiones del cabezal sean mínimas y que su arreglo permita una fácil manipulación de los elementos de balance y detección.

Se construyó un arreglo como el mostrado en la figura 5, donde se señalan los elementos que serán conectados en él.

Internamente, las conexiones eléctricas se realizaron empleando alambre de cobre recto con diámetro de 2,05 mm para minimizar la resistencia e inductancia parásitas de las mismas, principalmente en la conexión de R_2 y R_3 . Adicionalmente, tal como se aprecia en la figura 6, se colocó una pared metálica interna en forma de cruz conectada a la

guarda del circuito que evita capacitancias parásitas entre las terminales de conexión.

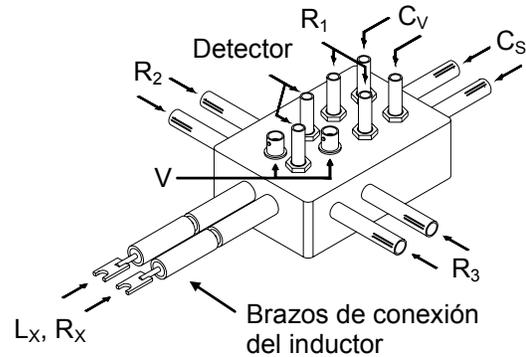


Fig. 5 Cabezal de Conexión y arreglo de los elementos del PMW.

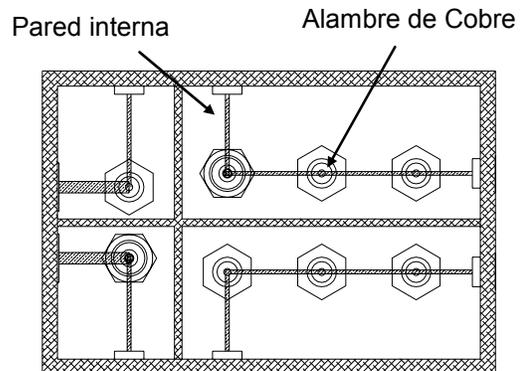


Fig. 6 Arreglo interno del cabezal del PMW (vista inferior).

Finalmente, el cabezal dispone de dos brazos coaxiales de 75 cm de longitud, que permiten conectar el inductor a medir al circuito. El conductor central de los brazos son de cobre con diámetro de 3,26 mm, el aislamiento es de teflón y el blindaje es de tubo de aluminio de 12,5 mm de diámetro externo. Estos brazos evitan que el campo magnético del inductor a medir y el del detector se interfieran y provoquen una medición equivocada.

3.3 Aspectos relevantes adicionales

Los conectores empleados en el PMW son coaxiales con aislamiento de teflón del tipo BPO, que permiten realizar conexiones rápidas y

eléctricamente robustas, excepto en la conexión de la alimentación del cabezal donde se usaron conectores BNC. Para la conexión externa del PMW se usó cable coaxial de bajas pérdidas y alta inmunidad al efecto microfónico [7].

Para la alimentación general del circuito se usó un oscilador de señal de alta calidad senoidal y un amplificador de potencia de baja distorsión, los cuales garantizan la estabilidad de la frecuencia de medición y minimizar su efecto en el circuito, principalmente sobre el valor de C_P . Así mismo, para la detección del balance se usó un amplificador Lock-In de dos canales y un indicador auxiliar analógico.

La figura 7 muestra el aspecto final del PMW ensamblado junto con el circuito de Wagner y los sistemas de alimentación y detección.



Fig. 7 Ensamble final del PMW.

4. TÉCNICA Y RESULTADOS DE MEDICIÓN

Para medir un inductor L_X éste se conecta al cabezal de conexión, se realiza el balance del puente y se mide el valor del capacitor C_V usando un puente digital de capacitancia, cuyo valor será llamado C_{V1} . Sabiendo que esta medición contiene la inductancia parásita del cabezal se realiza un segundo balance del puente para eliminarla, lo cual se lleva a cabo sustituyendo al inductor a medir por un resistor R'_X con valor similar al de la resistencia interna de L_X . De este segundo balance se obtiene un nuevo valor de C_V , el cual será llamado C_{V2} .

Con base en la ecuación 1 y sabiendo que el resistor R'_X tiene una pequeña inductancia L_{RD} , la cual se requiere evaluar, es posible llegar a la ecuación 4, la cual permite determinar el valor de L_X

sin la componente ocasionada por la inductancia parásita del cabezal de conexiones.

$$L_X = R_2 R_3 (C_S + C_{V1} - C_{V2}) + L_{RD} \quad (4)$$

Desde Febrero de 2005 se han medido de esta manera cuatro inductores con el PMW, incluyendo los inductores del PNI, realizando las correcciones por temperatura correspondientes.

Las mediciones realizadas hasta Abril de 2006 muestran una dispersión menor a $4 \mu\text{H}/\text{H}$ (1σ) en todos los casos, mientras que la deriva promedio a largo plazo es de $4 \mu\text{H}/\text{H}$ por año, donde dos inductores tienen una deriva menor a $2 \mu\text{H}/\text{H}$ por año, como el caso mostrado en la figura 8, y sólo uno de los inductores muestra una deriva de $9 \mu\text{H}/\text{H}$ por año.

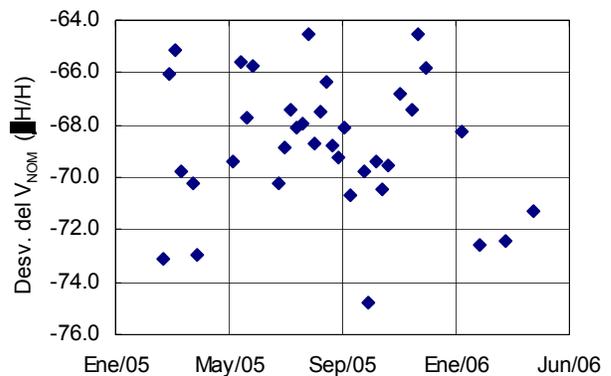


Fig. 8 Mediciones del inductor L_1 del PNI.

Las principales contribuciones de incertidumbre de las mediciones son aportadas por el valor de C_S , la corrección por temperatura y la dispersión de las mediciones tal como se detalla en la tabla 1.

Con base en lo anterior, el valor de calibración de cualquiera de los inductores del PNI será conocido con una incertidumbre expandida menor a $25 \mu\text{H}/\text{H}$ usando el PMW.

Para evaluar la realización de la unidad de inductancia en el CENAM usando el PMW en términos de las unidades del SI se realizará la calibración de uno de los inductores en el PTB, la cual se llevará a cabo durante Junio de 2006. Se espera que los resultados de esta evaluación sean presentados en el Simposio.

Tabla 1 Componentes de Incertidumbre de la medición de inductancia realizada con el PMW.

Fuente de Incertidumbre	Incertidumbre Estándar ($\mu\text{H}/\text{H}$)
Valor de C_S	7,1
Correcciones por temperatura	5,3
Dispersión de las mediciones	4,0
Valor de R_2	3,8
Valor de R_3	3,8
Inductancia de R'_X (L_{RD})	2,0
Correcciones por Impedancias Parásitas del Cabezal	0,3
Incertidumbre Combinada	11

5. MODIFICACIÓN DEL PATRÓN NACIONAL DE INDUCTANCIA

Con base en el soporte técnico y documental, los resultados aquí mostrados y la evaluación de la realización de la unidad de inductancia con el PMW, el CENAM podrá llevar a cabo la modificación del PNI que reflejarán las mejoras logradas. Las modificaciones sustantivas serán:

- una importante reducción de la incertidumbre del PNI,
- la declaración de trazabilidad hacia los Patrones Nacionales de Capacitancia y Resistencia Eléctrica en Corriente Continua, y
- su realización y mantenimiento mediante el PMW.

Técnicamente la modificación del PNI dará respaldo a los servicios de calibración de patrones y medidores de inductancia ofrecidos en el CENAM, repercutiendo en la confiabilidad y calidad de los mismos.

6. CONCLUSIONES

El PMW permite la realización de la unidad de inductancia y ofrece una mejor alternativa de mantenimiento del PNI con una incertidumbre menor. Adicionalmente, el valor de los inductores podrá conocerse en cualquier momento a través de una medición directa, evitando estimaciones estadísticas.

Con la construcción de un PMW el CENAM ofrecerá servicios de calibración de patrones y medidores de inductancia con una reducción importante de

incertidumbre, con trazabilidad a patrones nacionales mantenidos en el CENAM.

La construcción de este sistema de medición aporta no solo experiencia en el desarrollo de este tipo de sistemas de medición, sino además beneficios de alto nivel técnico para el país.

AGRADECIMIENTOS

El autor desea agradecer al Dr. Rüdiger Hanke, al Dr. Rae Duk Lee y al Dr. Yuri P. Semenov por su apoyo técnico durante mi estancia en el PTB y en el KRISS. A Robert Köster y Wolfgang Klopp por sus valiosos consejos y contribuciones, y al Ing. Víctor J. Díaz y al T.S.U. Héctor N. López por su apoyo y empeño en la construcción y caracterización del PMW.

REFERENCIAS

- [1] CENAM, "Patrón Nacional de Inductancia", <<http://www.cenam.mx/publicaciones/descargas/PDFFiles/cnm-pne-11.PDF>>, 2006-04-18.
- [2] W.G. Eicke, J.M. Cameron, "Designs for Surveillance of the Volt Maintained by a Small Group of Saturated Standards Cells", NBS Technical Note 430, 1967.
- [3] A. Fiebiger, R. Hanke, K. Dröge, "International Intercomparison of Inductance Standards 1982-1985", PTB Bericht, PTB-E32, 1988, pp. 24-31.
- [4] T.L. Zapf, "Calibration of Inductance Standards in the Maxwell-Wien Bridge Circuit", NBS Journal of Research, Vol. 65C, No. 3, 1961.
- [5] W.D. Cooper, "Instrumentación Electrónica y Mediciones", Prentice Hall, 1990, pp. 185-187 y pp. 195-196.
- [6] H.L. Johnson, G.W.Small, "Emulation of Three Terminal Standard Inductors with Tee Networks", CPEM 1998 Conference Digest, 1998, pp. 44-45.
- [7] B.P. Kibble, G.H.Rayner, "Coaxial AC Bridges", Adam Hilger Ltd., 1984, pp. 10-11 y 159-160.