

Estudio de la Influencia de la Geometría de las Bocinas en la Ganancia sobre el Eje de Radiación de Sensores Ultrasónicos en Aire

Fernández M. *, Rodríguez C., Alonso L., Pérez-Oria J.

*Grupo de Ingeniería de Control. Departamento de Tecnología Electrónica e Ingeniería de Sistemas y Automática,
Universidad de Cantabria, Av. Los Castros s/n, 39005, Santander, España.*

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos sobre el aumento de ganancia de un sensor ultrasónico, cuando al sensor se le acoplan bocinas con forma cónica de diferentes longitudes y aperturas, realizado mediante simulaciones y validados experimentalmente. En la parte de la simulación, se construye un modelo, usando la técnica de elementos finitos, que permite obtener los valores de apertura y longitud de la bocina para los que la ganancia sobre el eje de radiación es máxima. A estos valores se les denomina ángulo de ganancia máxima y longitud de ganancia máxima, respectivamente. Las medidas experimentales se llevan a cabo empleando sensores a distinta frecuencia, y acoplando a los mismos bocinas con diferentes características geométricas. Del mismo modo que en las simulaciones, se obtienen los ángulos y longitudes que proporcionan ganancias máximas. En la última parte del trabajo se presentan las comparaciones de los resultados obtenidos entre simulaciones y medidas experimentales, observando una excelente concordancia con el análisis realizado del modelo simulado. Copyright © 2013 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Palabras Clave:

Sensores ultrasónicos, elementos finitos, sistemas de control, automatización industrial, adquisición de datos, procesado de datos.

1. Introducción

Entre las aplicaciones comunes de los ultrasonidos se pueden encontrar tareas de naturaleza muy diversa, desde procesos industriales en la medida de espesores y distancias (Carullo and Parvis, 2001) o el reconocimiento de objetos (Egaña et al., 2008; Llata et al., 2001; Pérez-Oria and Groba, 1993), hasta controles de calidad para la detección de defectos en piezas (Arce et al., 1998; Pérez-Oria et al., 2002, Ramírez et al., 1996; Rodríguez et al., 2010), así como multitud de aplicaciones en el campo de la medicina (Álvarez Fernández and Pérez Quintero, 2006; Ceres 2006; Abellanas et al., 2008.) para su uso en la detección de tumores, aplicaciones ginecológicas, etc.

El modelo más sencillo de un sensor ultrasónico es el de un pistón mecánico con forma de disco. El pistón se encarga de transmitir el movimiento vibratorio (longitudinal y transversal) a partículas de materiales contiguos, suponiendo que la superficie del mismo oscila con una amplitud y fase constantes. La expresión de la presión acústica p sobre el eje de radiación a una distancia d del oscilador viene dada por la ecuación (1), en la cual D es el diámetro del oscilador, λ la longitud de onda y p_0 la presión en el origen (Kinsler et al., 1982; Ramírez et al., 1996).

$$p = p_0 \cdot 2 \cdot \operatorname{sen} \left[\frac{\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{D^2}{4} + d^2} - d \right] \quad (1)$$

Para el caso de grandes distancias ($d \gg D^2/4\lambda$), la ecuación (1) puede aproximarse por la ecuación (2). En esta expresión se observa que la presión acústica es proporcional al cuadrado del diámetro e inversamente proporcional a la longitud de onda.

$$p = p_0 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4\lambda} \cdot \frac{1}{d} \quad (2)$$

Teniendo en cuenta la relación entre la longitud de onda, la frecuencia (f) y la velocidad de propagación del sonido en el medio (c), expresada en (3), se deduce que la presión acústica es proporcional a la frecuencia y tamaño del sensor. Se ha de tener en cuenta que la velocidad de propagación en el medio depende de la temperatura y la humedad del mismo (Cacicero et al., 1994). La influencia de la temperatura en la velocidad de propagación es aproximadamente 40 veces más grande que la influencia de la humedad (Alonso et al., 2004, b), por lo que tanto

* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: monica@teisa.unican.es (Fernández M.),
cristina.alonso.oria@teisa.unican.es

para las simulaciones como las medidas en el laboratorio sólo se tuvo en cuenta la temperatura.

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (3)$$

Con todo esto se deduce que el uso de ultrasonidos en una aplicación concreta está limitado por la potencia, el tamaño y la frecuencia de operación del sensor.

En determinadas aplicaciones en las que el uso de ultrasonidos es viable, es necesario modificar el alcance o la directividad del patrón de radiación. Existen diversas opciones que permiten esta modificación, que incluyen el uso de sensores de distinta frecuencia o tamaño, el empleo de matrices de sensores o el acoplamiento de elementos mecánicos al propio sensor. El empleo de sensores de distinta frecuencia o tamaño viene limitado por la propia aplicación y por la disponibilidad comercial de los mismos, mientras que el uso de matrices lleva intrínsecamente un aumento en la complejidad hardware. El acoplamiento de elementos mecánicos (bocinas), no aumenta la complejidad del sistema mientras que se consigue una modificación en el patrón de radiación (Alonso et al., 2004, a; Alonso et al., 2005; Fernández et al., 2006; Fernández et al., 2010). Es lógico pensar que tanto las características físicas como geométricas del elemento acoplado modifican el diagrama de radiación ultrasónico. Es ahí donde surge la necesidad de construir un modelo que permita relacionar los parámetros de la bocina con las características del lóbulo de radiación adecuado a cada aplicación (Udawalpola and Berggren, 2007; Noreland et al., 2010; Udawalpola et al., 2011). En este trabajo únicamente se realiza el estudio sobre la modificación de la ganancia sobre el eje de radiación.

Para la elaboración de estos modelos es necesario usar herramientas software que sean capaces de obtener por simulación patrones de radiación que representen fielmente los patrones de radiación reales. Entre las distintas técnicas existentes para la simulación, como son elementos de contorno, diferencias finitas o elementos finitos, se eligió ésta última por su disponibilidad y versatilidad. En concreto, el software utilizado fue Comsol Multiphysics (Comsol Multiphysics, 2011).

En el apartado 2 del trabajo se presenta el modelo de elementos finitos usado en las simulaciones. Además se describe el proceso de simulación seguido con el fin de obtener los parámetros de longitud y apertura de la bocina adecuados para la obtención del valor máximo de presión acústica sobre el eje de radiación.

En el apartado 3 se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones del apartado anterior.

En los apartados 4 y 5 se presentan una breve descripción del sistema diseñado para la realización de las medidas, con el fin de validar el modelo de elementos finitos. La elección de las geometrías de los elementos acopladores usados se ha basado en los parámetros obtenidos de las simulaciones.

En el apartado 6 se muestran las comparaciones realizadas entre las medidas y las simulaciones. En este apartado se muestran los buenos resultados obtenidos con el modelo simulado, quedando validado el mismo. Este modelo se usará con posterioridad, para el diseño de la bocina que proporcione las mejores características de ganancia sobre el eje de radiación, en función de la longitud y apertura de la misma, evitando la realización de un gran número de pruebas experimentales.

Finalmente, en la última parte del trabajo se presentan las principales conclusiones obtenidas.

2. Descripción de las simulaciones

El problema que se describe en las simulaciones es la obtención de la presión acústica obtenida por la radiación de un cristal piezoelectrónico con forma de disco, en dos casos bien diferenciados. El primero de ellos trata de la obtención del patrón de radiación únicamente del cristal piezoelectrónico, conocido como radiación libre. El segundo de los casos incorpora la presencia de un elemento mecánico acoplado al sensor y que modificará el patrón de radiación anterior. La elección de los diámetros de los osciladores y la frecuencia de operación de los mismos son determinadas por las características de los sensores ultrasónicos utilizados en las medidas experimentales llevadas a cabo en el laboratorio.

Para la realización de las medidas experimentales se dispuso de sensores ultrasónicos operando a las frecuencias de 25 KHz y 40 KHz. Con el fin de comparar los resultados obtenidos en medidas y simulaciones, en estas últimas también se usaron las mismas frecuencias. Por otro lado, y con el fin de maximizar el uso reiterado de las mismas bocinas con distintos sensores, éstas se diseñaron para que por la zona por la que se va a producir el acoplamiento tuviera un radio de valor igual al máximo del radio de los sensores disponibles en el laboratorio, siendo este valor 10 mm. Para que se pueda realizar un perfecto acoplamiento entre el sensor y la bocina es necesario la utilización de una pieza cuyo radio externo sea siempre de 10 mm, mientras que el interno podrá variar, siempre y cuando no se supere el radio del sensor real usado. En este trabajo se usaron acopladores de 3 mm, 5 mm y 7 mm, elegidos al azar, y con la única consideración de que no superen el radio real del sensor, que es 10 mm.

La velocidad de propagación usada es de 343 m/s ya que se considera que la temperatura en el medio es de 20 °C.

2.1. Radiación libre

El software utilizado para la simulación permite la resolución de problemas en los que intervienen fenómenos físicos de diferente naturaleza (simulación multifísica), siempre y cuando estén acoplados por medio de alguna variable física. En el presente trabajo dichos fenómenos son la vibración de un cristal por el efecto piezoelectrónico y la propagación acústica en el aire.

La Figura 1 muestra el problema de la radiación libre, en la cual Ω_1 representa el cristal piezoelectrónico, y Ω_2 es el medio de propagación de la onda acústica, en este caso, aire.

Teniendo en cuenta el hecho de que el patrón de radiación presenta simetría cilíndrica respecto del eje de radiación, se puede reducir el problema tridimensional a un problema de dos dimensiones. Explotando la simetría del problema se reduce la zona simulada a la representada en la Figura 1. Con esto se consigue una disminución del alto coste computacional, que se aprovecha para aumentar la distancia de simulación, tanto en el eje *y* como en el eje *x*.

Resulta necesario asegurarse que la zona simulada alcance zona de campo lejano. En la Tabla 1, se muestra la longitud del campo próximo (*N*), expresada en mm, calculado a partir de la expresión (4).

Para la simulación del cristal piezoelectrónico (Ω_1) se ha empleado el material PZT5-H (Lead Zirconate Titanate), que es

un componente comúnmente usado para la fabricación de sensores ultrasónicos. El espesor del cristal piezoelectrónico simulado es de 5 mm, aunque este valor no afecta a la propagación ultrasónica (Fernández et al., 2010).

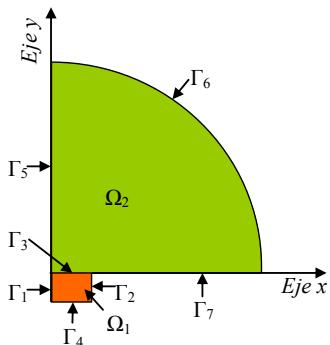


Figura 1: Representación de los dominios usados en la simulación

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (4)$$

Tabla 1: Frontera entre el campo próximo y lejano (mm)

		Frecuencia (KHz)	
		25	40
Radio (mm)	3	0.7	1.0
	5	1.8	2.9
	7	3.6	5.7

En Ω_2 se produce la propagación de la onda acústica en el aire, cumpliéndose por tanto la ecuación de Helmholtz (Kinsler et al., 1982), mostrada en (5),

$$\Delta p(\vec{r}) + k^2 \cdot p(\vec{r}) = 0 \text{ en } \Omega_2 \quad (5)$$

donde Δ es el operador laplaciano, r es la posición, k es el número de onda válido para el dominio de trabajo establecido.

Una vez definidos los dominios, el siguiente paso en el método de elementos finitos es establecer las condiciones de contorno para cada dominio.

Las condiciones de contorno del cristal piezoelectrónico se establecen como: la frontera izquierda (Γ_1) se corresponde con el eje de simetría, la frontera derecha (Γ_2) tiene una carga nula, a la superficie superior del cristal (Γ_3) se le impone un valor de tensión de 10 V y mientras que en la inferior (Γ_4) se le referencia a tierra. La diferencia de tensión entre estas dos últimas superficies es la causante de las oscilaciones del mismo.

La frontera izquierda del dominio del aire (Γ_5) coincide con el eje de simetría, al igual que en el dominio Ω_1 . En los contornos Γ_6 y Γ_7 se produce la condición de propagación de la onda acústica, expresada en (6),

$$\frac{\partial p}{\partial n} = ikp \text{ en } \Gamma_6 \text{ y } \Gamma_7 \quad (6)$$

en la que n es la normal hacia el exterior e i la unidad imaginaria.

Para la interfaz entre los dominios Ω_1 y Ω_2 , es decir, entre la superficie superior del sensor y el aire, la condición de contorno viene dada por (7).

$$n(\vec{\nabla}p) = a_n \text{ en } \Gamma_3 \quad (7)$$

donde a_n es la aceleración normal de la superficie del cristal. De esta forma se consigue que la diferencia de tensión aplicada a las superficies inferior y superior del cristal del Ω_1 , pase al Ω_2 en forma de presión acústica.

2.2. Radiación con elemento mecánico acoplado

El segundo tipo de simulación se realiza cuando al sensor ultrasónico se le acopla un elemento mecánico de tipo bocina. En este trabajo, la forma del elemento acoplado se restringe a una bocina en forma de tronco cónico. En la Figura 2 se muestran los parámetros del elemento acoplado, donde L es la longitud de la bocina, α la apertura, también de la bocina, y r el radio menor del cono.

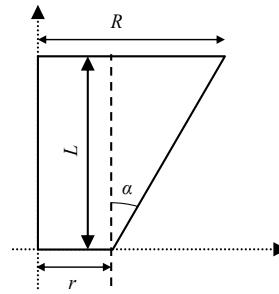


Figura 2: Geometría de la bocina

A partir de los parámetros de la bocina se puede obtener el radio R mayor de la bocina como se muestra en (8).

$$R = r + L \cdot \tan(\alpha) \quad (8)$$

El radio menor del cono tendrá siempre el mismo valor, para que de esta forma coincida con los elementos mecánicos reales usados en las medidas. Como ya se ha comentado anteriormente, el valor es de 10 mm. La relación entre el radio del sensor (r_s) y el radio inferior del cono (r) viene dada por la ecuación (9), en la que e_a se corresponde con el espesor de la pieza usada para el acoplamiento del sensor y la bocina.

$$r = r_s + e_a \quad (9)$$

En este caso, la inclusión de este elemento implica añadir un tercer dominio que represente adecuadamente el elemento que se acopla al transductor y cuya función es modificar su patrón de radiación, es decir, el dominio Ω_3 simula una bocina. En la Figura 3 se muestra la nueva situación en la que se llevarán a cabo las simulaciones. Este nuevo dominio, Ω_3 , tiene las mismas características que Ω_1 , y por lo tanto también se verifica la ecuación de Helmholtz, ecuación (5).

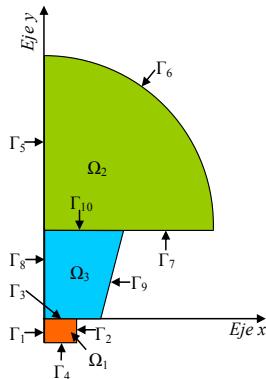


Figura 3: Representación de los dominios para el caso de utilización de elemento acoplador.

En esta nueva situación, el contorno Γ_8 cumple la condición de eje de simetría, al igual que en los dominios Ω_1 y Ω_5 . En el contorno Γ_9 , que representa la pared interna de la bocina, se verifica la condición de reflexión total, es decir, que no se absorbe ni se propaga la señal por dicho contorno y que se muestra en la ecuación (10).

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \text{ en } \Gamma_9 \quad (10)$$

En la interfaz Γ_3 , se cumple la misma condición que la diferencia de tensión aplicada a las superficies del cristal piezoelectrónico se transmiten al dominio de aire en forma de onda de presión, es decir, se cumple la ecuación (7). En la superficie de unión de los dominios Ω_2 y Ω_3 , que se corresponde con Γ_{10} , se cumple la ley de propagación acústica, ecuación (6), y se ha de resaltar que ambos dominios tienen las mismas características y por tanto la onda continúa propagándose por Ω_2 sin ningún tipo de discontinuidad a como lo hacía en Ω_2 .

En el proceso de simulación se variaron los radios y las frecuencias del sensor, tanto en el caso de radiación libre como empleando elementos mecánicos. Además en el caso de uso de bocinas, se variaron la longitud y el ángulo de apertura de las mismas. Para la longitud se realizaron simulaciones desde 2 cm a 13 cm con un paso de 1 cm. No se simularon longitudes mayores debido a que, por el alto coste computacional requerido en la simulación, sólo se alcanzan distancias totales de 60 cm. El ángulo de apertura de las bocinas va desde 0° a 89° con un paso de 1°.

Cuando al sensor se le acoplan bocinas se consigue la modificación del patrón de radiación debido al fenómeno de interferencias, tanto constructivas como destructivas, que se producen dentro de la misma. En esta situación se puede calcular, mediante (4) y (8), la nueva zona de campo próximo, contada a partir del extremo de la bocina, y teniendo en cuenta que el diámetro de la superficie radiante coincide con el diámetro mayor del elemento acoplado. Se eligieron bocinas que proporcionan una longitud de campo próximo de 40 cm para tener dentro del rango de simulación, 60 cm, una zona de 20 cm de campo lejano en la que poder observar la evolución. En la Figura 4 se muestra la frontera de decisión entre el campo próximo y lejano en función de los parámetros de la bocina. Los valores de apertura y longitud de la bocina que se sitúen a la izquierda de esta frontera, proporcionan que el campo lejano empieza a partir de 40 cm

contados a partir de la bocina. Cabe destacar que para longitudes de bocina grandes, se puede restringir el ángulo de apertura hasta los 30°.

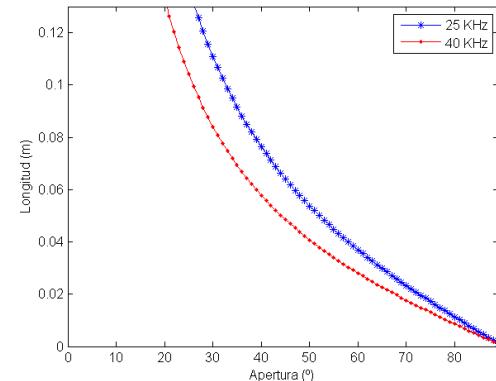


Figura 4: Frontera de decisión a 25 KHz y 40 KHz entre campo lejano y próximo.

3. Resultados de las simulaciones

La ganancia de una bocina se define como la relación existente entre la presión acústica con elemento acoplador y la presión acústica en radiación libre (McLean et al., 1992; Kolbrek, 2008). Teniendo en cuenta que el objetivo principal a conseguir, en este trabajo, es el aumento de la presión acústica sobre el eje de radiación, se necesita encontrar cómo afectan la apertura y la longitud de la bocina.

3.1. Ángulos de apertura de la bocina que proporcionan ganancias mayores de la unidad en el eje

En la Figura 5 se muestran los ángulos mínimo y máximo que ha de tener la apertura de la bocina para que se produzca un aumento en la presión acústica en función de la longitud de la misma cuando la frecuencia del ultrasonido es 25 KHz y el radio del piezoelectrónico 5 mm. Para la representación de los datos relativos al ángulo de ganancia máxima se ha usado un ajuste lineal. Cabe destacar que para la longitud de la bocina simulada de 2 cm no hay ninguna apertura para la que se produzca un aumento de presión ultrasónica sobre el eje de radiación.

Para la realización de todos los cálculos de ganancia, en las simulaciones, se ha considerado su obtención a la distancia de 60 cm, por ser esta la distancia más grande de la que se dispone. Aunque cabe destacar que dentro de las zonas de campo lejano, los resultados coinciden. En la Figura 6 se muestran estos ángulos máximos y mínimos para las distancias de 40 cm, 50 cm y 60 cm, respectivamente.

Con el fin de comprobar si el radio del sensor afecta a los ángulos máximos y mínimos en los que se obtiene un aumento de ganancia, se realizaron simulaciones a 25 KHz y 40 KHz para radios de sensores de 3 mm, 5 mm y 7 mm, mostrándose los resultados obtenidos en la Figura 7. En esta figura se observa que cuando se mantiene el valor de la frecuencia, el ángulo mínimo apenas depende del tamaño del sensor, mientras que el ángulo máximo disminuye al aumentar el tamaño del sensor.

En la Figura 8 se muestran los resultados obtenidos, en los ángulos mínimo y máximo, al mantener constante el radio del sensor y variar la frecuencia. Se puede observar que el ángulo

mínimo es independiente de la frecuencia, mientras que el valor del ángulo máximo disminuye al aumentar la frecuencia.

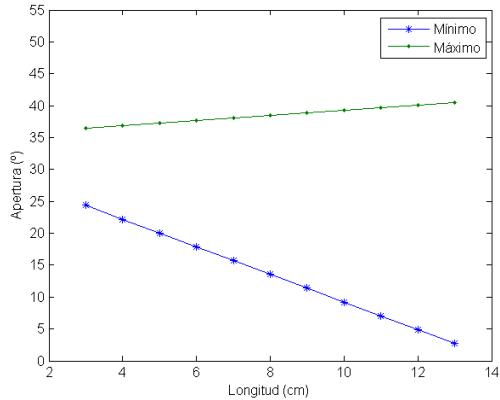


Figura 5: Ángulos mínimos y máximos para aumento en la presión acústica a frecuencia de 25 KHz y radio sensor de 5 mm a distancia de 60 cm.

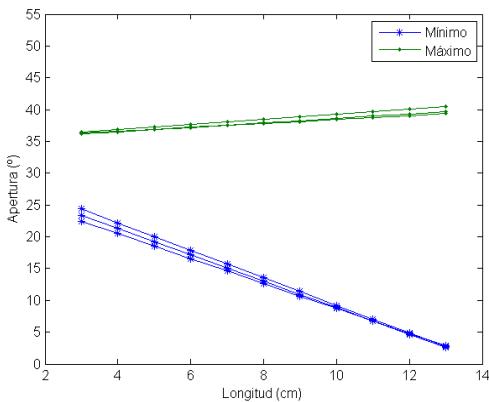


Figura 6: Ángulos mínimos y máximos para aumento en la presión acústica, a varias distancias, a frecuencia de 25 KHz y 5 mm de radio.

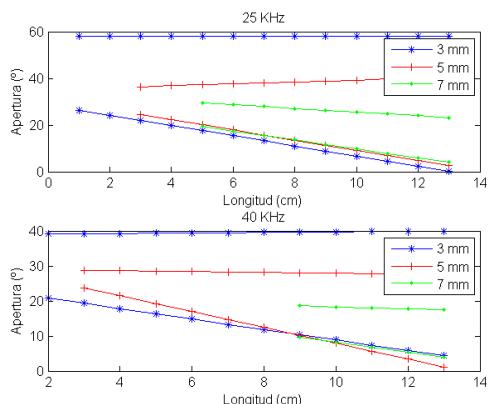


Figura 7: Ángulos mínimos y máximos para aumento de presión acústica, para radio de sensor de 3 mm, 5 mm y 7 mm a frecuencias de 25 KHz y 40 KHz, respectivamente.

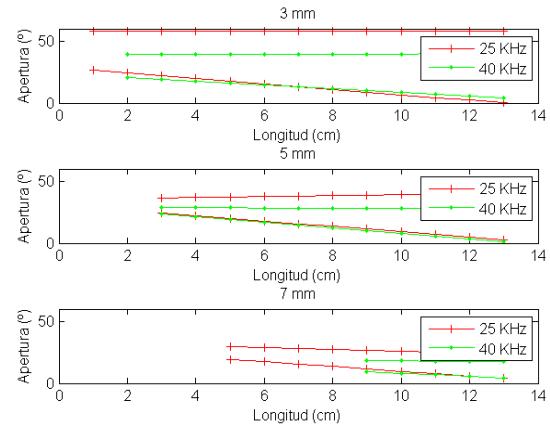


Figura 8: Ángulos mínimos y máximos para aumento de presión acústica para radio de sensor de 3 mm, 5 mm y 7 mm a frecuencias de 25 KHz y 40 KHz, respectivamente.

3.2. Ángulos de ganancia máxima

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la obtención del ángulo de apertura de la bocina para el cual la ganancia sobre el eje de radiación es máxima. A este ángulo se le denominará ángulo de ganancia máxima.

En la Figura 9 se muestra el ángulo de ganancia máxima, después de aplicar un ajuste lineal, cuando se mantiene el valor de frecuencia constante y se varía el tamaño del piezoelectrónico. En ella se puede observar que este ángulo es independiente del tamaño del sensor.

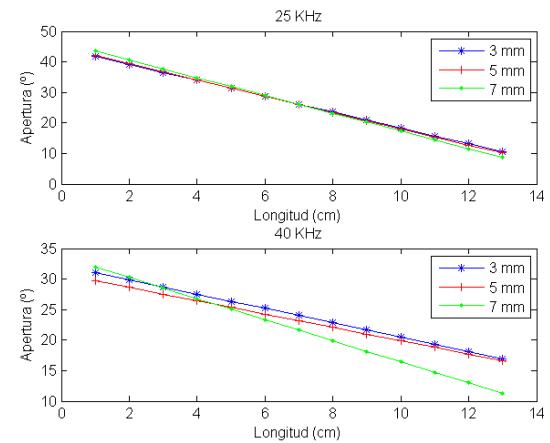


Figura 9: Ángulos de ganancia máxima para radio de sensor de 3 mm, 5 mm y 7 mm a frecuencias de 25 KHz y 40 KHz, respectivamente.

En la Figura 10 se representa el caso en el que se mantienen los radios de los sensores y se varía la frecuencia. En ella se observa que cuando las longitudes de la bocina son pequeñas, el ángulo de ganancia máxima es mayor para frecuencias pequeñas, mientras que al aumentar la longitud de la bocina el ángulo de ganancia máxima aumenta con la frecuencia. Cabe destacar el hecho de que el corte de ambas curvas aumenta cuando aumenta el tamaño del sensor.

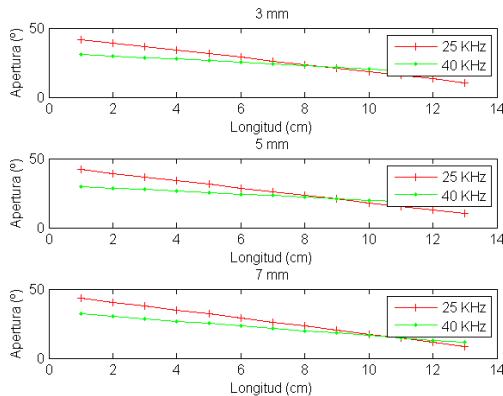


Figura 10: Ángulos de ganancia máxima cuando se mantiene el radio del sensor en 3 mm, 5 mm y 7 mm, a 25 KHz y 40 KHz.

Además de obtener el valor del ángulo de ganancia máxima, resulta interesante la representación de los valores de ganancia en dicho ángulo. En las Figuras 11 y 12 se presentan estos valores de ganancia cuando se varían los radios de los sensores manteniendo la frecuencia constante y viceversa, es decir, manteniendo constante el tamaño del sensor y variando la frecuencia. Para la obtención de ambas figuras se ha realizado un ajuste lineal de las curvas. De estas graficas se puede concluir que la ganancia aumenta al disminuir el radio del sensor y/o al disminuir la frecuencia.

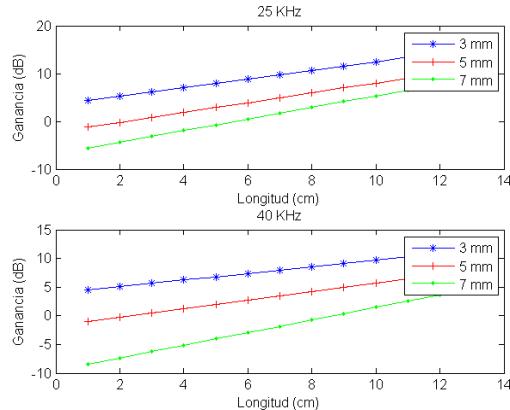


Figura 11: Ganancia en el ángulo de ganancia máxima para radios de 3 mm, 5 mm y 7 mm a 25 KHz y 40 KHz, respectivamente.

3.3. Longitudes de la bocina que proporcionan ganancias mayores de la unidad

Teniendo en cuenta (8), además de la apertura, el otro parámetro de una bocina cónica que describe su geometría es la longitud. De manera análoga a la seguida con la apertura, es necesario realizar un estudio de la influencia de la longitud de la bocina en la ganancia de presión acústica sobre el eje de radiación.

En la Figura 13 se muestran las longitudes que proporcionan aumento en la presión acústica sobre el eje de radiación para las frecuencias de 25 KHz y 40 KHz, respectivamente, y radios de 3 mm, 5 mm y 7 mm. En ella no se observa ninguna correlación de

la longitud de la bocina y los aumentos de ganancia para los distintos casos.

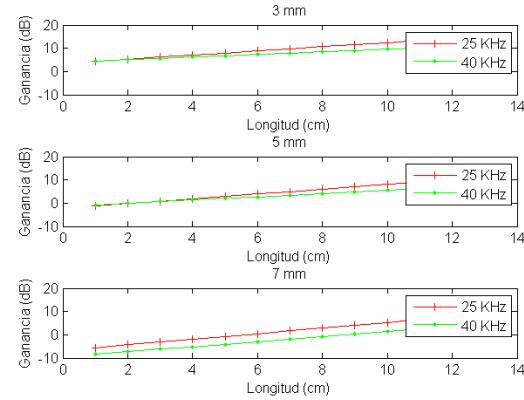


Figura 12: Ganancia en el ángulo de ganancia máxima cuando se mantiene el radio del sensor en 3 mm, 5 mm y 7 mm, a 25 KHz y 40 KHz.

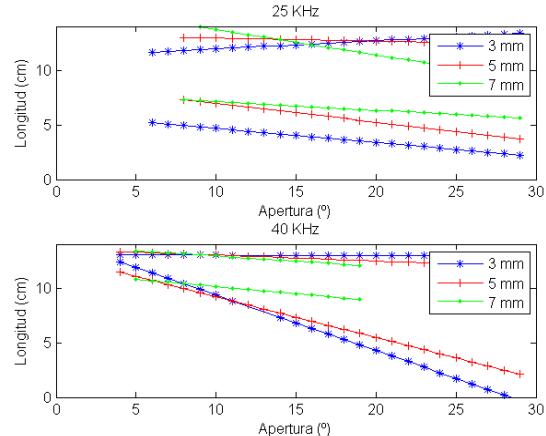


Figura 13: Longitudes máximas y mínimas que proporcionan valores mayores de la unidad en la ganancia para 25 KHz y 40 KHz, y radios de 3 mm, 5 mm y 7 mm.

3.4. Longitud de ganancia máxima

En la Figura 14 se muestra la longitud de la bocina a la que se obtiene la ganancia máxima para la frecuencia de 25 KHz y radios de sensor de 3 mm, 5 mm y 7 mm. Para la obtención de este parámetro se ha usado un ajuste polinomial de grado cuatro. En ella se observa que las curvas son muy similares hasta valores de apertura de 30°. Para este valor de apertura y en las condiciones de simulación descritas, se está en la zona de campo lejano para todas las longitudes de bocinas simuladas (Figura 4). Razón por la que se limitaron las simulaciones posteriores hasta una apertura de 30°.

En las Figuras 15 y 16 se muestran los valores de longitud de ganancia máxima en los casos en que se mantiene la frecuencia constante y el radio constante, respectivamente. En ellas se observa que la longitud de ganancia máxima, excepto para el caso de frecuencia 40 KHz y radio de 7 mm, es independiente del tamaño del sensor. Por otro lado, también se observa que, al aumentar el valor de la frecuencia de operación, el valor de

apertura para la cual se obtiene el máximo en la longitud de la bocina, disminuye. El aumento de frecuencia conlleva un aumento en el coste computacional, lo que obliga a disminuir ligeramente la resolución necesaria, provocando en ese caso esas pequeñas influencias producidas por el tamaño del sensor.

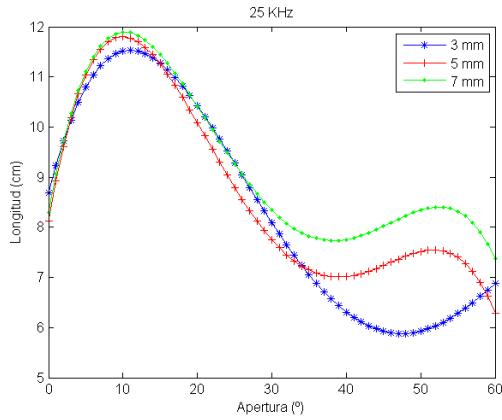


Figura 14: Longitud de ganancia máxima a 60 cm y 25 KHz para radios de 3 mm, 5 mm, y 7 mm.

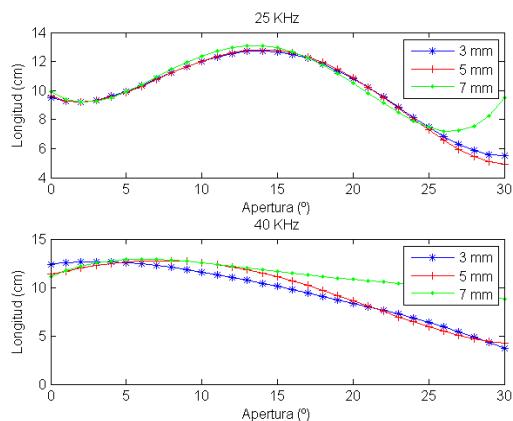


Figura 15: Longitud de ganancia máxima para 25 KHz y 40 KHz y radios de 3 mm, 5 mm, y 7 mm.

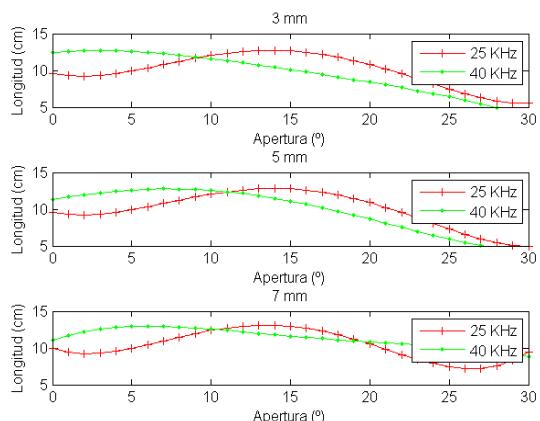


Figura 16: Longitud de ganancia máxima para 3 mm, 5 mm y 7 mm a 25 KHz y 40 KHz, respectivamente.

De manera análoga a la seguida en el estudio del ángulo de ganancia máxima, también se obtuvieron las ganancias en las longitudes de ganancias máximas. En las Figuras 17 y 18 se muestran los resultados obtenidos, cuando el ajuste se realiza mediante un polinomio de grado cuarto, manteniendo constante la frecuencia y cuando se mantiene constante el radio, respectivamente. En ellas se observa que la ganancia en la longitud de ganancia máxima aumenta al aumentar el tamaño del sensor piezoelectrónico. Al aumentar la frecuencia, el valor de la ganancia dependerá del valor del ángulo de apertura.

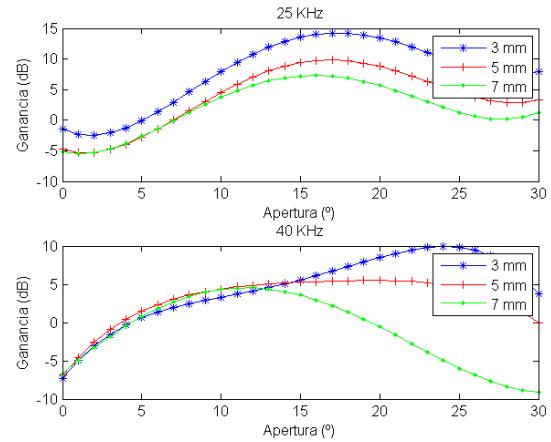


Figura 17: Ganancia en la longitud de ganancia máxima para 25 KHz y 40 KHz y radios de 3 mm, 5 mm, y 7 mm.

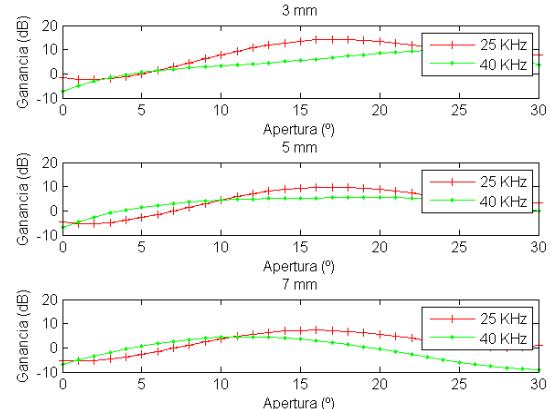


Figura 18: Ganancia en la longitud de ganancia máxima para 3 mm, 5 mm y 7 mm, a 25 KHz y 40 KHz.

4. Descripción de las medidas

Dado el elevado número de combinaciones de sensores y bocinas, para la validación experimental se ha utilizado un sistema automatizado de medida formado por varios subsistemas controlados desde una única interfaz, de manera que permita obtener el patrón de radiación de manera sencilla (Fernández et al., 2012). Dichos subsistemas son: el sistema de control de la cámara climática en que se realizaron las medidas, el sistema de posicionamiento para el emisor ultrasónico (el receptor se mantuvo en una posición fija), el sistema de adquisición de datos y el hardware de acondicionamiento de las señales ultrasónicas.

Este interfaz se implementó en un computador, que además también realiza el procesado de las señales, el análisis de los datos y la representación gráfica de los resultados obtenidos. Para la realización de las medidas el usuario introduce a través de la interfaz diseñada las distancias máxima y mínima entre el emisor y el receptor, el tamaño de los pasos en el movimiento angular y lineal, y la temperatura y humedad a la que se desea realizar las medidas.

La cámara climática se utilizó para mantener controladas la temperatura y la humedad a las que se realizan las medidas. Los rangos que permite obtener son de 10 a 85 °C para la temperatura, y del 15 % al 85 % para la humedad relativa. Las condiciones climáticas seleccionadas para las medidas fueron de 20 °C y una humedad del 80 %. Aunque el valor de humedad no tiene demasiada relevancia debido a su baja influencia en la velocidad de propagación, se estableció un valor concreto para que todas las medidas se realizaran en las mismas condiciones (Alonso et al., 2004, b). El valor de temperatura se ha elegido de manera que la velocidad de propagación en las medidas coincida con la usada en las simulaciones.

Para el sistema de posicionamiento se dispone de un robot modelo Yamaha SXYBX con tres grados de libertad situado en el interior de la cámara, junto con un controlador modelo RCX40 del mismo fabricante, que permite variar la distancia y la posición angular entre los sensores en rangos de longitud y altura de 3 m a pasos de 1 mm, y de posición angular de 360 ° a pasos de 0.9 °. En este trabajo se obtienen sólo los ecos en el eje de radiación, lo que significa que el emisor y el receptor se mantienen perfectamente enfrentados, y únicamente se varía la distancia entre ambos.

El sistema de adquisición consiste en una tarjeta de adquisición de datos NI-PCI6110 de National Instruments cuya frecuencia máxima de muestreo es de 10^6 muestras/seg. Teniendo en cuenta el teorema de Nyquist-Shannon (Shanon, 1949), permite trabajar con sensores ultrasónicos de hasta 150 KHz aproximadamente. Si se trabaja con sensores de menor frecuencia no es necesario usar la máxima velocidad de muestreo. Con esta tarjeta se envía el pulso de excitación al acondicionador del sistema ultrasónico, y se capturan los ecos ultrasónicos recibidos por el mismo, que son almacenadas en el computador para su posterior procesado.

En este trabajo se emplearon sistemas ultrasónicos de 25 y 40 KHz, cada uno formados por un emisor y un receptor junto con sus acondicionadores de señal, siendo todos ellos de la marca Hexamite. La excitación del sensor se realiza mediante el envío de un pulso al acondicionador de señal. Durante la duración de este pulso, el acondicionador produce un tren de pulsos de la frecuencia apropiada con la que excita al emisor. La duración del pulso de control se estableció en 0.25 ms.

Una vez se han configurado los parámetros climáticos y de posicionamiento a través de la interfaz, el sistema de posicionamiento coloca el emisor en la posición inicial y empieza la captura de ecos. Con el fin de minimizar errores debidos a ruidos en la medida, en cada posición se toman 10 ecos ultrasónicos y a partir de ellos se obtiene un eco promedio, el cual se almacena, junto a la posición relativa entre emisor y receptor, para la posterior extracción de la información relevante. Durante la captura de ecos, se visualizan por pantalla tanto la señal de excitación como el eco ultrasónico recibido por el receptor.

La captura de ecos y el posicionamiento del emisor deben sincronizarse para evitar que los ecos se cojan mientras el robot está en movimiento, o solapamientos de las medidas. La forma de

sincronización se realiza mediante el envío de pulsos bidireccionales entre la tarjeta de adquisición de datos y el sistema que actúa en cada momento. En primer lugar, cuando el usuario introduce la temperatura deseada se envía un pulso a la cámara climática y ésta devuelve otro pulso cuando se ha alcanzado dicha temperatura. En ese instante se pasa al control del sistema de posicionamiento. El sistema envía un pulso al controlador del robot, indicando que debe de realizar un movimiento. Una vez se ha realizado el movimiento el controlador devuelve otro pulso indicando que se ha alcanzado la posición deseada. La recepción de este pulso habilita la excitación del emisor. Una vez se ha almacenado el eco promedio, la tarjeta recibe otro pulso para que se pueda mover el robot a la siguiente posición de medida.

Aunque en las simulaciones sólo se llega a una distancia sobre el eje de radiación de 60 cm, en las medidas se alcanza una distancia mayor, con el objetivo de extrapolar los valores obtenidos en las simulaciones a distancias mayores y poder comprobar la concordancia entre los resultados a grandes distancias.

Una vez concluida la realización de la medida, da comienzo la etapa de procesado. En la Figura 19 se muestra el procesado que sufre la señal. En un primer paso y para cada distancia, la señal almacenada es filtrada usando un filtro Butterworth paso banda con unas frecuencias de esquina igual a la frecuencia de excitación del sensor ultrasónico ± 1 KHz. Posteriormente se obtiene la envolvente de la señal aplicando la transformada de Hilbert al valor absoluto de la señal anterior. El último paso es la obtención de la distribución de la presión en el eje de radiación mediante la extracción del valor máximo de la señal en cada distancia.

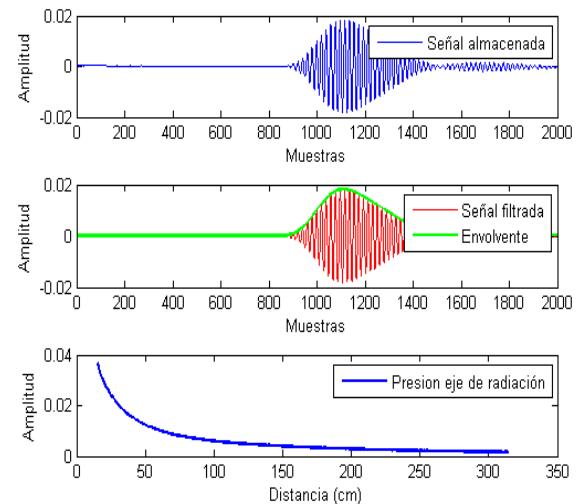


Figura 19: Procedimiento en el procesado de la señal almacenada.

5. Resultados de las medidas experimentales

Para realizar las medidas, además de los dos sistemas ultrasónicos usados, se utilizó una pieza adicional con el fin de poder acoplar bocinas de distintas geometrías a los propios sensores. El exterior de la pieza está roscado para permitir su unión con los elementos mecánicos que se quieren acoplar, mientras que el interior es un tubo recto. Se dispone de varios

acopladores en los que el radio interno varía permitiendo esta circunstancia emular medidas con sensores de distinto radio aunque en realidad el sensor ultrasónico usado es el mismo (Fernández et al., 2010).

Para las medidas se usaron bocinas con distintas longitudes y ángulos de apertura. En la Tabla 2 se muestran estas características.

Tabla 2: Características físicas de las bocinas

Nº Bocina	Longitud (cm)	Apertura (°)
1	2	11
2	2	30
3	2	34
4	3.5	16
5	3.5	19
6	4	23.5
7	5.5	7
8	5.5	17
9	7	19.5
10	7.5	8
11	7.5	14
12	7.5	17
13	7.5	23
14	9.5	12
15	9.5	23
16	10	4.5
17	10	10
18	10	10
19	11.0	9
20	11.0	23
21	11.5	11
22	11.5	17.5
23	12	17
24	19	10.5

Para la obtención de la ganancia se compara la presión acústica obtenida con bocina y sin ella. En la Figura 20 se presenta dicha ganancia en función de la apertura y longitud de la bocina para el sistema ultrasónico que opera a la frecuencia de 25 KHz y usando el acoplador de 5 mm de radio interno. En esta figura se puede observar que las ganancias mayores se obtienen para las bocinas de mayor longitud, situación que puede ser inviable a la hora de su implementación en una determinada aplicación.

A partir de los datos de ganancia obtenidos en las medidas, se ha realizado una interpolación, con el fin de conseguir una superficie que represente la ganancia para todas las aperturas y longitudes dentro del rango de las geometrías de las bocinas reales usadas.

En la Figura 21 se muestra la superficie para el caso de radio del sensor de 5 mm y operando a una frecuencia de 25 KHz a 3 m de distancia.

En la Figura 22, se muestra la superficie de ganancia en el mismo caso anterior, pero a distancia de 60 cm. Destacar la similitud de las figuras, excepto para los valores de longitud de la bocina grandes, en los cuales no se ha llegado a establecer el campo lejano.

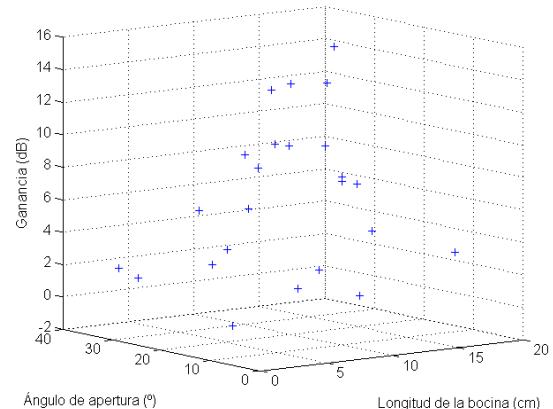


Figura 20: Ganancia medida de las bocinas usando acoplador de 5 mm de radio a 3 m y 25 KHz.

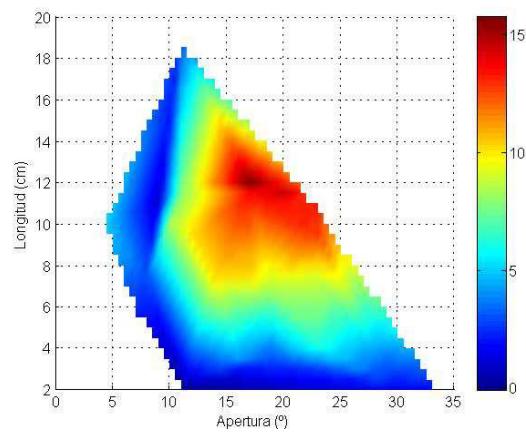


Figura 21: Ganancia en función de los parámetros de la bocina a 25 KHz y tamaño de 5 mm a 3 m de distancia.

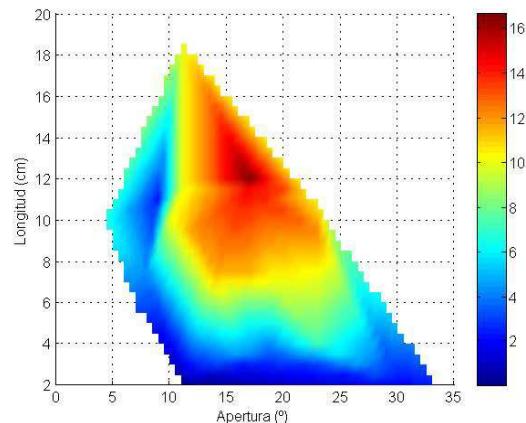


Figura 22: Ganancia en función de los parámetros de la bocina a 25 KHz y tamaño de 5 mm a 60 cm de distancia.

5.1. Ángulo de ganancia máxima.

En la Figura 23 se ha obtenido el ángulo de ganancia máxima, para las frecuencias y tamaños disponibles, teniendo en cuenta

que se ha realizado un ajuste lineal. Ha de tenerse en cuenta las limitaciones provocadas por el número limitado de las bocinas, además de sus valores máximos y mínimos, tanto de apertura como de longitud, que influyen en el cálculo de la superficie y por tanto en el ángulo de ganancia máxima. En la Figura 23 se observa que la apertura de ganancia límite no depende del tamaño del sensor.

En la Figura 24 se presenta la ganancia obtenida en los ángulos de ganancia máxima en la misma situación anterior. El ajuste de los datos obtenido también es lineal. En este caso se observa que la ganancia sí depende del tamaño del sensor, incrementando su valor cuando se disminuye el tamaño del mismo. Por otro lado se observa que al aumentar la frecuencia, el valor de ganancia máxima también aumenta. De estas graficas se puede concluir que la ganancia aumenta al disminuir el radio del sensor y/o al aumentar la frecuencia.

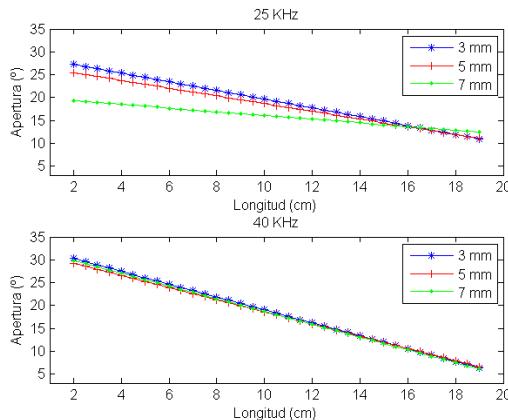


Figura 23: Ángulo de ganancia máxima con acoplador de 3 mm, 5 mm y 7 mm de radio, a 3 m, para 25 KHz y 40 KHz, respectivamente.

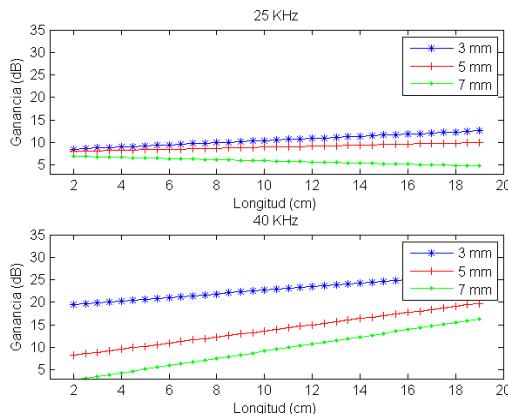


Figura 24: Ganancia máxima a 3 m a 25 KHz y 40 KHz, para los distintos radios de 3 mm, 5 mm y 7 mm.

5.2. Longitud de ganancia máxima.

Análogamente al estudio anterior, en la Figura 25 se representa la longitud de ganancia máxima, aunque la interpolación realizada de los datos obtenidos es mediante un polinomio de grado cuarto. Al igual que ocurría con la apertura de ganancia máxima, esta no depende del tamaño del sensor pero sí de la frecuencia. Cuando se

aumenta el valor de la frecuencia, la longitud de ganancia máxima se produce para aperturas de bocina más pequeñas, estando de acuerdo con las simulaciones.

La Figura 26 muestra la ganancia en la longitud de ganancia máxima en función de la apertura, en la cual también se ha realizado una interpolación de grado cuarto. Al igual que ocurría en el caso de ganancia en el ángulo de ganancia máxima, se produce una mayor ganancia al disminuir el tamaño del sensor. Además el valor de ganancia también es mayor para frecuencias más altas y el máximo de la ganancia en la longitud de ganancia máxima se produce para longitudes más pequeñas cuando se aumenta la frecuencia de excitación del sensor.

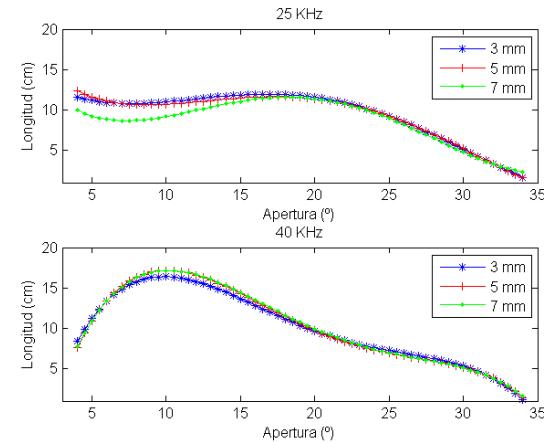


Figura 25: Longitud de ganancia máxima con acoplador de 3 mm, 5 mm y 7 mm de radio, a 3 m, para 25 KHz y 40 KHz, respectivamente.

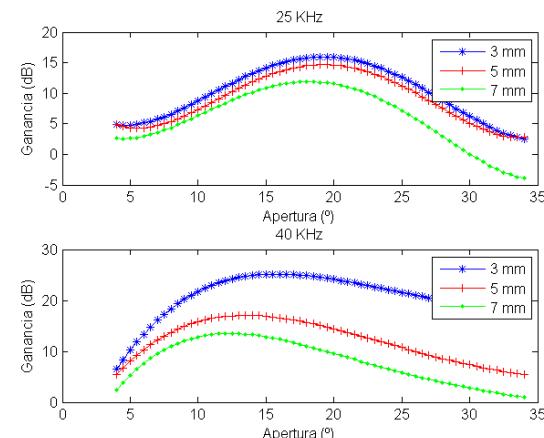


Figura 26: Ganancia en la longitud de ganancia máxima con acoplador de 3 mm, 5 mm y 7 mm de radio, a 3 m, para 25 KHz y 40 KHz, respectivamente.

6. Comparaciones

Atendiendo a los resultados obtenidos, en las simulaciones y las medidas, respecto al ángulo de ganancia máxima (Figuras 9 y 23), la longitud de ganancia máxima (Figuras 15 y 25) y la ganancia obtenida en este ángulo (Figuras 11 y 24) y longitud (Figuras 17 y 26), respectivamente, coinciden en su forma y tendencia pero no lo hacen en los valores debido que a que es necesario aplicar un factor de escalado a las simulaciones. Este

factor de escalado se debe a que en las simulaciones se usó un valor de diferencia de tensión entre las superficies inferior y superior del cristal. La diferencia de tensión usada fue de 10 V aunque el cambio de este valor no supone un cambio en la forma de la presión acústica pero sí de sus valores.

Si se comparan las ganancias de las simulaciones realizadas para los parámetros de las bocinas reales usadas en las medidas con las ganancias de las medidas, y realizando el escalado adecuado se obtiene la Figura 27, en la cual la frecuencia es 25 KHz, a una distancia de 60 cm y con un radio del sensor es de 5 mm. En la figura se puede observar que, salvo un factor de escala entre medidas y simulaciones, los valores prácticamente coinciden. Este factor de escala se obtuvo de manera que, para cada medida realizada, se ajustaba el mismo minimizando el error cuadrático medio entre medida y simulación.

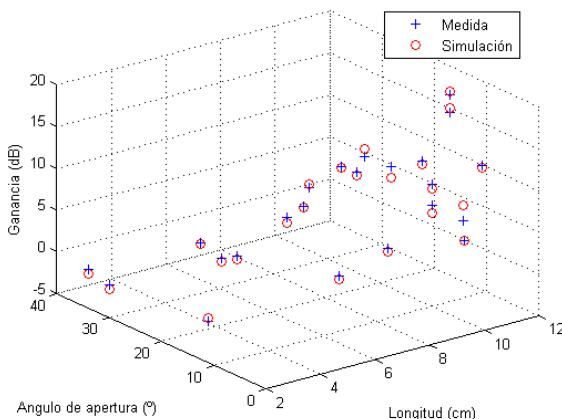


Figura 27: Comparación de ganancias medidas y simuladas a 0.6 m, frecuencia de 25 KHz y radio de sensor de 5 mm.

Con el fin de realizar una comparación numérica de los resultados se calculó el error relativo cometido para cada una de las geometrías de las bocinas y para cada tamaño y frecuencia del sensor. A partir de dichos resultados se obtuvo el error relativo medio entre simulaciones y medidas junto con la desviación del mismo, Tabla 3, para las distintas características del sensor.

Tabla 3: Errores relativos medios

Radio (mm)	Frecuencia (KHz)	Error relativo medio (%)	Desviación (%)
3	25	2.74	1.66
5	25	2.68	2.11
7	25	3.33	2.67
3	40	4.42	2.88
5	40	4.58	3.31
7	40	6.56	4.24

Estas diferencias pueden deberse a varios factores tanto en simulaciones como en medidas. Atendiendo a las simulaciones puede ser que la distancia máxima de simulación no sea lo suficientemente grande como para que la presión sea inversamente proporcional a la distancia, aunque sí se haya alcanzado el campo lejano.

También debe tenerse en cuenta la sensibilidad del modelo de elementos finitos. Esta dependerá del tamaño máximo de los elementos de la discretización espacial del dominio. El tamaño de cada elemento debe ser suficientemente menor que la longitud de

onda para que los resultados tengan valor, en particular en regiones próximas a vértices en las fronteras. En este trabajo se ha elegido para la frecuencia de 25 KHz un tamaño máximo del mallado de 1/5 de la longitud de onda. Este valor es un compromiso entre el coste computacional y la precisión del resultado. Se realizaron simulaciones tomando tamaños de mallado de 1/4, 1/5 y 1/6 de la longitud de onda. Con el tamaño de mallado de 1/6 de la longitud de onda, la precisión se mejora en un 0.1 %, respecto del tamaño de 1/5, mientras que el número de ecuaciones que debe resolver el software se incrementa en casi un 44 %. En cambio, para un tamaño de mallado de 1/4 de la longitud de onda el coste computacional se reduce en un 36 % respecto al tamaño de 1/5, y la precisión disminuye en un 0.6 %. Por todo esto, se eligió 1/5 de la longitud de onda como tamaño máximo de mallado, ya que la diferencia de precisión con el factor 1/6 es pequeña y se aprovecha la disminución del coste computacional para aumentar la distancia de simulación.

Resaltar que el hecho de que el tamaño también dependa de la longitud de onda implica que si se quiere mantener la superficie de simulación y aumentar la frecuencia a 40 KHz, se debe disminuir dicho factor. Para cada bocina se realizaron las simulaciones eligiendo el valor menor más cercano a 1/5 posible, siendo el factor máximo usado de 1/4 para las bocinas de menor longitud.

Por otro lado, según las especificaciones técnicas de la cámara climática, la precisión en la temperatura es de 0.1 °C, mientras que su homogeneidad es de ±2 °C. Con estos valores, el error obtenido en las medidas de las amplitudes de campo lejano según la expresión (2), es del 0.4 %.

7. Conclusiones

Para determinadas aplicaciones de los ultrasonidos puede resultar conveniente o incluso necesario el aumento de la presión acústica sobre el eje de radiación. En este trabajo se presentan, primero por simulación y luego de forma experimental, los resultados obtenidos al variar las características geométricas de las bocinas que influyen en la ganancia (longitud y apertura).

En las simulaciones se obtuvieron, para cada longitud, el ángulo de apertura de la bocina que proporciona un valor máximo de ganancia, denominado ángulo de ganancia máxima. De manera análoga, se obtiene la longitud de ganancia máxima, que se corresponde con el valor de la longitud, para cada ángulo de apertura, que proporciona un valor de ganancia máxima. En ambos casos, se muestran las variaciones producidas en la ganancia. Para comprobar las simulaciones se llevan a cabo medidas en el laboratorio, bajo las mismas condiciones.

Se ha encontrado una alta concordancia entre los valores simulados y experimentales. Con los datos obtenidos pueden definirse las características geométricas, apertura y longitud, de las bocinas que mejor se adecuen en cuanto a ganancia, para una determinada aplicación.

Se ha de tener en cuenta que este trabajo ha sido realizado bajo unas condiciones controladas, sobretodo de temperatura constante, y por tanto habría que verificar si los resultados pueden ser extrapolados a un ambiente industrial real. Aunque se debe tener en cuenta que en la mayoría de las aplicaciones de los ultrasonidos la influencia de otros factores, como pueden ser el polvo, no afectan a la propagación ultrasónica de manera determinante (Alonso et al., 2002).

English Summary

Study of the Influence of the Geometry of the Horns in the Gain on the Radiation Axis of Ultrasonic Sensors in Air.

Abstract

This paper presents the results obtained on the gain increase of an ultrasonic sensor, when the sensor is coupled with conical horns of various lengths and openings, in simulations and experimental measurements. In the simulations, a simulated model has been constructed using the finite element technique, in order to obtain the values of openness and length of the horn which provide the maximum gain on the radiation axis. These values are called maximum gain angle and maximum gain length, respectively. Experimental measurements are carried out using sensors at different frequencies, and coupling the same horns with different geometrical characteristics. Just as in the simulations, the angles and lengths that provide maximum gain are obtained. In the latter part of the work, the results comparisons between simulations and experimental measurements are presented, giving an excellent agreement with the simulated model analyzed.

Keywords:

Ultrasonic sensors, finite elements, control systems, industrial automation, robotics, data acquisition, data processing.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado bajo subvención del Ministerio de Ciencia e Innovación de España dentro del proyecto DPI 2007-2011 64295.

Referencias

- Abellanas A.; A. Frizera; R. Ceres; R. Raya; L. Calderón, 2008. Ultrasonic time of flight estimation in assistive mobility: improvement of the model-echo fitting. Proceedings, of Eurosensors XXII . p. 464-467, Dresden, Germany.
- Alonso L., C. Rodríguez, M. Fernández, J. M. Pérez-Oria, 2002. Influencia del ambiente industrial en sistemas de detección ultrasónica de piezas defectuosas. XXIII Jornadas de Automática, Tenerife, España.
- Alonso L., C. Rodríguez, M. Fernández, S. Robla, E.G. Sarabia, J. Pérez-Oria, 2004. Conformación mediante bocinas de lóbulos de radiación de sensores ultrasónicos. XXV Jornadas de Automática, JA2004, Ciudad Real, España.
- Alonso Rentería, L., C. Rodríguez, M. Fernández, S. Robla and J.M. Pérez-Oria, 2004. Compensation of environmental parameters for driving-aid ultrasonic systems in foggy conditions. Proceedings of World Automation Congress, WAC2004, Sevilla, España.
- Alonso L., J.M. Pérez-Oria, M. Fernández, C. Rodriguez, S. Robla , 2005. Qualitative analysis of the influence of horns on ultrasonic lobes. Proceedings of Control and Applications, IASTED2005, Cancún, México.
- Álvarez Fernández J. A.; R. Pérez Quintero, 2006. Ultrasónidos y «vida encefálica». Medicina Intensiva, Vol: 30(3), p-p 113-115.
- Arce J., J.R. Llata, E.G. Sarabia, J.P. Oria, 1998. Automatic fault detection using ultrasonic techniques: expert system vs signal processing. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Pretoria, South Africa.
- Cacicedo E.; T. Freire; J.M. Martín; L. Calderón; R. Ceres, 1994. Ultrasonics-temperature shapes the envelope. Sensor Review, Vol: 14 No. 4, p-p 19-23
- Carullo A.; M. Parvis, 2001. An ultrasonic sensor for distance measurement in automotive applications. IEEE Sensors Journal, Vol:1, NO. 2, p-p 143-147.
- Ceres, R., 2006. La tecnología en la discapacidad y la dependencia de personas mayores. Revista Española de Geriatría y Gerontología.
- Comsol Multiphysics, 2011. Model Gallery. Piezoelectric Transducer. <http://www.comsol.com/showroom/gallery/1477/>
- Egaña A., F. Seco, R. Ceres, 2008. Processing of ultrasonic echo envelopes for object location with nearby receivers. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol 57,no. 12, pp 2751-2755.
- Fernández M., C. Rodríguez, L. Alonso, J. Pérez-Oria, 2006. Simulación del diagrama de radiación ultrasónico modificado por bocinas y validación experimental del modelo de elementos finitos. XXVII Jornadas de Automática, JA2006, Almería, España.
- Fernández M., C. Rodríguez, J.M. Pérez-Oria, M. Ibarra and Luciano Alonso, 2010. Ultrasonic sensors with mechanical couplers: simulation and validation. Proceedings of the 10th International Conference on Computational and Mathematical Methods in Science and Engineering, CMMSE2010, Almería, España.
- Fernández M., C. Rodríguez, L. Alonso, J.M. Pérez-Oria, 2012. Optimized automatic system to obtain ultrasonic radiation patterns. "Pendiente de publicar"
- Llata J.R., E.G. Sarabia, J.P. Oria, 2001. Pattern recognition with ultrasonic sensors: a neural network evaluation. Sensor Review, Vol 21 N°1, pp 45-57.
- Kinsler L.E., A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders, 1982. Fundamentals of acoustics. Wiley, cop. New York.
- Kolbrek B., 2008. Horn theory: An introduction, part 1. www.audioXpress.com
- McLean J. S.; J. T. Post; E. L. Hixson, 1992. A theoretical and experimental investigation of the throat impedance characteristics of constant directivity horns. Journal of the Acoustical Society of America, Vol: 92 (5), pp: 2509-2526.
- Noreland D., R. Udawalpola, P. Seoane, E. Wadbro, and M. Berggren, 2010. An efficient loudspeaker horn designed by numerical optimization: an experimental study. Technical Report, Umeå University, Sweden.
- Pérez-Oria J. and A.M.Groba, 1993. Object recognition using ultrasonic sensors in robotic applications. XIX Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'93. Hawai, USA.
- Perez-Oria J., L. A. Rentería, C. Rodríguez, M. Fernández, J. R. Llata, 2002. Ultrasonic identification techniques of defective pieces in hostile production environments. Forum Acusticum 2002, Sevilla, Spain.
- Ramirez Gómez F., M. A. Fernández Soler, A. Alonso Roldán, G. Delojo Morcillo, C. Valdecantos Martínez y J. M. de los Ríos Rubalcaba, 1996. Métodos de ensayos no destructivos (Tomo I). Inta. Madrid.
- Rodríguez C., M. Fernández Moreno, L. Alonso, J. Pérez-Oria, M. Ibarra, J. Arce, J. Gutiérrez , 2010. Automatización de un sistema de detección de defectos en piezas metálicas. XXXI Jornadas de Automática, JA2010, Jaen, España.
- Shannon C.E., 1949. Communication in the presence of noise. Proc. Institute of Radio Engineers, Vol: 37 (1), pp: 10-21.
- Udawalpola R. and M. Berggren, 2007. Optimization of an acoustic horn with respect to efficiency and directivity. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol: 73(11), pp:1571–1606.
- Udawalpola R., E. Wadbro, and M. Berggren, 2011. Optimization of a variable mouth acoustic horn. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol: 85, pp: 591–606.