

Ajuste de un puente de alterna para su uso en un array de sensores de posición

Patricio G. Donato, Jesús Ureña, Manuel Mazo, Álvaro Hernández, Juan Jesús García
Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica, Campus Universitario, S/N
Carretera de Barcelona, km 33,700 – CP:28805 – Alcalá de Henares, Madrid, España
TEL.:+34 918856544 / Fax:+34 918856591
{donatopg, urena, mazo, alvaro, jesus}@depeca.uah.es

Abstract: En este trabajo se describe el diseño y ajuste de un sistema sensor de posición basado en un array de sensores y un puente de alterna. Dicho sistema sirve para detectar el paso de objetos metálicos por puntos de un recorrido fijo. El array es pasivo y utiliza solo un par de cables para interconectar todos los puntos de detección. El puente de alterna se ha empleado para mejorar la sensibilidad y calidad de las señales a procesar. Se especifican las diferentes formas de diseño y ajuste del puente, y se propone una solución que contemple todas las situaciones posibles. En el procesamiento de las señales se utilizan secuencias Golay para compensar la atenuación y el ruido aditivo.

Keywords: array, sensor, Golay, puente de alterna

I. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se describe el diseño y ajuste de un puente de alterna para su uso con un array de sensores de posición. Dicho array está compuesto por una serie de puntos de detección formados por pares de bobinas. El principio de funcionamiento es electromagnético, por lo que el array sirve para la detección de la posición de elementos metálicos. Todo el sistema sensorial fue diseñado originalmente para usarse como detector de paso para sistemas ferroviarios [1][2], pero su uso es más amplio, pudiéndose extender a sistemas donde se deben detectar uno o más objetos metálicos en un recorrido fijo. El array tiene n puntos de detección compuestos por bobinas enfrentadas y conectadas entre sí, con sus terminales homólogos conectados de manera alternada, de forma tal que todo el sensor está interconectado mediante dos cables y presenta una inductancia equivalente L_x entre sus extremos. El vínculo eléctrico entre las bobinas sirve para mejorar la calidad de la señal, la efectividad de la detección y la seguridad del sistema. El vínculo magnético es la forma de detectar el paso del objeto a localizar (la rueda del tren en los sistemas ferroviarios), y con el agregado del vínculo eléctrico entre las bobinas se puede comprobar en todo momento si la señal bien emitida y recibida por cada bobina del array.

El arreglo sensorial se ha implementado mediante un puente de Maxwell, una de las variantes de los puentes de alterna. En la Fig.1 se puede ver este puente con las bobinas sensoras conectadas en una de sus ramas. Las bobinas están distribuidas en los puntos de interés del recorrido del objeto a posicionar. En lugar de excitar al puente con una señal

armónica simple, se lo excita con una señal codificada y modulada. Se utilizan secuencias complementarias Golay [1][3] para la codificación, por sus propiedades particulares que garantizan una elevada inmunidad al ruido. No se describirán aquí los detalles de la codificación ni de la etapa de procesamiento, ya que no es el objetivo del presente trabajo. El lector interesado puede remitirse a los trabajos de [3] y [4] para entender mejor la naturaleza de las secuencias Golay, y a los trabajos de [1] y [2] para más información sobre sus aplicaciones. En el estado estacionario o de reposo, cuando no hay ningún objeto en los puntos de detección, el puente está equilibrado, y la tensión entre los puntos medios de las ramas del puente es nula. El puente se desequilibra cuando un objeto metálico está en alguno de los puntos de detección, interponiéndose entre las bobinas. En este caso aparece una señal entre los puntos medios de las ramas del puente, que es tratada en la etapa de procesamiento. Esa señal se acondiciona en forma analógica y se digitaliza, para luego ser demodulada y procesada mediante la función de correlación. La correlación da los picos característicos de las secuencias Golay, los cuales son validados por un detector de picos. Cuando un objeto metálico pasa por uno de los puntos de detección, se identifica al mismo por medio de la amplitud y polaridad de los picos, aún en presencia de ruido e interferencias.

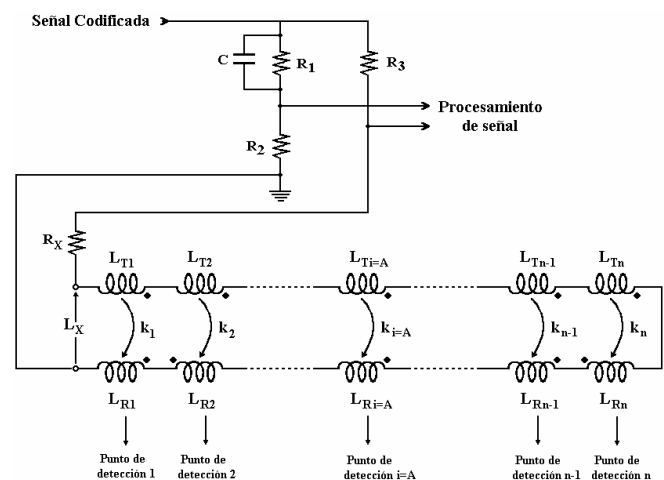


Figura 1: Distribución de los puntos de detección y bobinas sensoras

En [1] se describe la relación entre la atenuación del campo magnético producida por un objeto metálico entre las bobinas y la variación de inductancia del array completo. El array tiene n puntos de detección compuestos por n pares de bobinas conectados en serie que tiene una inductancia total L_x (cuando no hay ningún objeto):

$$L_x^{free} = \sum_{i=1}^n (L_{Ti} + L_{Ri} + 2M_i) \quad (1)$$

M_i es la inductancia mutua de cada par de bobinas, y su valor depende de la conexión de los puntos homólogos dentro del array, si es en forma positiva o negativa:

$$M_i = \pm k_i \cdot \sqrt{L_{Ti} \cdot L_{Ri}} \Rightarrow k_i \in [0;1] \quad (2)$$

El coeficiente k_i es el coeficiente de acoplamiento de cada par de bobinas, y su valor depende de la posición, orientación y forma de las bobinas. Del estudio realizado en [1] se deduce que la relación de atenuación de la inductancia mutua del array de sensores en el punto de detección $i=A$ es:

$$r_{MA} = \frac{M_A^{busy}}{M_A^{free}} \quad (3)$$

El paso del objeto por el punto de detección A afecta solo a la inductancia mutua del par de bobinas correspondiente a ese punto de detección. La expresión matemática de L_x en los casos de ausencia de detección es (1), mientras que cuando hay un objeto en el punto $i=A$ resulta:

$$L_x^{busy} = L_x^{free} - 2M_A^{free} + 2M_A^{busy} \quad (4)$$

Entonces la variación de inductancia ΔL_x es:

$$\Delta L_x = 2(r_{MA} - 1) \cdot M_A^{free} \quad (5)$$

Por lo tanto, las variaciones en la inductancia total son directamente proporcionales a las variaciones en el flujo magnético. Dado que la magnitud de la relación de atenuación de M_A está entre 0 y 1, el rango de variación de ΔL_x para un objeto ubicado en el punto $i=A$ es:

$$\Delta L_x \in [-2M_A^{free}; 0] \quad (6)$$

El valor de M_A puede ser mayor o menor que cero, dependiendo de la conexión de los puntos homólogos de las bobinas en el punto de detección A . Si los mismos están conectados de manera que sus efectos se suman, el valor de M_A será positivo. Por el contrario, si los bornes homólogos están conectados de manera que sus efectos se oponen, el valor de M_A será negativo.

II. EL PUENTE DE MAXWELL

El array de bobinas sensoras está implementado mediante un puente de Maxwell, y la detección se realiza con el procesamiento de la tensión V_{BA} . Partiendo del puente de alterna genérico (Fig. 2), la expresión de la tensión V_{BA} se puede calcular planteando las tensiones en los puntos medios de cada rama.

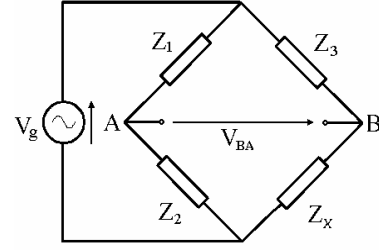


Figura 2: Puente de alterna genérico

$$V_{BA} = \frac{Z_1 Z_x - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_x)} \cdot V_g \Rightarrow Z_x = f(L_x) \quad (7)$$

Reemplazando las impedancias por sus componentes correspondientes en el puente de Maxwell, se obtiene una expresión de la tensión V_{BA} que está en función de los mismos:

$$V_{BA} = \frac{[(R_1 R_x - R_2 R_3) + j\omega R_1 (L_x - CR_2 R_3)] V_g}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_x) - \omega^2 CL_x R_1 R_2 + j\omega [L_x (R_1 + R_2) + CR_1 R_2 (R_3 + R_x)]} \quad (8)$$

Con (8) es posible conocer las variaciones en la señal de salida relacionadas con la inductancia, y por lo tanto, relacionadas con la atenuación del flujo magnético.

A. Módulo de V_{BA}

La tensión V_{BA} es compleja, por lo que tiene módulo y fase. En este caso interesa el módulo, el cual es:

$$|V_{BA}| = \sqrt{\frac{(R_1 R_x - R_2 R_3)^2 + (L_x - CR_2 R_3)^2 \omega^2 R_1^2}{((R_1 + R_2)(R_3 + R_x) - \omega^2 CL_x R_1 R_2)^2 + \omega^2 (L_x (R_1 + R_2) + CR_1 R_2 (R_3 + R_x))^2}} |V_g| \quad (9)$$

En la figura 3 se puede ver una gráfica del módulo de V_{BA} en función de la inductancia L_x .

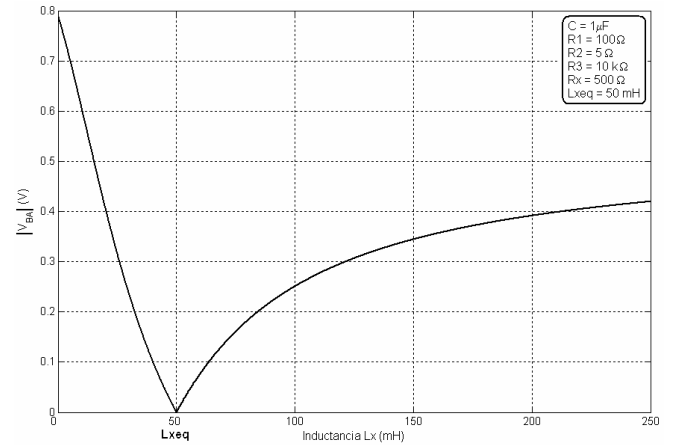


Figura 3: Módulo de la tensión V_{BA} del puente de alterna

B. Límites del módulo de V_{BA}

La forma en que se comporta el módulo de V_{BA} con respecto a L_x condiciona el tipo de respuesta que se puede obtener del sensor. Importan tanto la magnitud de la tensión como la sensibilidad del puente y la simetría en torno del punto de equilibrio. Por eso es importante conocer la relación entre

los puntos extremos de módulo de V_{BA} ($L_x \rightarrow 0$ y $L_x \rightarrow \infty$) y las magnitudes de los componentes. Cuando L_x tiende a infinito, el módulo de V_{BA} se vuelve asintótico respecto de un valor constante. Para conocer ese valor se calcula el límite del módulo de V_{BA} para $L_x \rightarrow \infty$:

$$\lim_{L_x \rightarrow \infty} |V_{BA}| = \frac{R_1}{\sqrt{\omega^2 C^2 R_1^2 R_2^2 + (R_1 + R_2)^2}} |V_g| = V_{BA}(\infty) \quad (10)$$

Como se puede apreciar en (10), el valor máximo al que tiende V_{BA} cuando la inductancia es muy elevada depende de los valores de la rama A del puente, que es la rama de ajuste. Otro de los puntos de interés para el diseño del puente es el que corresponde a las inductancias muy bajas o nulas. Para eso, se calcula V_{BA} cuando $L_x=0$, teniendo en cuenta la condición de equilibrio relativa a las resistencias del puente ($R_1 R_x = R_2 R_3$):

$$|V_{BA}(0)| = \frac{\omega C R_1^2 R_2}{(R_1 + R_2) \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + \omega^2 C^2 R_1^2 R_2^2}} |V_g| \quad (11)$$

Relacionando las expresiones (13) y (14), se encuentra que ambos valores límite están relacionados por medio de los componentes de la rama de ajuste:

$$|V_{BA}(0)| = \frac{R_1 // R_2}{|Z_C|} |V_{BA}(\infty)| \quad (12)$$

C. Respuesta en frecuencia del puente de Maxwell

Partiendo de (7), la función de transferencia del puente es:

$$H = \frac{V_{BA}}{V_g} = \frac{Z_1 Z_x - Z_2 Z_3}{(Z_1 + Z_2)(Z_3 + Z_x)} \quad (13)$$

$$H = \frac{S R_1 (L_x - C R_2 R_3) + (R_1 R_x - R_2 R_3)}{S^2 C L_x R_1 R_2 + S [L_x (R_1 + R_2) + C R_1 R_2 (R_3 + R_x)] + (R_1 + R_2)(R_3 + R_x)} \quad (14)$$

Los polos de la función de transferencia están relacionados con las constantes de tiempo de cada rama, mientras que los ceros están relacionados con las condiciones de equilibrio:

$$\begin{cases} S_{p1} = \frac{-(R_3 + R_x)}{L_x} \\ S_{p2} = \frac{-(R_1 + R_2)}{C R_1 R_2} \\ S_c = \frac{-(R_1 R_x - R_2 R_3)}{R_1 (L_x - C R_2 R_3)} \end{cases} \quad (15)$$

Cuando el puente está en equilibrio, la función de transferencia es nula porque la tensión V_{BA} es nula. Cuando el puente sale de la condición de equilibrio, la transferencia deja de ser nula y toma la forma de un filtro pasabajos. En el diseño del puente hay que tener en cuenta esto, para que la tensión V_{BA} pueda ser procesada adecuadamente. Si la frecuencia de modulación de la señal codificada es de 50 KHz entonces hay

que tratar de tener el puente sintonizado a dicha frecuencia aún en las condiciones de máximo desequilibrio.

III. DISEÑO DEL PUENTE

En el puente de Maxwell hay seis componentes, divididos en cuatro resistencias, un condensador y una inductancia. Las condiciones de equilibrio del puente son dos, por lo que es necesario formular algunas condiciones de diseño más. Estas condiciones adicionales son las relativas a los polos de la función de transferencia, la sensibilidad del puente y las magnitudes de tensión y corriente utilizadas en la excitación y medición. Con el fin de lograr el mejor diseño posible para el sensor, se ha realizado un estudio acerca de cómo afecta cada componente al comportamiento del puente. Se busca que el puente tenga una elevada sensibilidad, dentro de márgenes razonables de consumo y/o disponibilidad física de los valores requeridos. Para todas las simulaciones se supone una tensión de excitación de módulo unitario, aunque posteriormente se utilizará una tensión diferente.

A. Inductancia constante y resistencia R_3 variable

Para estudiar el efecto de R_3 sobre el módulo de V_{BA} , se imponen algunas condiciones, tales como: el condensador (1 μ F), la inductancia de equilibrio (50 mH) y uno de los polos de la transferencia ($S_{p2}=345575$ rad/s). Luego, la resistencia R_3 se usa como variable de diseño, utilizando tres valores diferentes para comparar. Los valores de R_1 , R_2 , y R_x se calculan según las condiciones de equilibrio y la condición del polo de la función de transferencia (15). Además se calculan los otros polos, cuando L_x es $\pm 20\%$ de la L_{xeq} .

TABLA I: Inductancia constante y R_3 variable

Componentes				Polos de la función de transferencia		
R_3	R_2	R_1	R_x	$S_{p1}(L_{xmax})$	$S_{p1}(L_{xmin})$	S_{p2}
1 k Ω	50 Ω	3,07 Ω	16,27 k Ω	45,83 kHz	68,75 kHz	55 kHz
5 k Ω	10 Ω	4,07 Ω	12,27 k Ω	45,83 kHz	68,75 kHz	55 kHz
10 k Ω	5 Ω	6,86 Ω	7,27 k Ω	45,83 kHz	68,75 kHz	55 kHz

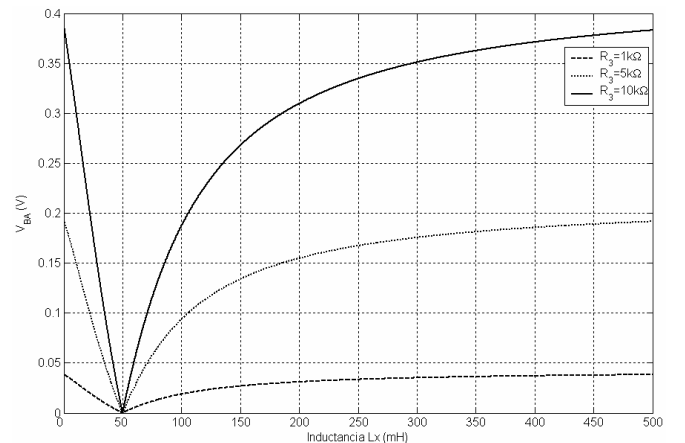


Figura 4: Módulo y derivada del módulo de V_{BA} con R_3 variable

B. Punto de equilibrio variable ($L_{xeq} \neq cte$) con R_2 constante

En el caso anterior se ha podido ver cómo fijando la L_{xeq} se puede variar la sensibilidad y amplitud de la respuesta del puente mediante la resistencia R_3 . En este caso se verá qué ocurre cuando se impone la resistencia R_2 (10Ω), el condensador ($1\mu F$) y uno de los polos de la función de transferencia ($S_{p2}=345575\text{rad/s}$). La inductancia en el punto de equilibrio, L_{xeq} , se utiliza como variable de diseño. Los valores de R_1 , R_3 , y R_x se calculan según las condiciones de equilibrio y la condición del polo de la función de transferencia (15). Además se calculan los polos de la función de transferencia cuando L_x es $\pm 20\%$ de L_{xeq} .

TABLA II: Punto de equilibrio variable y R_2 constante

Componentes				Polos de la función de transferencia		
L_{xeq}	R_3	R_1	R_x	$S_{p1}(L_{x\max})$	$S_{p1}(L_{x\min})$	S_{p2}
10 mH	1 k Ω	4,07	2,45 k Ω	45,83 kHz	68,75 kHz	55 kHz
50 mH	5 k Ω	4,07	12,27 k Ω	45,83 kHz	68,75 kHz	55 kHz
200 mH	20 k Ω	4,07	49,11 k Ω	45,83 kHz	68,75 kHz	55 kHz

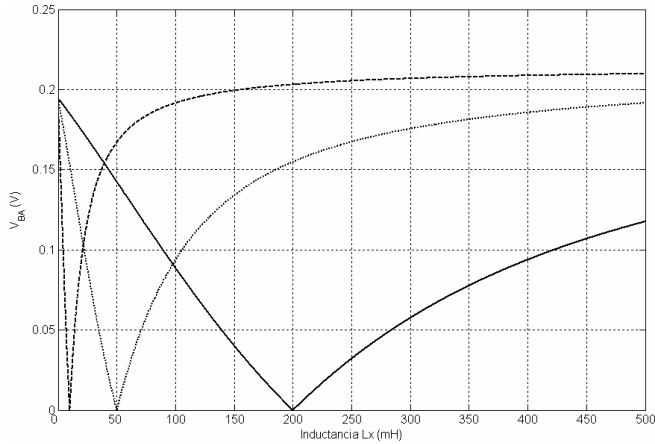


Figura 5: Módulo de V_{BA} con R_2 constante y punto de equilibrio variable

En este caso, es interesante destacar que los valores inicial ($L_x=0$) y final ($L_x \rightarrow \infty$) son iguales, a pesar de que el punto de equilibrio no es el mismo (Fig.5). El cambio en el punto de equilibrio altera la sensibilidad del puente, y también la simetría del módulo de V_{BA} . Cuando L_{xeq} tiende a valores muy pequeños, la sensibilidad del puente es muy elevada (esto es, cuando el puente se desequilibra, la tensión se eleva abruptamente). Pero las variaciones en torno al punto de equilibrio no son simétricas, las mismas variaciones de L_x no producen variaciones similares en el módulo de V_{BA} . Cuando L_{xeq} tiende a valores elevados la sensibilidad del puente disminuye, pero la respuesta en torno al punto de equilibrio es más simétrica, las variaciones positivas y negativas de L_x producen variaciones similares en el módulo de V_{BA} .

C. Punto de equilibrio variable ($L_{xeq} \neq cte$) con R_3 constante

En el caso anterior se ha podido ver cómo fijando R_2 se puede variar la sensibilidad y la simetría de la respuesta del puente de Maxwell por medio del punto de equilibrio (definido por la rama de medición, mediante R_3 , R_x y L_{xeq}). Cuando se

imponen los valores del condensador ($1\mu F$) y la resistencia R_3 ($1K\Omega$), además de uno de los polos de la función de transferencia ($S_{p2}=345575\text{rad/s}$).

Luego, la inductancia en el equilibrio, L_{xeq} se utiliza como variable de diseño y los valores de R_1 , R_3 , y R_x se calculan según las condiciones de equilibrio y la condición del polo de la función de transferencia (15).

TABLA III: Punto de equilibrio variable y R_3 constante

Componentes				Polos de la función de transferencia		
L_{xeq}	R_2	R_1	R_x	$S_{p1}(L_{x\max})$	$S_{p1}(L_{x\min})$	S_{p2}
10 mH	10 Ω	4,07	2,45 k Ω	45,83 kHz	68,75 kHz	55 kHz
50 mH	50 Ω	3,07	16,27 k Ω	45,83 kHz	68,75 kHz	55 kHz
200 mH	200 Ω	2,93	68,11 k Ω	45,83 kHz	68,75 kHz	55 kHz

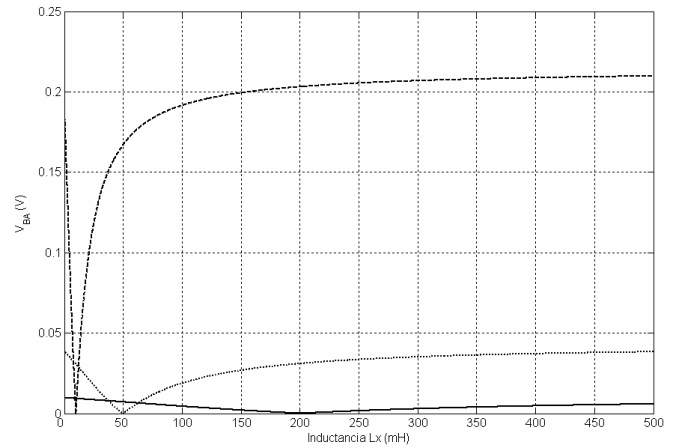


Figura 6: Módulo de V_{BA} con R_3 constante y punto de equilibrio variable

En este caso se ha podido ver cómo fijando la resistencia R_3 se puede variar la sensibilidad, amplitud y simetría de la respuesta del puente por medio del punto de equilibrio.

D. Punto de equilibrio y polos variables ($L_{xeq} \neq cte$, $S_{p1} \neq cte$ y $S_{p2} \neq cte$) con R_1 y R_3 constante

En este punto se analiza lo que ocurre cuando se imponen los valores del condensador ($1\mu F$) y las resistencias R_1 (100Ω) y R_3 ($10K\Omega$), y se varía la inductancia de equilibrio, dejando libre la ubicación de los polos de la función de transferencia. La inductancia en el punto de equilibrio, L_{xeq} se utiliza como variable de diseño, y los valores de R_2 , y R_x se calculan según las condiciones de equilibrio.

TABLA IV: Punto de equilibrio variable y R_1 y R_3 constantes

Componentes				Polos de la función de transferencia		
L_{xeq}	R_2	R_x		$S_{p1}(L_{x\max})$	$S_{p1}(L_{x\min})$	S_{p2}
10 mH	1 Ω	100 Ω		133,95 kHz	200,93 kHz	160,74 kHz
50 mH	5 Ω	500 Ω		27,85 kHz	41,77 kHz	33,42 kHz
200 mH	20 Ω	2 k Ω		7,95 kHz	11,93 kHz	9,54 kHz

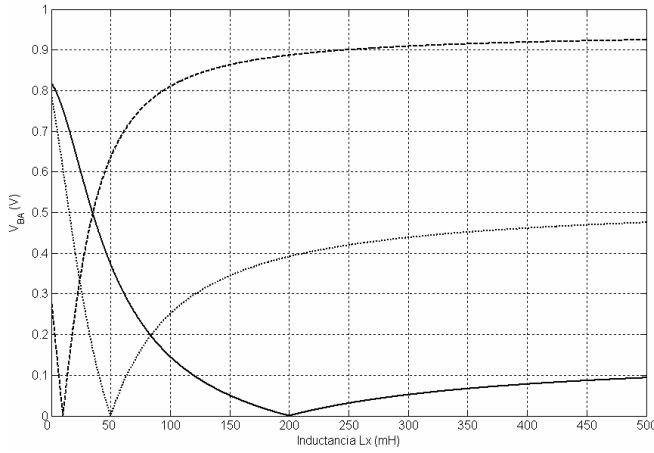


Figura 7: Módulo de V_{BA} con R_1 y R_3 constantes y punto de equilibrio variable

E. Simetría en torno al punto de equilibrio del puente

El otro aspecto importante en el diseño del puente es la simetría del módulo de V_{BA} en torno al punto de equilibrio. Lo ideal es que la variación en torno a dicho punto, y dentro de un cierto margen, sea simétrica. Para saber si es posible, se plantea el módulo de V_{BA} para dos inductancias diferentes tales que:

$$\begin{cases} L_{xa} = L_{xeq} - \Delta L_a \\ L_{xb} = L_{xeq} + \Delta L_b \end{cases} \Rightarrow |V_{BA}(L_{xa})| = |V_{BA}(L_{xb})| \quad (16)$$

Resolviendo (16) con $\Delta L_x = \Delta L_a = \Delta L_b$, se llega a que no existe ningún valor real (a excepción de $\Delta L_x = 0$) que cumpla con $|V_{BA}(L_x + \Delta L_x)| = |V_{BA}(L_x - \Delta L_x)|$. Por esto, se plantea (16) suponiendo dos “ Δ ” diferentes y se busca su relación:

$$\omega^2(B^2 + \omega^2 C^2 R_1^2 R_2^2)(\Delta L_{xa} + \Delta L_{xb})[2\Delta L_{xa}\omega^2 R_1^2 C R_2 R_3 \Delta L_{xb} + \Delta L_{xa}\omega^2 R_1^2 C^2 R_2^2 R_3^2 \dots - \Delta L_{xa}A^2 + \Delta L_{xa}R_1^2 D^2 + 2A^2 C R_2 R_3 - \Delta L_{xb}\omega^2 R_1^2 C^2 R_2^2 R_3^2 + \Delta L_{xb}A^2 - \Delta L_{xb}R_1^2 D^2] = 0 \quad (17)$$

La primera condición de ΔL_{xa} y ΔL_{xb} que cumple con (17) es $\Delta L_{xa} = -\Delta L_{xb}$. Sin embargo, esta condición no tiene sentido práctico ya que se obtendría que $L_{xa} = L_{xb}$. La otra condición que cumple con (17) es:

$$2\omega^2 C R_1^2 R_2 R_3 \Delta L_{xa} \Delta L_{xb} + [\omega^2 C^2 R_1^2 R_2^2 R_3^2 - A^2 + R_1^2 D^2](\Delta L_{xa} - \Delta L_{xb}) + 2A^2 C R_2 R_3 = 0 \quad (18)$$

$$\Delta L_{xa} = \frac{[\omega^2 C^2 R_1^2 R_2^2 R_3^2 + R_1^2 D^2 - A^2] \Delta L_{xb} - 2A^2 C R_2 R_3}{[2\omega^2 C R_1^2 R_2 R_3 \Delta L_{xb} + \omega^2 C^2 R_1^2 R_2^2 R_3^2 + R_1^2 D^2 - A^2]} \quad (19)$$

La relación entre ΔL_{xa} y ΔL_{xb} para que el módulo de V_{BA} sea igual a ambos lados del punto de equilibrio no es lineal. Sin embargo, en función de los componentes del puente se puede aproximar en forma lineal. En la Fig. 8 se pueden apreciar las curvas que corresponden a los incrementos de inductancia, representadas en forma porcentual respecto de la magnitud de la inductancia de equilibrio L_{xeq} . El comportamiento es levemente diferente en los tres casos, aunque para incrementos de inductancias pequeños, del orden de 15 a 20% del valor total de la inductancia de equilibrio L_{xeq} , la relación es casi lineal en cualquier caso. De esta forma se llega a la conclusión de que cuanto menor es la inductancia correspondiente al punto de

equilibrio, más lineal es la relación entre ΔL_{xa} y ΔL_{xb} , y por tanto, hay un mayor grado de simetría del módulo V_{BA} en torno al punto de equilibrio.

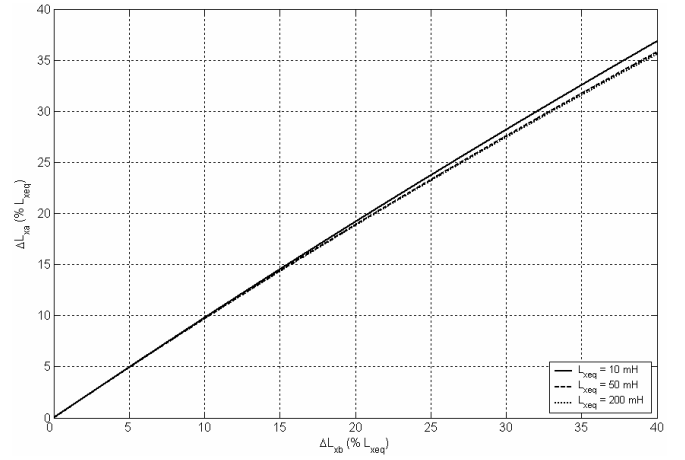


Figura 8: ΔL_{xa} en función de ΔL_{xb} con diferentes inductancias de equilibrio

F. Magnitudes de tensión y corriente

Finalmente, hay que tener en cuenta las magnitudes de la tensión y corriente en el sensor. Esto es importante ya que influye en la inmunidad al ruido y en la calidad de la señal a procesar. Las simulaciones previas se hicieron con tensión de módulo unitario, pero en la práctica se usarán 24V, con $\approx 5mA$

$$\left| \frac{V_s}{I_B} \right| = \frac{24V}{5mA} = 4,8K\Omega$$

La resistencia de la rama del array debería ser $\approx 5K\Omega$. Por lo expuesto en el punto III.A, cuanto más elevada es R_3 , más sensibilidad tiene el puente. Las constantes de tiempo de las dos ramas deben ser iguales, y es preferible que sean lo más cercanas a la frecuencia de modulación. Es necesario adoptar algunos valores y calcular el resto mediante las condiciones de equilibrio y el polo S_{p2} .

$$R_3 = 1k\Omega$$

$$C = 1\mu F$$

$$S_{p2} = 2 \cdot \pi \cdot 50KHz = 314159 \text{ rad/s}$$

$$L_{xeq} = 15mH$$

Las inductancias mínima y máxima son $\pm 20\%$ de la L_{xeq} , o sea, 12mH y 15mH.

R_1	R_2	R_x	$S_{pt}(L_{x\max})$	$S_{pt}(L_{x\min})$
3,58 Ω	15 Ω	4,18 k Ω	45,83 kHz	68,75 kHz

El array de sensores tiene una inductancia total L_x y una resistencia total R_x , que incluyen tanto las inductancias y resistencias de cada bobina, así como la inductancia y resistencia debidas al cable que las conecta. La resistencia del cable es del orden de 15 Ω a 50 Ω por kilómetro y la inductancia es del orden de 1mH por kilómetro. Por tanto, la influencia del cable no es demasiado importante frente a las magnitudes de los componentes utilizados.

IV. ARRAY CON OCHO PUNTOS DE DETECCIÓN

Para ejemplificar el funcionamiento del sistema completo, se propone un array con ocho puntos de detección (Fig. 9) y utilizando los componentes calculados en el punto III.F. En la Fig. 10 se representa el módulo y la fase de V_{BA} considerando una señal de módulo unitario y en la tabla V se resumen esos datos, tanto para el caso de una tensión unitaria como para el de una tensión de excitación de módulo 24V. Estos datos están referidos a los cambios en L_x cuando el objeto a detectar está posicionado sobre alguno de los puntos de detección (PD). Los valores de ΔL_x se seleccionaron de manera tal de producir variaciones aproximadamente proporcionales en el módulo de V_{BA} . Los valores de k y r_M se consideran iguales porque todas las bobinas están montadas físicamente de la misma forma, y el efecto del paso del objeto es similar en todos los puntos de detección. M^{free} fue diseñado teniendo en cuenta (5) y (1) cuando la detección es nula.

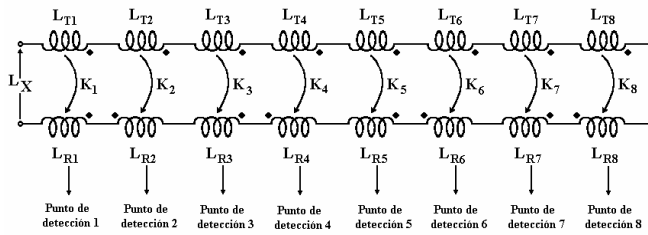


Fig. 9: Array con ocho puntos de detección

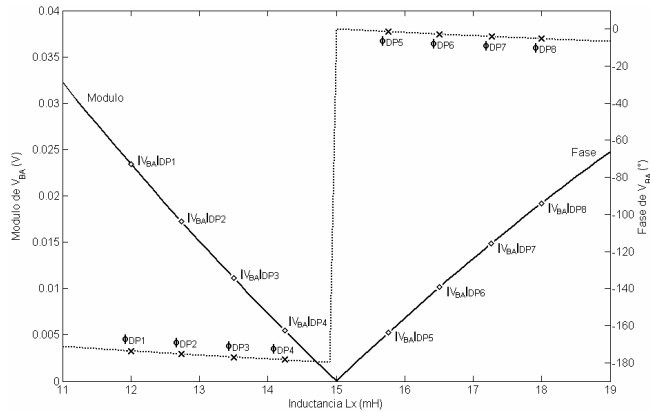


Fig. 10: Módulo y fase de V_{BA} para una tensión de excitación unitaria

TABLA V: Magnitudes de los parámetros de diseño para el array de sensores

PD	r_M	K	$M^{free}(mH)$	$\Delta L_x(mH)$	$L_x(mH)$	$\Delta V_{BA}(V_g=1V)$	$\Delta V_{BA}(V_g=24V)$
1	0.1	0.55	+1.65	-3.00	12.00	0.0235	0,5640
2	0.1	0.55	+1.23	-2.25	12.75	0.0172	0,4128
3	0.1	0.55	+0.82	-1.50	13.50	0.0113	0,2712
4	0.1	0.55	+0.41	-0.75	14.25	0.0055	0,1320
5	0.1	0.55	-0.41	+0.75	15.75	0.0055	0,1320
6	0.1	0.55	-0.82	+1.50	16.50	0.0111	0,2664
7	0.1	0.55	-1.23	+2.25	17.25	0.0148	0,3552
8	0.1	0.55	-1.65	+3.00	18.00	0.0194	0,4656

La tensión V_{BA} tiene la misma forma de onda que la señal utilizada para excitar el puente, pero deformada y con ruido añadido. Para poder identificar exactamente cual es el punto de detección donde se encuentra el objeto, se procesa V_{BA} mediante la función de correlación, previa conversión A/D de la misma. En la Fig. 11 se aprecian los resultados del procesamiento cuando el objeto a detectar pasa por todos los puntos de detección. La posición se determina mediante la amplitud y polaridad de los picos de correlación. Este procesamiento tiene la ventaja de que tanto la demodulación como la correlación pueden ser aplicadas en forma sincrónica, con lo cual se eliminan los lóbulos laterales asociados a la detección asincrónica [1].

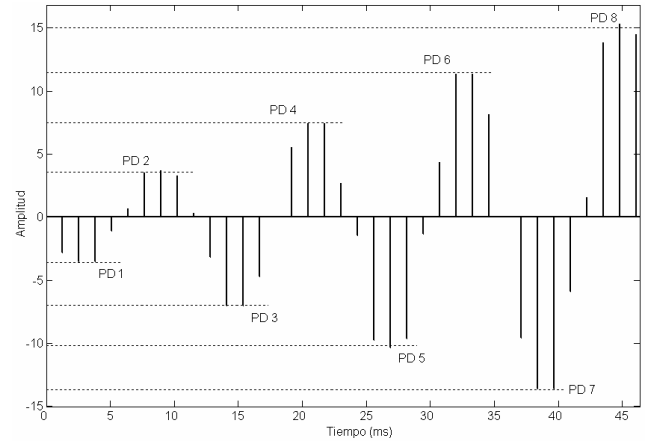


Fig. 11: Resultado de la correlación de V_{BA} utilizando secuencias Golay

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un estudio sobre un array de sensores de posición basado en un puente de alterna. Dicho array es de tipo inductivo, detectándose el paso del objeto mediante las variaciones en la inductancia total del mismo. El estudio sobre el diseño y ajuste del puente permite realizar un diseño óptimo del sistema sensor completo. Se establecieron condiciones de diseño que garantizan un máximo de sensibilidad y de nivel de la señal recibida dentro de rangos aceptables de consumo y disponibilidad de componentes. El uso de secuencias Golay junto con la correlación permite identificar claramente los puntos de detección.

VI. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del Ministerio de Ciencia y Tecnología de España, a través del proyecto PARMEI (referencia DPI2003-08715-C02-01).

REFERENCIAS

- [1] P. Donato, J. Ureña, M. Mazo, F. Álvarez, J.J.García, "Electromagnetic sensor array for train wheel detection", *3rd IEEE Sensor Array and Multichannel signal processing workshop SAM'04*, 18-21 Julio, 2004, Sitges, España.
- [2] P. Donato, J. Ureña, M. Mazo, F. Álvarez, "Train wheel detection without electronic equipment near the rail line", *2004 IEEE Intelligent Vehicles Symposium IV04*, pp.876-880, 14-17 Junio, 2004, Parma, Italia.
- [3] M.J.Golay, "Complementary Series", *IRE Trans.*, IT-7, pp.82-87, 1961.
- [4] Tseng, C.-C., Liu, C.L. "Complementary Sets of Sequences", *IEEE Transactions on information theory*, Vol. IT-18 No. 5, pp 644-652. 1972