

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Programa de Doctorat:
AUTOMÀTICA, ROBÒTICA I VISIÓ

Tesi Doctoral

**LOCALIZACIÓN DE ROBOTS MÓVILES EN ENTORNOS CERRADOS
MEDIANTE CARACTERÍSTICAS DE AUDIO**

Manuel Andrés Manzanares Brotons

Director:

Antoni Grau i Saldes

Octubre de 2015

Agradecimientos.

Me gustaría expresar mi agradecimiento a todas las personas que me han permitido realizar este trabajo.

En primer lugar me gustaría mostrar mi agradecimiento a todos los miembros de mi familia, por su comprensión y apoyo en muchos aspectos y etapas de mi vida, que han permitido, de una forma directa, como mi padre o mi hermano Paco, o de una forma menos directa pero no menos importante, como mi madre y mi hermano Andrés, la realización de esta tesis, y de forma especial a mi esposa María.

También me gustaría agradecer la labor de todos los profesores que han intervenido en mi formación, en especial a los excelentes profesores que tuve en la E.U.E.T.I.B., entre los que merecen una mención especial Rafael Pindado y Antonio Salazar, por la calidad e importancia de sus enseñanzas en mi formación, Joan Domingo, por la constante motivación que ha ejercido para la continuación de mis estudios, y José María Huerta, por su ejemplo de profesionalidad, entre otros.

A mi director de tesis, Antoni Grau, y a Yolanda Bolea, por la ayuda y apoyo ofrecido por ambos en la realización de este trabajo.

Y para finalizar me gustaría mostrar también mi agradecimiento a mis compañeros de trabajo, y en especial a mi compañero de despacho, Alfonso Conesa, por su inestimable ayuda y consejos.

A mi familia

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.	
1.1. Antecedentes y estado del arte.....	3
1.2. Objetivos de la tesis.....	7
1.3. Estructura de la tesis.....	9
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE AUDIO.	
2.1. Introducción.....	15
2.2. Niveles de medida y parámetros acústicos básicos.....	15
2.2.1. Nivel de presión sonora.....	15
2.2.2. Nivel de potencia sonora.....	15
2.2.3. Nivel de intensidad sonora.....	16
2.2.4. Impedancia acústica.....	16
2.2.5. Tiempo de reverberación.....	17
2.3. Fuentes de sonido.	18
2.4. Sonido producido por máquinas industriales.....	22
2.5. Propagación del sonido en el interior de un recinto.....	23
3. MODELOS ACÚSTICOS DE LOS RECINTOS CERRADOS.	
3.1. Introducción.....	29
3.2. Modelos acústicos de los recintos cerrados.....	29
3.3. Limitaciones y rangos de aplicación de los modelos.....	31
3.4. El modelo ondulatorio: la ecuación de onda.....	33
3.5. Función de transferencia de un recinto cerrado.....	41
4. MODELO TEÓRICO DE FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA.	
4.1. Introducción al modelo propuesto.....	47
4.2. Acotación del orden del modelo: filtrado.....	52
4.2.1. Frecuencia de Schroeder.....	52
4.2.2. Objetivo del filtrado.....	54
4.3. Cálculo teórico de la ganancia media del recinto.....	57
4.4. Cálculo teórico del factor de ganancia medio.....	63
4.5. Función del factor de ganancia.....	66
5. MODELOS DE IDENTIFICACIÓN PARAMÉTRICOS.	
5.1. Introducción a los modelos paramétricos.....	71
5.2. Modelos paramétricos en audio.....	73
5.3. Modelo ARX y modelo simplificado LPV propuesto.....	75
5.4. Efecto del filtrado en la reducción del orden del modelo.....	80

6. SISTEMAS DE AUTOLOCALIZACIÓN DEL ROBOT.

6.1. Sistema de adquisición de la señal.....	87
6.2. Sistema de orientación del micrófono del robot.....	88
6.3. Filtrado de ruido no estacionario.....	89
6.4. Sistema de localización en base al modelo teórico.....	91
6.4.1. Sistema de localización.....	91
6.4.2. Incertidumbre.....	95
6.5. Sistema de localización en base a los modelos paramétricos.....	98
6.5.1. Introducción.....	98
6.5.2. Espacio de características.....	99
6.5.3. Función de transformación e incertidumbre.....	100
6.5.4. Determinación de las coordenadas del robot.....	104

7. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

7.1. Recinto de experimentación y fuentes de sonido.....	111
7.2. Posiciones de las muestras y del robot analizadas.....	115
7.3. Caracterización acústica del recinto.....	118
7.4. Adquisición, filtrado de las señales y selección de los modos.....	120
7.5. Modelo teórico de función de transferencia.....	128
7.5.1. Fuente de sonido: insoladora PCB.....	128
7.5.1.1. Cálculo del factor de ganancia de los modos.....	128
7.5.1.2. Función del factor de ganancia.....	130
7.5.1.3. Determinación de las posiciones del robot.....	133
7.5.2. Fuente de sonido: cámara climática.....	138
7.5.2.1. Cálculo del factor de ganancia de los modos.....	138
7.5.2.2. Función del factor de ganancia.....	140
7.5.2.3. Determinación de las posiciones del robot.....	143
7.5.3. Comparación de los resultados obtenidos con ambas fuentes.....	145
7.6. Modelos paramétricos.....	146
7.6.1. Introducción.....	146
7.6.2. Fuente de sonido: máquina CNC.....	147
7.6.2.1. Recinto de experimentación y fuente de sonido.....	147
7.6.2.2. Función de transformación y resultados.....	148
7.6.3. Fuente de sonido: cámara climática.....	150
7.6.3.1. Identificación del modelo.....	150
7.6.3.2. Función de transformación e incertidumbre.....	152
7.6.3.3. Determinación de las posiciones del robot.....	154
7.6.4. Fuente de sonido: insoladora.....	160
7.6.4.1. Identificación del modelo.....	160
7.6.4.2. Función de transformación e incertidumbre.....	162
7.6.4.3. Determinación de las posiciones del robot.....	165
7.6.5. Comparación de los resultados obtenidos con ambas fuentes.....	167
7.7. Comparación de los resultados obtenidos con ambos modelos.....	169

8. CONCLUSIONES.

8.1. Conclusiones generales.....	175
8.2. Aportaciones realizadas.....	178
8.3. Publicaciones derivadas del desarrollo de la tesis.....	179
8.4. Líneas futuras de investigación.....	180

BIBLIOGRAFIA.....	183
-------------------	-----

CAPÍTULO 1: Introducción.

1.1- Antecedentes y estado del arte.

Para la navegación autónoma de un robot móvil en un determinado entorno de trabajo, el robot debe ser capaz de conocer su posición con precisión en dicho entorno para poder desplazarse y realizar las diferentes tareas que tenga encomendadas. Esta problemática puede abordarse de dos formas distintas: el robot puede partir de una posición inicial conocida y debe ir realizando una estimación de las diferentes posiciones que va ocupando en el entorno de trabajo conforme se desplaza por el entorno o el robot debe conocer su posición en un determinado instante sin tener un conocimiento previo de su posición inicial.

Inicialmente, a finales de la década de los 80, el problema de la autolocalización robótica se aborda separando el proceso de la construcción del mapa del entorno de trabajo del robot del de la determinación de su posición, de forma que se considera o la localización del robot en un mapa conocido con precisión o la construcción precisa del mapa a partir de las distintas posiciones del robot en el entorno de trabajo.

Sin embargo, actualmente se considera que ambos aspectos están fuertemente relacionados y forman parte de una problemática más global que se define claramente cuando el robot explora entornos de trabajo desconocidos, ya que en ese caso el robot necesita construir un mapa de su entorno y ser capaz de establecer su localización en dicho mapa.

Dado que la problemática del establecimiento del mapa y la de la localización del robot en el mapa están fuertemente relacionadas, estas dos problemáticas se consideran conjuntamente en un único problema conocido como el problema de *localización y mapeado simultáneo del entorno* o SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*). Este problema es un tema de investigación abierto dentro del campo de la robótica móvil, ya que se enfrenta a la siguiente paradoja: para autolocalizarse, el robot necesita un mapa de su entorno preciso, pero para construir el mapa, el robot debe conocer su posición con precisión.

En la actualidad, uno de los sistemas más utilizados en espacios abiertos es el sistema de navegación GPS, sin embargo, en espacios cerrados como fábricas, oficinas, hospitales, etc., el sistema GPS no es operativo, debido a la pérdida de señal que se produce en el interior de los recintos. La ausencia de sistemas de navegación GPS en entornos cerrados ha estimulado la aparición de nuevos sistemas de posicionamiento que presentan una problemática particular.

Un ejemplo de estos sistemas es el sistema denominado *Cricket Indoor Location* [PRI00], en el que se utilizan balizas activas ubicadas en el entorno de trabajo que transmiten simultáneamente dos señales, una señal de RF y una señal de ultrasonidos. Los equipos de recepción ubicados por ejemplo en robots móviles, pueden estimar su posición a partir de la consideración de la diferencia de la velocidad de propagación entre las señales de RF y las señales de ultrasonidos que reciben.

La tecnología WLAN también puede aplicarse en este campo. Usando procesos de triangulación y midiendo distintos parámetros de la señal, como el ángulo o el tiempo transcurrido para su recepción, se puede estimar la posición en un determinado entorno de un transmisor/receptor móvil [SAY05]. En [CHR09] se propone una arquitectura específica para el uso de múltiples Servicios Web iGPS para la localización de robots móviles.

Los robots móviles usan diferentes tipos de sensores para determinar su posición, por ejemplo es muy común el uso de sensores odométricos, pero es importante considerar que por ejemplo, en el caso de que las ruedas del robot patinen, se genera un error en la estimación de su posición, error que además puede ser acumulativo. Otro tipo de sensores externos utilizados típicamente en robótica para la función de autocalización son por ejemplo las cámaras CCD, los sensores de infrarrojos, los sensores de ultrasonidos y los sensores láser.

Otros sensores de más reciente utilización son los dispositivos sensibles al campo magnético conocidos como brújulas electrónicas [NAV09], que efectúan la medición del campo magnético terrestre en la posición del robot. Un tipo de brújulas electrónicas muy utilizado se basa en transductores magneto-resistivos, cuya resistencia eléctrica varía con los cambios que se producen en el campo magnético y que presentan sensibilidades del orden de 0,1 miligauss con tiempos de respuesta menores de 1 segundo, que permiten su uso en vehículos o robots que se mueven relativamente rápido [CAR00].

También se utilizan brújulas electrónicas en aplicaciones SLAM, en las que trabajan simultáneamente con otros tipos de sensores para establecer la posición del robot, como con cámaras de visión artificial, como podemos ver en [KIM06], o con sensores de ultrasonidos, como podemos ver en [KIM07].

Por tanto, en el campo de la robótica móvil y debido al uso simultáneo de diferentes tipos de sensores, se han desarrollado un elevado número de algoritmos para fusionar la información suministrada por los sensores. Los algoritmos de fusión sensorial se pueden clasificar de la siguiente forma: métodos de estimación, métodos de clasificación, métodos de inferencia y métodos de inteligencia artificial [LUO02]. También es remarcable el uso de redes neuronales y de algoritmos fuzzy y genéticos [BEG06], [BRUN05].

Podemos encontrar muchos trabajos relacionados con la información proporcionada por los diferentes sensores en el contexto del SLAM, por ejemplo en [DIM00], donde la estimación de la posición del robot y la selección de balizas indicadoras en el entorno se describen en términos de regiones de incertidumbre, con la hipótesis de que todos los errores que afectan a las medidas de los sensores son desconocidos pero están acotados, o en [BEG06] donde un algoritmo procesa los datos de los sensores de forma incremental y trabajando en tiempo real *online*.

Muchos de los trabajos de investigación en el contexto del SLAM se basan en el trabajo pionero realizado por [SMI90]. Este trabajo propone un filtro de Kalman, que se basa en el estudio de diferentes propiedades estadísticas para resolver la problemática del SLAM. Los algoritmos del filtro de Kalman requieren un proceso de extracción de características e identificación de los datos de provenientes los sensores. En los casos en que el ruido presente en el sistema y en las medidas obedezca a una distribución Gaussiana, el filtro utiliza una ecuación recursiva que proporciona buenos resultados.

Los filtros de partículas son una técnica que ha adquirido también bastante popularidad para atacar la problemática del SLAM. Por ejemplo, el algoritmo híbrido propuesto en [THR01] usa un filtro de partículas para la estimación de la posterior posición del

robot y es capaz de mapear grandes entornos de trabajo. Otro método de fusión sensorial ampliamente utilizado es el Filtro de Kalman Extendido (EKF), que se utiliza cuando el modelo es no lineal, pero puede ser linealizabile alrededor de un punto de trabajo estable.

Muchos de los sistemas de localización de robots móviles se basan en la visión artificial, y la cámara de visión artificial, que es el sensor visual más conocido, es ampliamente utilizada para la localización de robots móviles en la actualidad. Sin embargo, aparecen algunas dificultades en su aplicación debidas a la limitación de su campo visual y a su dependencia de las condiciones de iluminación. Si el objeto a localizar se encuentra fuera de su campo visual o las condiciones de iluminación son pobres, el sistema de localización en base a la visión artificial puede no trabajar correctamente.

Por otro lado, es destacable el hecho de que el papel de la percepción acústica en robots autónomos, edificios inteligentes y entornos industriales, es cada vez más importante, y desde hace tiempo encontramos en la literatura especializada diferentes trabajos, como los trabajos que se refieren al estudio de diferentes técnicas de localización de fuentes de sonido, como podemos ver en [YAN07], [MUM03] y [CSY03].

No obstante, es significativa la poca utilización de los sensores de señales de audiofrecuencia en el campo de la autolocalización de robots móviles, sobre todo si la comparamos con el grado de utilización que presentan otros tipos de sensores. En el campo de la robótica, es muy destacable la importancia que la robótica bioinspirada presenta actualmente, en la que muchos investigadores se centran en emular modelos biológicos con objeto de resolver muchos de los problemas que se abordan en las aplicaciones robóticas. En este sentido, la audición, junto con el sentido de la vista, son esenciales en muchos seres vivos para poderse orientar en su entorno y para asegurar su supervivencia.

Comparado con la visión, la audición presenta varias propiedades muy interesantes. La audición es omnidireccional, las ondas sonoras presentan una elevada capacidad de difracción y son poco afectadas por los obstáculos. Por tanto, un robot que posea la capacidad de procesar señales acústicas puede compensar las restricciones que le presenten otros tipos de sensores, como una visión limitada o la presencia de obstáculos no traslúcidos.

No obstante, el procesado de señales de audio presenta algunos problemas particulares como veremos en el desarrollo de la tesis, como son el efecto de las señales de ruido, condiciones de contorno complejas en entornos reales poco ideales y efectos de campo cercano al desplazarnos en las proximidades de las fuentes de sonido, entre otras, y por tanto, queda justificado el uso de sensores de audio junto con otros tipos de sensores para determinar la posición y para la navegación autónoma de robots móviles, planteándose el estudio del proceso de la fusión sensorial para estas aplicaciones.

Volviéndonos a referir a los estudios mayoritariamente realizados en robótica en el campo de la acústica, es muy común encontrar aplicaciones que requieren que los robots conozcan la posición de los usuarios humanos, como hemos señalado anteriormente. Para localizar a un usuario, las técnicas de localización de fuentes de sonido son ampliamente utilizadas, y han sido estudiadas por numerosos investigadores, como por ejemplo en [YIN07], [SAS06] y [KIM09a].

La localización de una fuente de sonido puede definirse como el proceso de la determinación espacial de su posición en base a múltiples observaciones de las señales de audio recibidas. Las técnicas de localización se basan generalmente en la idea de computar el diferente tiempo de llegada (TDOA) del sonido captado por un conjunto de micrófonos, como podemos ver por ejemplo en [BRAN97] o en trabajos más antiguos como en [KNA76].

Otra técnica ampliamente utilizada para la determinación de la localización de una fuente de sonido es la determinación de la diferencia de tiempo interaural (ITD), que se define como la diferencia que podemos establecer en el tiempo de llegada de un sonido a los oídos, una aplicación muy representativa de esta técnica se puede encontrar en [KIM09b]. Otros trabajos en este campo usan fuentes de sonido estructuradas como en [YIH10], o proponen el procesamiento de diferentes características de las señales de audio, como en [SAS06], entre otros.

El estudio más concreto de la respuesta acústica de los recintos cerrados ha sido abordado con diferentes enfoques en función de los diferentes campos de aplicación, como son el modelo acústico geométrico, el uso de métodos estadísticos, la aproximación psicoacústica, el modelo ondulatorio proporcionado por la ecuación de onda, los modelos de función de transferencia (Room Transfer Function) y los métodos computacionales, como veremos con detalle en el desarrollo de la tesis.

En el desarrollo de la tesis centraremos nuestra atención en la definición de modelos de funciones de transferencia acústicas de recintos cerrados, como por ejemplo, las plantas industriales. Existen numerosos estudios realizados al respecto, como los estudios realizados en [HAN92], [HAN94], [HAN99] y [GUS00]. En estos estudios, que proponen la utilización de distintos modelos paramétricos, queda puesta en evidencia la complejidad de la obtención de las funciones de transferencia, ya que es necesario trabajar con un gran número de parámetros para modelizar la respuesta acústica completa del recinto en un determinado margen de frecuencias, en escenarios bastante ideales, independientemente de la dificultad añadida que se plantea cuando se propone la obtención de estos modelos en entornos de trabajo poco ideales.

No obstante, el estudio de funciones de transferencia simplificadas que modelicen la respuesta acústica en entornos complejos y con condiciones poco ideales, pero pensadas para su utilización en un sistema de posicionamiento acústico para robots móviles, es un terreno menos explorado. En esta tesis propondremos nuevos modelos de funciones de transferencia, que aunque no nos proporcionen una descripción acústica completa de los recintos, permitan reflejar las condiciones no ideales típicas por ejemplo en las plantas industriales de una forma eficiente desde el punto de vista de su aplicación en la autolocalización de robots.

Finalmente destacar que algunos investigadores, como podemos ver en [DON07], se han planteado sistemas para fusionar las señales de audio, procedentes de un array de micrófonos, y las señales de video, procedentes de cámaras de visión artificial, con objeto de actuar de una forma similar a la que realizan los seres vivos para localizar a los objetos y a los otros seres presentes en su entorno, funciones que tan importante papel juegan en labores de supervivencia.

1.2. Objetivos de la tesis.

Como hemos señalado anteriormente, es significativa la poca utilización de sensores de señales de audiofrecuencia en las distintas técnicas utilizadas en el campo de la autolocalización de robots móviles, y un objetivo de esta tesis es el intentar realizar una aportación que ayude a cubrir este vacío existente

Por tanto, el objetivo principal de esta tesis es el de proponer e investigar modelos acústicos que permitan su integración en varios sistemas de autolocalización propuestos para robots móviles que trabajen en entornos cerrados. En el desarrollo de la tesis se realizará, además de la propuesta de los diferentes modelos, una primera aproximación experimental con objeto de comprobar su validez mediante la realización de diversos ensayos.

El entorno de trabajo más típico de los robots en recintos cerrados, son las plantas de tipo industrial, y es en este tipo de recintos donde centraremos la mayor parte del trabajo realizado en la tesis, aunque la aplicación de los modelos y de los sistemas de autolocalización propuestos son válidos para su aplicación en otros tipos de recintos, con la única condición de la presencia de una fuente de sonido estacionaria en el recinto por donde se desplazará el robot.

Aunque la tesis se centrará en la problemática de la localización de robots, es interesante destacar el aspecto referente a que dichos modelos plantean soluciones que pueden servir también como una primera aproximación al estudio de sistemas de localización de personas en recintos cerrados.

Los modelos propuestos intentarán optimizar la cantidad de recursos computacionales necesarios para su aplicación en los sistemas de localización presentados en comparación con otros modelos ya existentes definidos para otras aplicaciones, y que requieren de una descripción muy completa de la respuesta acústica de los recintos, pero lógicamente deben ser lo suficientemente eficientes desde el punto de vista de su aplicación práctica.

Este último aspecto nos hará contemplar la posibilidad de plantear sus futuras posibles aplicaciones en la resolución de la problemática de la localización y el establecimiento simultáneo del mapa del entorno de trabajo del robot (SLAM), ya que como veremos, los modelos que proponemos requerirán de unas pocas muestras del recinto para establecer el mapa acústico de la zona de trabajo del robot.

Aunque la única condición que requeriremos para la fuente de sonido del recinto es que emita una señal estacionaria, y que podríamos implementar mediante la utilización de una fuente estructurada dedicada que emitiera el tipo de señal que mejor se adaptara a nuestros sistemas, intentaremos aprovechar las propias fuentes de sonido presentes en los recintos con objeto de no contaminar acústicamente el entorno de trabajo del robot.

Por ejemplo, muchos tipos de máquinas eléctricas rotativas típicas en los equipos utilizados en las plantas industriales emiten señales de sonido que permiten un tratamiento aproximado al que se realiza al tratar señales de tipo estacionario, y serán estas señales emitidas por este tipo de máquinas las que utilizaremos como señales de entrada a los modelos propuestos en los ensayos experimentales, con objeto de no contaminar las

condiciones acústicas usuales del recinto con la utilización de fuentes de sonido adicionales dedicadas específicamente al sistema de localización.

Respecto a este aspecto, y aunque no sea un punto de estudio principal de nuestra tesis, hemos trabajado también en [BOL08] una variante para un sistema de localización que integra un modelo paramétrico MAX, modelo concebido para trabajar con fuentes de sonido que emiten sonidos de tipo no estacionario y propuesto en [BOLO3]. La variante que propondremos permitirá dotar de mayor robustez al sistema propuesto en [BOLO3], como veremos en el desarrollo de la tesis.

Desde el punto de vista del sistema de localización, y relacionado directamente con su sensibilidad cuando se aplique en recintos de grandes superficies, es más robusta su implementación en plantas en las que trabajen máquinas que generen un nivel de potencia sonora elevado, pero lógicamente y por motivos de seguridad e higiene en el trabajo, el nivel de ruido en las zonas de trabajo de los operarios está limitado tal como señalan las numerosas normas existentes al respecto, y no es de esperar en estos recintos la presencia de operarios.

Por este motivo, los modelos propuestos estarán concebidos inicialmente para su aplicación en plantas o recintos en las que existan máquinas que generen un nivel de potencia sonora suficiente, y en el caso de las plantas industriales, sin la presencia de operarios, en las que queda justificada la conveniencia de la utilización de robots para la realización de diferentes tareas. No obstante, hemos trabajado también en un sistema de filtrado para señales provenientes de máquinas que vengan acompañadas de ruido de tipo no estacionario, como las señales procedentes del habla o la presencia de posible ruido de fondo que pudieran enmascarar la señal de interés emitida por la máquina, como podemos ver en [GRA07].

En el desarrollo de esta tesis se han propuesto e investigado varios modelos, un modelo teórico que permite la autolocalización del robot en base a la determinación de las ganancias de las diferentes funciones de transferencia en las diferentes posiciones del robot en el recinto, un modelo paramétrico de función de transferencia con una estructura ARX que permite la autolocalización del robot mediante el estudio de la variación de sus parámetros y la posterior aplicación de una función de transformación, y finalmente, en base a los estudios realizados con este último modelo, también se ha realizado la propuesta de la estructura de un modelo LPV (Linear Parameter Varying) que deriva directamente del modelo LTI (Lineal Time-Invariant) paramétrico.

El modelo teórico no paramétrico que proponemos se basa en la solución que proporciona el modelo ondulatorio de la respuesta acústica de recintos rectangulares, ya que la mayoría de recintos cerrados, como por ejemplo las plantas industriales, presentan una forma bastante aproximada a la de un recinto rectangular, aunque para facilitar su aplicación práctica y para cuantificar algunos de sus parámetros nos serviremos de algunas de las soluciones que nos ofrecen los modelos estadísticos. Para ello trabajaremos en un rango del espectro sonoro próximo a la frecuencia de cruce de Schroeder, en una región donde podemos contemplar que los modos están lo suficientemente separados como para poder considerar que solamente un modo o unos pocos modos han sido excitados significativamente por la fuente de sonido, y que no esté muy alejada de la zona del espectro donde establecen sus soluciones los modelos estadísticos.

El espectro sonoro de las fuentes de sonido típicas presentes en las plantas industriales, como por ejemplo las máquinas eléctricas rotativas, es lo suficientemente rico en el rango de las bajas frecuencias como para poder seleccionar, mediante el correspondiente filtrado de la señal, una componente frecuencial del sonido emitido por la fuente que esté situada en nuestra zona de interés. No obstante, para los casos en que la fuente de sonido de la planta no trabajara de forma continua en los periodos de trabajo del robot, o las características de la señal impidieran su tratamiento aproximado al de una señal estacionaria, se podría considerar la utilización de una fuente de sonido estructurada, como hemos señalado anteriormente, que con la simple emisión de un tono de frecuencia fija permitiría la aplicación de nuestro modelo para el sistema de localización.

Por otro lado, a pesar de las ventajas que pueden proporcionar las señales de audio para desarrollar los sistemas de localización de un robot en un recinto en comparación con los sistemas de localización basados en la visión robótica, y que hemos expuesto anteriormente, hay que considerar las numerosas fuentes de incertidumbre que encontraremos en el tratamiento de estas señales. En nuestro caso, además de la problemática de la incertidumbre en las medidas acústicas a efectuar en el propio recinto y que han sido puestas de manifiesto por numerosos autores, como por ejemplo por Mašovi en [MAS12], tenemos que tener en cuenta las fuentes de incertidumbre que afectan directamente a la exactitud de las soluciones que pueden ofrecer nuestros modelos, como veremos en el desarrollo de la tesis.

Realizar teóricamente la cuantificación de las múltiples fuentes de incertidumbre que afectan a los modelos de audio en la práctica presenta dificultades evidentes, y justifica la necesidad de realizar un muestreo previo del recinto, como veremos también en el desarrollo de la tesis. No obstante, como veremos en el capítulo de resultados experimentales, la modelización de la incertidumbre a partir de la información suministrada por las muestras etiquetadas del recinto nos permitirá mantener acotado el margen de error de nuestros sistemas de localización, permitiendo su aplicación de una forma eficiente.

1.3. Estructura de la tesis.

La tesis se ha organizado en ocho capítulos, cuyo contenido se expone a continuación:

El capítulo 2 está dedicado a definir algunos conceptos de acústica básicos importantes para el seguimiento del desarrollo de la tesis. Entre estos conceptos veremos los correspondientes a las definiciones del nivel de presión y de potencia sonora, y otros conceptos más ligados propiamente al estudio de la respuesta acústica de los recintos cerrados, como son la impedancia acústica y una primera presentación del parámetro correspondiente al tiempo de reverberación de un recinto.

En el capítulo se realiza también un estudio introductorio de las fuentes de sonido y del proceso de propagación del sonido generado por dichas fuentes en los recintos, así como una introducción a los sonidos producidos por las máquinas industriales y de algunas técnicas del tratamiento del ruido típico presente en este tipo de plantas, para finalizar presentaremos el campo sonoro estacionario que se establece transcurrido un cierto tiempo desde la puesta en marcha de la fuente de sonido.

En el capítulo 3 realizaremos una breve descripción de los modelos utilizados en el estudio de la respuesta acústica en los recintos, analizando sus ventajas e inconvenientes y sus rangos de aplicación, así como las limitaciones que presentan.

Prestaremos especial atención en este capítulo al modelo ondulatorio, dado que será el modelo que utilizaremos como base, junto al modelo estadístico, para definir los modelos que propondremos en los capítulos posteriores. En concreto nos centraremos en el estudio de la función de Green, dado que esta función es la base a partir de la cual se definen las funciones de transferencia acústica propuestas por numerosos autores.

En el capítulo 4 presentaremos un nuevo modelo teórico LTI de la función de transferencia acústica de la presión sonora de los recintos cerrados, modelo en el que la mayoría de sus parámetros se calcularán *off-line* a partir de las expresiones obtenidas que describen el comportamiento físico de la propagación del sonido y de diferentes características del recinto, como son sus dimensiones y la cantidad y el tipo de material absorbente presente en el mismo.

Para la definición del modelo nos basaremos en las soluciones proporcionadas por el modelo estadístico y las proporcionadas por el modelo ondulatorio, como veremos con detalle en el desarrollo del capítulo.

En este capítulo se presenta también la propuesta del tipo de filtrado a aplicar a las distintas señales de audio captadas por el robot en el recinto, filtrado de tipo pasabanda centrado en las proximidades de la frecuencia de Schroeder. Este filtrado permite acotar el número de modos de propagación del recinto a considerar y permite una reducción importante de la complejidad del modelo propuesto.

En el capítulo 5 realizaremos nuestra propuesta de diversos modelos de identificación paramétricos. Iniciaremos el capítulo con un primer estudio de diversos modelos propuestos por diferentes autores para posteriormente pasar a definir un nuevo modelo con una estructura ARX que presentará algunos puntos en común con el modelo teórico propuesto en el capítulo 4, como es la aplicación de un filtrado de las señales captadas con objeto de simplificar el orden y la estructura del modelo, y derivado del estudio realizado con el modelo ARX, propondremos la estructura de un nuevo modelo LPV.

Finalizaremos el capítulo con un estudio experimental sobre el efecto del filtrado en la reducción del orden del modelo ARX, con objeto de determinar un orden reducido del modelo pero que a su vez permita describir la respuesta acústica del recinto con la suficiente fidelidad en nuestra zona de interés.

Dedicaremos el capítulo 6 al estudio de la integración de nuestros modelos en los sistemas de localización propuestos y a la descripción de dichos sistemas. Iniciaremos el capítulo con la descripción del sistema de adquisición de la señal y con un breve estudio sobre el filtrado de la señal para el caso de que la misma pudiera venir acompañada de ruido de tipo no estacionario.

Pasaremos posteriormente a presentar los sistemas de localización en base a los distintos modelos estudiados, el modelo teórico no paramétrico y los modelos paramétricos,

detallando el importante aspecto referido al tratamiento de la incertidumbre de los parámetros de los modelos.

El capítulo 7 lo dedicaremos a exponer los ensayos experimentales que hemos realizado con objeto de comprobar la validez de nuestros modelos y la de los sistemas de localización propuestos. Iniciaremos el capítulo con una detallada descripción del recinto de experimentación que es un laboratorio docente de electrónica ubicado en la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Industrial de Barcelona.

Detallaremos en el capítulo el proceso de filtrado de las señales y de la selección de los modos de propagación a analizar del recinto, principalmente para las dos fuentes de sonido más utilizadas, una cámara climática dedicada a la realización de ensayos climáticos de equipos y componentes electrónicos, y una insoladora de placas de circuitos impresos electrónicos, ubicadas en distintas zonas del laboratorio.

Realizaremos un estudio detallado de los resultados obtenidos con cada modelo y con cada fuente de sonido, y finalizaremos el capítulo con un estudio comparativo de los resultados obtenidos con ambos modelos.

Finalmente en el capítulo 8 se presentan las conclusiones obtenidas en el desarrollo de la tesis, evaluándose en primer lugar las ventajas e inconvenientes que presentan los modelos y sistemas de localización estudiados. Pasaremos posteriormente a enumerar las aportaciones de la tesis que consideramos más importantes así como las posibles líneas futuras de investigación que se derivan del trabajo realizado.

CAPÍTULO 2: Fundamentos teóricos de audio.

2.1. Introducción.

Como hemos señalado anteriormente, en este capítulo definiremos algunos conceptos de acústica básicos importantes para el seguimiento del desarrollo de esta tesis, la profundización sobre estos conceptos la podemos encontrar en la bibliografía especializada, como por ejemplo en [KUT09] o [KIN95]. Entre los conceptos más básicos se encuentran los correspondientes a las definiciones del nivel de presión y de potencia sonora, y otros conceptos más ligados propiamente al estudio de la respuesta acústica de los recintos cerrados, como son la impedancia acústica y una primera presentación del parámetro correspondiente al tiempo de reverberación de un recinto.

En el capítulo se realiza también un estudio introductorio de las fuentes de sonido y del proceso de propagación del sonido generado por dichas fuentes en los recintos, así como una introducción a los sonidos producidos por las máquinas industriales y de algunas técnicas del tratamiento del ruido típico presente en este tipo de plantas.

Finalizaremos el capítulo presentando el campo sonoro estacionario que se establece transcurrido un cierto tiempo desde la puesta en marcha de la fuente, y que será objeto de un estudio más profundo en el desarrollo de la tesis.

2.2. Niveles de medida y parámetros acústicos básicos.

En la práctica, las medidas acústicas que se realizan en los recintos para su caracterización son las correspondientes al nivel de presión sonora y al tiempo de reverberación del recinto. En este capítulo, definiremos estos parámetros así como algunos otros muy utilizados en el campo de la acústica.

2.2.1. Nivel de presión sonora.

Este parámetro es básico para definir el tiempo de reverberación de un recinto, que es otro parámetro muy importante para el estudio y caracterización de la respuesta acústica de los recintos cerrados. En la bibliografía especializada viene referido como *SPL*, *Lp* o *NPS*, y se define a partir de la expresión:

$$Lp = 10 \cdot \log\left(\frac{P^2}{P_o^2}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{P}{P_o}\right) \text{ (dB)} \quad (2.1)$$

Siendo *P* la presión acústica eficaz medida y *P_o* la presión acústica eficaz de referencia, siendo este valor el umbral de audición a una frecuencia de 1 *KHz* que corresponde a $2 \cdot 10^{-5}$ (*Pa*), es decir, a 20 μPa .

La conveniencia de trabajar en decibelios queda justificada si consideramos que nuestra respuesta auditiva es de tipo logarítmico, y que el margen de audición humano es muy amplio y comprende desde el umbral de sensibilidad de 20 μPa al umbral de dolor de 100 *Pa*.

2.2.2. Nivel de potencia sonora.

Aunque este parámetro no se utiliza para caracterizar la respuesta acústica de un recinto, sino que se utiliza para caracterizar las fuentes de sonido, lo trataremos brevemente

en este capítulo, dada su importante aplicación en el campo de las medidas acústicas. El nivel de potencia sonora de una fuente acústica, en la bibliografía especializada viene referido como SWL o L_w , y viene definido por la expresión:

$$L_w = 10. \log \left(\frac{W}{W_0} \right) (dB) \quad (2.2)$$

Siendo W la potencia acústica radiada por la fuente de sonido y W_0 la potencia acústica de referencia, que se toma de $1 \cdot 10^{-12} W$, es decir, 1 pW .

2.2.3. Nivel de intensidad sonora.

Al igual que el parámetro anterior, este parámetro también tiene una importante aplicación en el campo de las medidas acústicas. La intensidad sonora es la potencia acústica transferida por la onda sonora por unidad de área normal a la dirección de propagación, su unidad es el (W/m^2) .

El nivel de intensidad de un sonido, en la bibliografía especializada viene referido como SIL o L_I , y viene definido por la expresión:

$$L_I = 10. \log \left(\frac{I}{I_0} \right) (dB) \quad (2.3)$$

Siendo I la intensidad sonora medida e I_0 el nivel de intensidad de referencia de $1 \cdot 10^{-12} (W/m^2)$, aproximadamente igual al umbral de audición humano, estando situado el umbral de dolor en $1 (W/m^2)$.

2.2.4. Impedancia acústica.

Las propiedades acústicas de los límites de un recinto, paredes, suelo y techo se pueden describir desde un punto de vista físico basándose en la componente normal de la velocidad de las partículas v_n en la superficie de dichos límites, definiéndose la impedancia acústica como el siguiente cociente complejo:

$$Z = \frac{p}{v_n} \quad (2.4)$$

Donde p es la presión acústica en la superficie. En su forma general su expresión viene dada por:

$$Z = a + jb \quad (2.5)$$

Donde a es la componente activa y b la componente reactiva de la impedancia, la componente reactiva pone en evidencia que la presión acústica y la velocidad de las partículas no están en fase.

Frecuentemente la impedancia acústica se expresa en función de la impedancia característica del aire, y la cantidad resultante se denomina impedancia acústica específica:

$$z = \frac{Z}{\rho_0 c_0} \quad (2.6)$$

Siendo ρ_o la densidad del aire de valor 1,21 (Kg/m³) y c_o la velocidad de propagación del sonido de valor 343 (m/s), ambas definidas a la temperatura de 20 °C.

La impedancia acústica específica es una propiedad característica del medio y del tipo de onda que se propaga e indica la resistencia que presenta el medio al paso de la onda, es un parámetro muy útil cuando se realizan cálculos que implican la transmisión de ondas acústicas de un medio de propagación a otro.

2.2.5. Tiempo de reverberación.

Un parámetro de gran importancia para la caracterización acústica de un recinto, y que trataremos con más profundidad en capítulos posteriores es su tiempo de reverberación, que se define como el tiempo requerido para que la presión acústica se atenúe 60 dB una vez ha cesado la emisión de la fuente sonora, y que es debido al tiempo que tardan en anularse las diferentes reflexiones de las ondas sonoras que se producen en el recinto. Este parámetro está directamente relacionado con las dimensiones del recinto y la cantidad de material absorbente que contiene.

En un recinto cuyas superficies presenten un bajo coeficiente de absorción acústica, y en el que actúa una fuente de sonido estacionaria, se establece después de un cierto intervalo de tiempo un campo acústico que se denomina campo difuso, en el que un gran número de ondas reflejadas provenientes de todas direcciones, interaccionan entre ellas de forma que la densidad media de energía es uniforme en cualquier punto del mismo.

Si suponemos un sonido uniformemente difuso, producido por una fuente de sonido estacionaria, en un recinto reverberante (también llamado recinto vivo), y la fuente se desconecta en $t = 0$, la variación de la potencia sonora respecto al tiempo vendrá dada por la siguiente expresión, tal como indica Kinsler en [KIN95]:

$$W_r(t) = W_r(0)e^{-t/\tau_E} \quad (2.7)$$

Nos será útil expresar la potencia acústica reverberante en función de la presión acústica eficaz P_r como:

$$W_r = P_r^2$$

Con lo que la escribiremos la expresión (2.7) como:

$$P_r^2(t) = P_r^2(0)e^{-t/\tau_E} \quad (2.8)$$

Siendo τ_E la constante de tiempo del decrecimiento del sonido en el recinto.

Esta expresión la podemos expresar como un cociente de presiones sonoras:

$$\frac{P_r^2(t)}{P_r^2(0)} = e^{-t/\tau_E} \quad (2.9)$$

El cambio de nivel de presión sonora desde $t = 0$ hasta un cierto instante t después de desconectar la fuente de sonido, vendrá dado entonces por:

$$\Delta Lp = 10. \log \left(\frac{P_r^2(t)}{P_r^2(0)} \right) = 10. \log \left(e^{-t/\tau_E} \right) \quad (2.10)$$

Es decir:

$$\Delta Lp = -\frac{t}{\tau_E} 10 \log(e) = -\frac{t}{\tau_E} 4,343 \quad (2.11)$$

Dado que el tiempo de reverberación se define como el tiempo necesario para que el nivel de presión sonora caiga 60 dB, podemos escribir la igualdad siguiente:

$$-60 = -\frac{T_r}{\tau_E} 4,343 \quad (2.12)$$

Que nos permite establecer la relación entre el tiempo de reverberación y la constante de tiempo del decrecimiento del sonido en el recinto:

$$T_r = 13,815. \tau_E \quad (2.13)$$

El tiempo de reverberación varía con la frecuencia de la fuente de sonido, dado que los distintos materiales que forman el recinto presentan diferentes comportamiento al reflejar las ondas acústicas a las distintas frecuencias, y se definen los coeficientes de absorción acústica (relación entre la energía absorbida y la reflejada por el material) en bandas de octava centradas en las frecuencias normalizadas de 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz típicamente.

Todo recinto tiene un tiempo de reverberación óptimo en función de la aplicación a la que se destine, los recintos destinados a realizar conferencias requieren de un corto tiempo de reverberación (típicamente varían según diversos autores entre 0,4 y 1 segundo), ya que un tiempo de reverberación alto reduce la inteligibilidad de la palabra.

En el extremo opuesto encontramos a los recintos destinados a escuchar música, que se beneficiarán de un tiempo de reverberación alto, Kinsler en [KIN95] recomienda un tiempo de reverberación de 1 segundo en pequeños recintos para solistas o música de cámara y de hasta 2,5 segundos para música de órgano en grandes catedrales, aunque el tiempo de reverberación óptimo varía con el tamaño del recinto, el tipo de música y el efecto deseado.

2.3. Fuentes de sonido.

El estudio de la respuesta acústica en las proximidades de las fuentes de sonido, aunque estas se encuentren en un recinto cerrado, difiere poco del estudio de su comportamiento al aire libre, ya que la influencia del recinto tendrá poca importancia en los niveles de la presión acústica captada y predominará la influencia de la propia fuente en dicha respuesta.

Existen diferentes modelos para estudiar las distintas fuentes de sonido en función de su geometría, la fuente de sonido más simple es la fuente puntual isotrópica, que radia el

sonido de forma continua por igual en todas direcciones, es decir, que el sonido se propaga desde la fuente en forma esférica.

Para este tipo de fuentes la intensidad del sonido está relacionada con la presión sonora eficaz por la expresión:

$$I = \frac{P_s^2}{\rho_0 c_0} \quad (2.14)$$

Donde el producto $\rho_0 c_0$ es la impedancia característica del aire definida anteriormente.

La potencia radiada por una fuente de sonido se obtiene integrando la intensidad de sonido sobre una superficie imaginaria que rodee a la fuente, y viene dada por:

$$W_s = \int_A I \cdot n \, dA \quad (2.15)$$

Donde n es un vector unitario perpendicular a la superficie considerada e indica que integraremos la componente normal a la superficie considerada del vector intensidad de sonido.

Para este tipo de fuentes puntuales, en que las ondas se propagan de forma esférica, la potencia radiada vendrá dada por tanto por:

$$W_s = 4\pi r^2 I \quad (2.16)$$

Siendo r la distancia del punto considerado a la fuente. Es importante remarcar que la potencia que radia la fuente es constante, mientras que la presión eficaz y la intensidad acústica disminuyen conforme nos alejamos de la fuente.

Las expresiones anteriores nos permiten calcular la potencia que radia la fuente a partir de la medida de la presión eficaz en un punto determinado situado a una cierta distancia de la misma, según la expresión:

$$W_s = \frac{P_s^2 4\pi r^2}{\rho_0 c_0} \quad (2.17)$$

La velocidad de decrecimiento de la intensidad del sonido en este tipo de fuentes puntuales es muy elevada conforme nos alejamos de ellas, reduciéndose en 6 dB cada vez que duplicamos la distancia que nos separa de la fuente.

Otro tipo de fuente es la fuente lineal continua, que se comporta de forma aproximada a la de una distribución de fuentes puntuales, y en la que el sonido que radia la fuente se propaga con una forma aproximadamente cilíndrica, por lo que la intensidad del sonido viene dada por:

$$I = \frac{W_s}{2\pi r} \quad (2.18)$$

La velocidad de decrecimiento de la intensidad del sonido en este caso es menos acentuada que en el caso de la fuente lineal, reduciéndose en 3 dB cada vez que duplicamos la distancia a la fuente.

Un análisis más detallado de la presión generada por una fuente lineal y que nos servirá para definir el concepto de directividad de una fuente de sonido, es el que podemos realizar tomando como ejemplo el producido por una barra cilíndrica larga y delgada de longitud L y radio a . La presión en un punto situado a una distancia d de la fuente y que forma un ángulo θ respecto a la frontal de la fuente viene dada por la expresión siguiente, propuesta en [KIN95]:

$$p(d, \theta, t) = j \frac{1}{2} \rho_o c U_o \frac{a}{d} kL \left[\frac{\sin\left(\frac{1}{2} kL \sin \theta\right)}{\frac{1}{2} kL \sin \theta} \right] \exp[j(\omega t - kd)] \quad (2.19)$$

Siendo k el número de onda, c la velocidad de propagación del sonido, ρ_o la densidad del aire y U_o la amplitud de la vibración de la fuente. Por otro lado, podemos escribir la amplitud de la onda de presión de una forma más simplificada como:

$$P(d, \theta) = P_{ax}(d) H(\theta) \quad (2.20)$$

Donde el término $P_{ax}(d)$ vendrá dado por:

$$P_{ax} = \frac{1}{2} \rho_o c U_o \frac{a}{d} kL \quad (2.21)$$

Este término depende de la distancia d del punto considerado a la fuente de sonido, y nos indica que la presión disminuye al aumentar la distancia a la fuente.

El término $H(\theta)$, también llamado factor direccional, que depende del ángulo que forma el punto considerado respecto a la frontal de la fuente de sonido, vendrá dado por:

$$H(\theta) = \left| \frac{\sin v}{v} \right| \quad (2.22)$$

Siendo v :

$$v = \frac{1}{2} kL \sin \theta \quad (2.23)$$

$H(\theta)$ es por tanto una función esférica de Bessel de orden cero de primera especie, por lo que presentará diferentes lóbulos que presentarán unos valores máximos y mínimos en función del ángulo θ , que representamos en la figura 2.1.

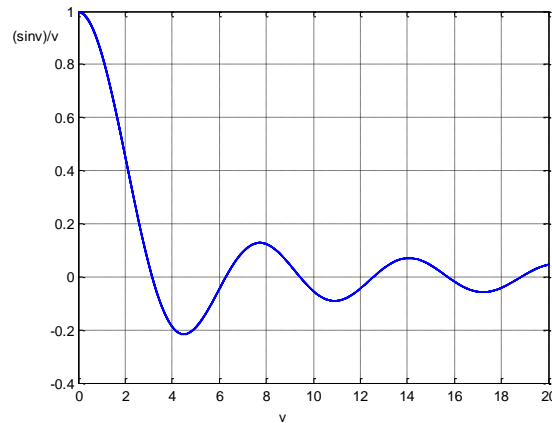


Fig.2.1. Representación de la función $H(\theta)$

El campo acústico de presión emitido por una fuente real puede llegar a ser muy complejo, aunque podemos realizar una primera aproximación tratándolo como el producido por una fuente lineal como la que se acaba de describir.

A efectos prácticos se define la directividad de una fuente en una dirección determinada, como la relación entre la presión eficaz sonora generada por la fuente en esa dirección a una cierta distancia d y la presión eficaz máxima que produciría una fuente omnidireccional de la misma potencia situada a esa misma distancia. Normalmente se adopta como valor máximo el máximo valor generado por la propia fuente sometida a ensayo, que normalmente se produce cuando nos situamos frente a ella.

Por tanto, la directividad D de una fuente en función del ángulo θ medido respecto a la frontal de la fuente, vendrá dada por la expresión siguiente:

$$D(\theta) = \frac{P(\theta)}{P_M} \quad (2.24)$$

Usualmente se expresa en dB como:

$$D = 20 \log \left(\frac{P(\theta)}{P_M} \right) \quad (2.25)$$

De forma similar a la directividad se define el factor de directividad Q de una fuente en una dirección determinada según la expresión:

$$Q(\theta) = \frac{I(\theta)}{I_M} \quad (2.26)$$

Siendo $I(\theta)$ la intensidad acústica emitida por la fuente en esa dirección e I_M la intensidad acústica máxima que emitiría la fuente si fuera de tipo omnidireccional.

Usualmente se trabaja con el índice de directividad ID , que se define a partir de la siguiente expresión:

$$ID = 10 \log \left(\frac{I(\theta)}{I_M} \right) \quad (2.27)$$

Normalmente se proporcionan los diagramas de directividad de las fuentes de sonido, que son diagramas polares que representan la directividad en función del ángulo θ referido a la frontal de la fuente.

Dado que la densidad de energía en el campo directo es proporcional al factor de directividad, la expresión que nos proporciona la intensidad de la energía directa de una fuente puntual pasaría a ser, para una fuente direccional la siguiente:

$$I = \frac{W_s Q(\theta)}{4\pi r^2} \quad (2.28)$$

Expresión que pone de manifiesto la dependencia de la intensidad sonora en un determinado punto del campo directo con el ángulo que forma dicho punto respecto a la frontal de la fuente, además de indicar la dependencia ya comentada anteriormente respecto a la distancia existente entre el punto considerado y la fuente de sonido.

2.4. Sonido producido por máquinas industriales.

En nuestra tesis nos centraremos, como hemos comentado anteriormente, en unos tipos de fuente de sonido particulares muy usuales en los recintos cerrados, las máquinas eléctricas rotativas. Estas fuentes de sonido son diferentes tipos de máquinas cuyo funcionamiento se basa en la actuación de motores eléctricos que producen una señal acústica provocada principalmente por la excitación de la frecuencia de resonancia mecánica de la estructura del motor, y también por el propio movimiento y turbulencias del aire que generan al girar sobre su eje, entre otros factores. La amplitud de la señal de audio generada es función usualmente de la potencia del motor, de su tamaño y de la velocidad de giro, y la frecuencia fundamental y los armónicos del espectro de frecuencia de la señal es función de la velocidad de giro del motor.

Estas fuentes de sonido acostumbran a trabajar mayoritariamente de forma continuada en largos intervalos de tiempo, presentando unos valores del nivel de presión sonora y de frecuencia aproximadamente constantes en dichos periodos, por lo que las consideraremos inicialmente como unas buenas candidatas a ser consideradas como fuentes de sonido estacionarias que producen en el recinto un campo sonoro estacionario.

No obstante, en el sistema de localización que propondremos en base a nuestro modelo teórico, se debería realizar un proceso de calibrado del sistema de localización del robot a intervalos de tiempo regulares, efectuando la medida de la señal emitida por la fuente de sonido, con objeto de contemplar las posibles variaciones que se produzcan debidas a procesos, como por ejemplo, los provocados por el desgaste mecánico de sus elementos que pueden provocar un balanceo del eje del motor con la generación de nuevos armónicos en el espectro de la señal.

También podríamos contemplar estas posibles variaciones en la señal emitida por la máquina situando el punto de partida del movimiento del robot en el recinto en un punto próximo al de la ubicación de la fuente de sonido, por lo que éste podría realizar el calibrado del sistema cuando el robot iniciara su periodo de trabajo cada cierto intervalo de tiempo.

Es de destacar que el estudio del espectro de sonido emitido por este tipo de máquinas se utiliza como parte de las labores del mantenimiento preventivo de las mismas, ya que pueden revelar defectos en los cojinetes, engranajes deteriorados, desalineamientos y desequilibrios del eje, falta de engrase y posible presencia de sobrecargas, entre otros fallos.

Máquinas industriales o máquinas que se pueden encontrar típicamente en un recinto y que pueden actuar como fuentes de sonido adecuadas para nuestra aplicación serían por ejemplo ventiladores que giren a una velocidad constante, así como bombas hidráulicas, no siendo adecuados por ejemplo los compresores, por la elevada diferencia del nivel de presión sonora que generan entre los periodos de carga y los de régimen.

No obstante, para los casos en que la fuente de sonido de la planta no trabajara de forma continuada en los periodos de trabajo del robot, o las características de la señal impidieran su tratamiento aproximado al de una señal estacionaria, se podría considerar como hemos comentado la utilización de una fuente de sonido estructurada, que con la simple emisión de un tono de frecuencia fija permitiría la aplicación de nuestros modelos para los sistemas de localización propuestos.

2.5. Propagación del sonido en el interior de un recinto.

Si se activa una fuente de sonido monofrecuencial en el interior de un recinto, el sonido se propaga desde la fuente hacia sus límites, produciéndose una disminución de la energía debida al proceso de absorción en el medio de propagación y a la que se produce en los diversos objetos que encuentra en su camino. En recintos de no muy grandes dimensiones, la absorción en el medio es despreciable.

Este sonido que se transmite directamente desde el emisor al receptor acústico se conoce como sonido directo, a diferencia del denominado sonido indirecto que es el que llega al receptor acústico después de reflejarse en las distintas superficies del recinto. A su vez en el sonido indirecto se definen lo que se conocen como reflexiones tempranas, que engloban al sonido proveniente de la primera reflexión y al proveniente de las primeras reflexiones que alcanzan al receptor acústico, y las reflexiones tardías, que son las que producen el sonido que llega al receptor acústico después de haber sufrido múltiples reflexiones y forman lo que se conoce como la cola reverberante del sonido.

En la figura 2.2 se representa un ejemplo de la respuesta impulsional de la presión sonora en un recinto para una determinada posición de la fuente y el receptor acústico.

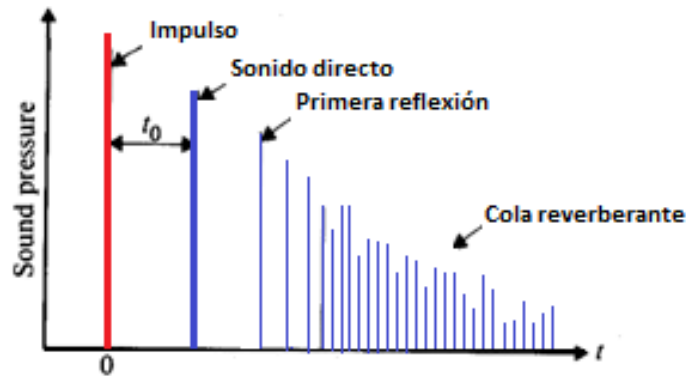


Fig.2.2. Respuesta impulsional de un recinto.

Si la fuente de sonido opera de forma continuada, las ondas acústicas sufren diversas reflexiones en los límites y objetos del recinto, la absorción en el aire y la que se produce en las distintas superficies impide que la amplitud de la energía acústica tome valores infinitamente grandes, de forma que la energía absorbida por las distintas superficies se iguale a la generada por la fuente de sonido y la distribución de la densidad de energía acústica en el recinto pasa a ser constante, alcanzándose un estado estacionario.

Dada la importancia del proceso de reflexión de la onda sonora en las distintas superficies del recinto para caracterizar su respuesta acústica, lo estudiaremos con detalle. Si consideramos inicialmente una onda plana que se desplaza en una dirección perpendicular a la superficie reflectante, podemos definir la onda de presión reflejada por la siguiente expresión:

$$p_r(x, t) = R\widehat{p}_o \exp[j(\omega t + kx)] \quad (2.29)$$

Siendo R el coeficiente de reflexión de la pared o del obstáculo que encuentra la onda sonora en su camino.

El módulo del coeficiente de reflexión está relacionado con el coeficiente de absorción por la expresión:

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (2.30)$$

Dado que la impedancia de la superficie reflectante o pared presenta una parte real, que es la responsable de las pérdidas de energía, y una parte imaginaria, que es la responsable de la generación del desfase en la onda reflejada, hay que considerar que el coeficiente de reflexión también presentará una parte real y una parte imaginaria.

La impedancia que presentan las paredes está relacionada con el coeficiente de reflexión por la expresión siguiente:

$$Z = \rho_o c_o \frac{1 + R}{1 - R} \quad (2.31)$$

Y con la impedancia específica z de las paredes del recinto, por la expresión:

$$R = \frac{z - 1}{z + 1} \quad (2.32)$$

La relación entre el coeficiente de absorción y la impedancia específica de las paredes viene dada por:

$$\alpha = \frac{4Re(z)}{|z|^2 + 2Re(z) + 1} \quad (2.33)$$

En el caso más general en que el ángulo θ de incidencia de la onda sobre la superficie reflectante tome un valor comprendido entre 0 y 90° , la impedancia de la pared pasa a ser:

$$Z = \frac{\rho_o c_o (1 + R)}{\cos\theta (1 - R)} \quad (2.34)$$

La relación, en este caso, con la impedancia específica de las paredes vendrá dada por:

$$R = \frac{z \cos\theta - 1}{z \cos\theta + 1} \quad (2.35)$$

El coeficiente de absorción y la impedancia específica de las paredes están relacionados por la siguiente expresión:

$$\alpha = \frac{4Re(z)\cos\theta}{|z|^2 \cos^2\theta + 2Re(z)\cos\theta + 1} \quad (2.36)$$

La combinación de la onda incidente y la onda reflejada forma la onda estacionaria, presenta un valor máximo:

$$P_{max} = \widehat{p}_o (1 + |R|) \quad (2.37)$$

Y un valor mínimo:

$$P_{min} = \widehat{p}_o (1 - |R|) \quad (2.38)$$

Si la pared presenta irregularidades o rugosidades de unas dimensiones comparables a la longitud de onda de la señal, las reflexiones dejan de ser especulares y se produce una reflexión difusa o dispersión (scattering), en la que la onda se refleja en todas direcciones. Este efecto es más acusado lógicamente en señales de alta frecuencia pero también puede ser producido por paredes que presenten una impedancia no uniforme.

Otro efecto acústico que se produce en la propagación de las ondas sonoras es la difracción que sufren las ondas cuando encuentran un obstáculo de dimensiones comparables a su longitud de onda, ya que según el principio de Huygens, los distintos puntos del frente de onda se comportan como focos emisores generadores de ondas que permiten rodear el obstáculo, aunque no obstante se pueden producir zonas de sombra acústica importantes en sus inmediaciones.

Una vez alcanzado el régimen permanente, el campo sonoro que se establece en el recinto se puede dividir en varias zonas en función de la distancia a la que nos encontremos de la fuente de sonido, una de estas zonas es la denominada zona de campo próximo.

La zona de campo próximo es la más cercana a la fuente, y en ella los efectos de direccionalidad y de falta de linealidad se hacen más evidentes, produciéndose grandes

variaciones de presión sonora para pequeños desplazamientos del receptor acústico, y por tanto es una zona de difícil caracterización en la que no se recomienda efectuar medidas de la presión sonora.

Por otro lado, en la división del campo sonoro del recinto se establecen dos zonas bien diferenciadas, la zona de campo directo y en la zona de campo reverberado:

- Zona de campo directo: en ella los efectos de las reflexiones de las ondas en el recinto son muy poco perceptibles, y la respuesta acústica es similar a la que encontraríamos al aire libre, reduciéndose el nivel de presión sonora en 6 dB al duplicarse la distancia a la fuente, para el caso de fuentes puntuales, y en 3 dB para el caso de fuentes lineales.

- Zona de campo reverberado: al alejarnos de la fuente, alcanzamos a una distancia a partir de la cual la influencia de las reflexiones de las ondas genera una presión equivalente a la producida en el campo directo, y por tanto el efecto de atenuación en función de la distancia se hace mucho menos acusado y puede llegar a mantenerse la presión sonora a un nivel aproximadamente constante, como se observa en la figura 2.3.

A la distancia a la que el nivel de presión sonora producido por el campo directo se encuentra 3 dB por encima del nivel de presión sonora producida por el campo reverberado se le conoce con el nombre de distancia crítica, tal como se indica en la figura 2.3 [ANT88], en la que se representa el nivel relativo de presión sonora expresado en dB respecto a la relación existente entre la distancia a la fuente de sonido y la distancia crítica. El valor de la distancia crítica depende fuertemente del coeficiente de absorción de las superficies del recinto.

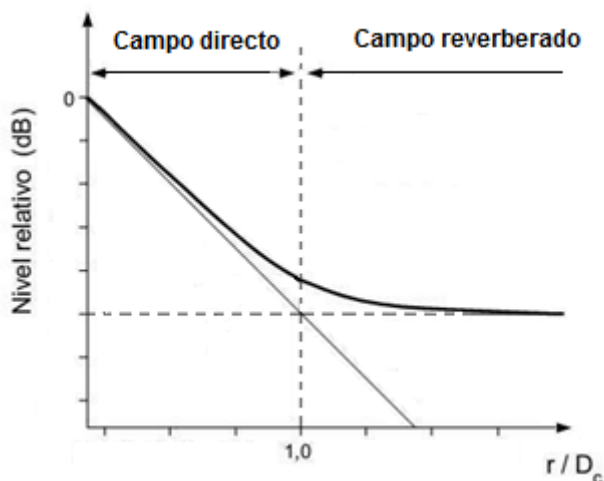


Fig.2.3. División del campo sonoro de un recinto

Finalmente señalar que si se quiere caracterizar una fuente de sonido en condiciones similares a las que obtendríamos en el campo libre, se utilizan cámaras anecoicas, en que la absorción sonora de las paredes que la forman es muy grande evitando cualquier reflexión en ellas, y cuyo comportamiento por tanto es totalmente opuesto al de las cámaras reverberantes, que son cámaras que se utilizan para cuantificar el coeficiente de absorción de los distintos materiales.

CAPÍTULO 3: Modelos acústicos de los recintos cerrados

3.1.- Introducción.

En este capítulo realizaremos una breve descripción de los modelos utilizados en el estudio de la respuesta acústica en los recintos, analizando sus ventajas e inconvenientes y sus rangos de aplicación, así como las limitaciones que presentan.

En particular prestaremos especial atención al modelo ondulatorio, dado que será el modelo que utilizaremos como base, junto al modelo estadístico, para definir nuestro modelo teórico no paramétrico que propondremos en los capítulos posteriores. En concreto nos centraremos en la función de Green, dado que esta función es la base a partir de la cual se definen las funciones de transferencia acústica propuestas por numerosos autores.

3.2. Modelos acústicos de los recintos cerrados.

El estudio de la respuesta acústica de los recintos cerrados ha sido abordado con diferentes enfoques, como son los enfoques proporcionados por el modelo geométrico, por el uso de métodos estadísticos, por la aproximación psicoacústica, por el modelo ondulatorio establecido en base a la ecuación de onda, por los modelos de función de transferencia (Room Transfer Function) y los por los métodos computacionales.

El modelo acústico geométrico se basa en aplicar las leyes de la óptica geométrica a la propagación del sonido, modelizando las ondas sonoras como rayos que cumplen con las leyes básicas de la óptica, como por ejemplo las leyes de reflexión y la ley de Snell de la refracción cuando la onda sonora cambia de medio de propagación. Este modelo es muy útil, sobretodo en el rango de las medias y altas frecuencias, y se aplica para estudiar la distribución en un recinto del campo sonoro directo y el comportamiento de las primeras reflexiones del sonido en el recinto, así como para el estudio de la focalización del sonido producido por la forma de determinadas superficies de las salas, como por ejemplo las bóvedas.

El precursor de los modelos estadísticos fue W. C. Sabine [SAB64], que fundó el campo de la acústica arquitectónica, que se basa en la determinación de un parámetro muy importante y ampliamente utilizado en la caracterización del comportamiento sonoro de un recinto, que es el tiempo de reverberación, ya presentado previamente en el capítulo de introducción. Sabine estableció una fórmula que relaciona este tiempo de reverberación con las dimensiones y la cantidad de material absorbente que contiene el recinto, conocida como la ecuación de Sabine, y que se fundamenta en la suposición del establecimiento de un campo sonoro homogéneo e isótropo, denominado campo difuso.

El modelo psicoacústico contempla el estudio de la característica de la respuesta de nuestro sistema auditivo, incluyendo la relación entre la magnitud de la sensación subjetiva producida por el sonido con respecto a sus propiedades físicas, englobando los conceptos y efectos relacionados con el proceso de la percepción del sonido, como son la sonoridad, la tonalidad y el enmascaramiento, entre otros. Este modelo no entra dentro del marco de estudio de esta tesis.

El modelo acústico geométrico y los modelos estadísticos presentan limitaciones que no proporcionan una teoría completa del sonido en los recintos. Un modelo más completo

debe basarse directamente en la teoría ondulatoria. La solución de la ecuación de onda para recintos de geometría simple es una herramienta muy potente para la obtención de la respuesta acústica completa de los recintos, aunque se presentan mayores dificultades para la obtención de dicha respuesta en recintos irregulares o que presentan condiciones poco ideales. La función de transferencia de un recinto cerrado (Room Transfer Function) que deriva de la función de onda, y que estudiaremos en los capítulos siguientes, se muestra también como otra importante herramienta de estudio.

Las elevadas dificultades que encontramos en la práctica para establecer la RTF de un recinto han provocado la investigación de numerosos modelos paramétricos, ya que a pesar de que en algunos casos no presentan una relación directa con la interpretación física del proceso que modelizan, permiten abordar con éxito muchas de las problemáticas que se nos plantean en el tema que nos ocupa, como por ejemplo la problemática que surge a la hora de seleccionar el orden del modelo del sistema acústico o la aplicación de la técnica de zoom espectral que se propone para resolver casos en que los modos se encuentran muy próximos en clusters que contienen una alta densidad de modos, como señalan M. Karjalainen et al. en [KAR02b].

Se han propuesto modelos paramétricos como por ejemplo el AR o el ARMA, cuyos coeficientes se corresponden con la respuesta impulsional de la RTF en el dominio del tiempo, o como por ejemplo el modelo CAPZ (common-acoustical-pole and zero) propuesto por Haneda et al. en [HAN99].

Este modelo tiene una más directa interpretación física, en la que las frecuencias de resonancia ω_n y sus coeficientes de amortiguamiento asociados ξ_n son independientes de la posición del emisor y el receptor acústico. Dado que sólo los ceros dependen de la posición del emisor y el receptor, este modelo requerirá menos parámetros para expresar las variaciones de la RTF que los modelos convencionales AR y ARMAX, no obstante, es bastante complejo expresar las variaciones de los ceros como funciones explícitas. Para minimizar estas dificultades se proponen también en [HAN99] modelos que contemplan los polos y sus residuos para expresar las variaciones de la RTF con funciones más simples.

Los métodos computacionales y su detallada descripción de efectos de difícil modelización, como por ejemplo la reflexión difusa o la respuesta acústica en el rango de las bajas frecuencias, hacen que sean una herramienta muy útil para estudiar y predecir la respuesta acústica de un recinto y son ampliamente utilizados. La difícil determinación de la distribución de las autofunciones en recintos poco ideales y en recintos con geometrías complicadas requieren la aplicación del cálculo numérico. El método de los elementos finitos (FEM) que podemos ver aplicado en [EAS95] y el método de los elementos de frontera o contorno (BEM) que podemos ver aplicado en [BRE84] son métodos muy utilizados para encontrar formas aproximadas de las autofunciones.

Los métodos computacionales utilizan frecuentemente modelos geométricos, como el de la fuente imagen, que se basa en suponer que en los límites del recinto se pueden cumplir las condiciones de contorno por el establecimiento de otra fuente de sonido imaginaria idéntica a la real y situada simétricamente en la parte posterior de las paredes que forman sus límites, como se propone en [ALL79], aunque hay que considerar que en algunos recintos el

número de posibles fuentes imagen crece exponencialmente con el orden de la reflexión, y por tanto este método puede presentar problemas en algunas de sus aplicaciones.

Otro modelo acústico geométrico que se utiliza también como método computacional es el de trazado de rayos, como podemos ver en [KRO68], en el que se utiliza un elevado número de partículas que son emitidas en varias direcciones desde una fuente de sonido puntual. Las partículas se desplazan alrededor del recinto perdiendo energía en cada reflexión según el coeficiente de absorción de las superficies y son reflejadas suponiendo reflexiones especulares en una dirección determinada por la ley de Snell, ley ampliamente utilizada en la óptica geométrica.

La búsqueda de la combinación de las ventajas que presentan estos dos métodos geométricos clásicos ha provocado la aparición de los modelos híbridos que podemos encontrar por ejemplo en [VOR89], [NAY92] y [NAY93]. La idea básica es que una forma eficiente para determinar fuentes imagen que tengan altas probabilidades de ser válidas es trazar rayos desde las fuentes y considerar solo aquellas superficies que proporcionan resultados válidos, al ser finito el número de rayos no se consideran todas las posibles fuentes imagen, y es necesario utilizar otros métodos, generalmente estadísticos, para obtener la respuesta completa. Estos modelos se basan en el principio de que los rayos crean fuentes imagen para las reflexiones tempranas y fuentes imaginarias secundarias situadas en las paredes del recinto para las reflexiones tardías.

3.3.-Limitaciones y rango de aplicación de los modelos acústicos.

Los diferentes modelos aplicados a la descripción acústica del sonido en los recintos cerrados tienen su rango de aplicación, y para poder realizar su aplicación práctica se adoptan además una serie de simplificaciones que afectan a la precisión de las soluciones que aportan, y que pasaremos a comentar a continuación.

Entre los modelos geométricos más importantes se encuentran el de trazado de rayos [KRO68] y el de la imagen [ALL79] ya comentados y muy utilizados como métodos computacionales, que proporcionan resultados con una elevada precisión, sin embargo, su aplicación se limita al rango de las frecuencias medias y altas (sobre cuatro veces por encima de la frecuencia de cruce de Schroeder que definiremos más adelante) y requieren de un elevado tiempo de computación para obtener una precisión aceptable, al tener que procesar las trayectorias de un número de rayos muy elevado, factor este último que juega en contra de nuestra aplicación que está pensada para trabajar en tiempo real. No obstante, la aparición de los modelos híbridos ha significado una importante mejora en este aspecto.

Entre las hipótesis simplificadoras que contemplan algunos de estos modelos se encuentra la de suponer reflexiones especulares, no difusas, en todas las superficies presentes en el recinto, y por tanto que las dimensiones de los obstáculos presentes en el recinto son mucho mayores que la longitud de onda de la de la señal emitida por la fuente de sonido, condición esta que en ocasiones no se cumple en la práctica si trabajamos en el margen inferior de las frecuencias contempladas por los modelos. También pueden presentar el problema de que en simulaciones de grandes recintos y con recintos adyacentes acoplados algunas de las trayectorias previstas importantes de los rayos pueden llegar a perderse.

La mayor ventaja que presentan los modelos estadísticos radica en su gran potencial a la hora de facilitar su aplicación práctica, y actualmente son muy importantes y ampliamente utilizados en la acústica arquitectónica. Su rango de aplicación óptimo se sitúa en el margen de las frecuencias medias y altas, pero se basan en la hipótesis de que en el recinto se produce un campo sonoro difuso, cuyo establecimiento requiere de condiciones que no se cumplen en su totalidad en muchas aplicaciones prácticas. La distribución no uniforme de las superficies absorbentes en el recinto, la presencia de techos abovedados que puedan tender a concentrar el campo sonoro en algunas zonas, la posible presencia de ventanas abiertas de ventilación del recinto y las formas simétricas de los recintos son algunos factores típicos que se oponen a la generación de un campo sonoro difuso.

El tiempo de reverberación en la práctica, debido a estos y otros factores, no adopta un valor constante en todo el recinto, y eso justifica el establecimiento de normas, como la ISO 3382 [ISO09], que establecen unos procedimientos con el fin de obtener un tiempo de reverberación promediado a partir de su medida en diferentes localizaciones de la sala, en posiciones que se pueden considerar estadísticamente independientes.

J. Ducourneau et al. en [DUC03] realizan un estudio de los errores que se producen en la determinación del tiempo de reverberación obtenido con diferentes modelos estadísticos, simulando recintos con límites heterogéneos formados con materiales de diferentes coeficientes de absorción como los que presentan las plantas industriales, utilizando para ello paneles absorbentes ubicados en distintas zonas del recinto. Los mejores resultados con los modelos estadísticos típicos proporcionan un error relativo que se sitúa por debajo del 20 %, pero en algunos casos los errores máximos pueden llegar a superar el 40 %. Los autores proponen un modelo de absorción acústico basado en el ángulo sólido que representa el área equivalente de los paneles vistos desde la fuente de sonido, validado en recintos industriales, que aumenta la precisión de los modelos.

Si consideramos que los modelos de la acústica estadística nos proporcionan un valor constante del tiempo de reverberación para todo el recinto, y por tanto que no depende de la posición analizada del recinto, vemos que este es un factor que juega en contra en nuestra aplicación, ya que el tiempo de reverberación no nos podrá suministrar directamente información sobre la posición del robot.

En el rango de las frecuencias bajas, por debajo de la frecuencia de cruce de Schroeder, las limitaciones de los modelos anteriores son evidentes, y el modelo que permite el análisis en este rango de frecuencias y que más precisión aporta en la descripción del campo acústico reverberante es el modelo ondulatorio. Como hemos señalado anteriormente, la solución práctica de la función de onda se limita a recintos de geometría simple, y para recintos de geometría más compleja se realizan aproximaciones a formas similares de recintos más simples.

Derivadas directamente de la función de onda son ampliamente utilizadas las funciones de transferencia de un recinto cerrado, que se definen como la respuesta impulsional asociada a las dos posiciones espaciales de la fuente de sonido y del receptor acústico en el recinto.

El uso de estos modelos en el rango de las frecuencias medias y altas queda muy restringido debido al elevado número de modos que se deben contemplar en su análisis y la complejidad que ello conlleva. Como señalan M. Karjalainen et al. en [KAR02b], la modelización del comportamiento modal, es decir, la descomposición de los modos de resonancia asumiendo un sistema lineal invariante en el tiempo (LTI), puede ser extremadamente complicada. En resonadores unidimensionales, como algunos instrumentos musicales, la densidad de modos de resonancia no es necesariamente alta, pero incluso esos modos pueden exhibir complicados comportamientos. En resonadores de dos o tres dimensiones, como membranas o recintos cerrados, la densidad modal se incrementa en alta frecuencia, resultando un patrón de comportamiento donde los modos contiguos se superponen remarcablemente. El análisis de la respuesta temporal también resulta complejo, especialmente en recintos donde el sonido directo y las primeras reflexiones son seguidas por un elevado número de reflexiones tardías.

Otros autores también señalan, como Gustaffson et al. en [GUS00], que incluso obtener estas funciones de transferencia en el rango de las bajas frecuencias es también complicado, ya que para modelizar la respuesta acústica de un recinto con precisión, puede ser necesario considerar muchas posibles ubicaciones del micrófono en el recinto, y se hace necesario recurrir al intercambio de información entre los datos experimentales y el modelo teórico para poder extrapolar las RTF's en todas las posibles posiciones del recinto con precisión.

No obstante, estas dificultades se abordan mediante la investigación de diferentes modelos paramétricos para definir la RTF de un recinto. Sin embargo, por encima de la frecuencia de Schroeder, el comportamiento modal difuso, en que la densidad de los modos es alta y se superponen en frecuencia, provoca que la modelización con modelos paramétricos, como los modelos AR o ARMA sea difícil de obtener.

A pesar de las elevadas dificultades que se plantean, la gran ventaja del uso de modelos que derivan del modelo ondulatorio en nuestra aplicación radica en que sus soluciones aportan una información muy detallada de la posición del receptor acústico en el recinto, información que nos será muy útil para determinar la posición del robot, y su utilización se verá facilitada por el espectro sonoro de las fuentes de sonido típicas de las máquinas utilizadas en las plantas industriales, que se sitúa en el rango de la baja frecuencia. Por ello dedicaremos el apartado siguiente a estudiar el modelo ondulatorio.

3.4. El modelo ondulatorio: La ecuación de onda.

La función de Green define la función de transmisión de la presión entre dos puntos de un recinto cerrado, y se obtiene tomando como punto de partida a la ecuación de onda, tal como por ejemplo señala y desarrolla con detalle Kuttruff en [KUT09], y que pasamos a exponer a continuación.

La función de onda puede expresarse sin considerar la dependencia temporal de la presión acústica p a través de la ecuación de Helmholtz:

$$\Delta p + k^2 p = 0 \quad (3.1)$$

Siendo k el número de onda, definido por:

$$k = \omega/c \quad (3.2)$$

Donde ω es la frecuencia angular de la vibración y c es la velocidad de propagación del sonido. Asumiremos que las propiedades acústicas de los límites del recinto quedan completamente caracterizadas por su impedancia que dependerá de sus coordenadas y de la frecuencia de la señal pero no por el ángulo de incidencia del sonido.

La componente normal de la velocidad en los límites del recinto viene dada por:

$$v_n = \frac{j}{\omega\rho_0} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (3.3)$$

Donde v_n es la velocidad de las partículas, ρ_0 es el valor estático de la densidad del aire y la derivada de la presión se indica respecto a la dirección normal a los límites del recinto.

Considerando la definición de impedancia acústica, podemos escribir la expresión anterior como:

$$Z \frac{\partial p}{\partial n} + j\omega\rho_0 p = 0 \quad (3.4)$$

Si consideramos la definición de impedancia acústica específica ya vista anteriormente:

$$z = \frac{Z}{\rho_0 c} \quad (3.5)$$

Podemos poner la expresión (3.4) como:

$$z \frac{\partial p}{\partial n} + jkp = 0 \quad (3.6)$$

Se puede observar que la función de onda proporciona soluciones distintas de cero que cumplen las condiciones de contorno dadas por (3.4) o (3.6) sólo para valores discretos de k denominados autovalores, y que denotaremos por k_n . Cada autovalor k_n está asociado con una solución $p_n(r)$ que se denomina la autofunción del recinto considerado, siendo r una abreviación de las tres coordenadas espaciales.

Si el recinto contiene una fuente de sonido operando a una cierta frecuencia, k vendrá definido por esta frecuencia, y tanto los autovalores como las autofunciones dependen de esta frecuencia.

Por otro lado las autofunciones son ortogonales entre ellas, es decir cumplen:

$$\iiint_V p_n(r)p_m(r)dV = \begin{cases} B_n & \text{para } n = m \\ 0 & \text{para } n \neq m \end{cases} \quad (3.7)$$

Donde la integral se extiende a todo el volumen V encerrado por los límites del recinto y B_n es una constante de integración con dimensiones $\text{Pa}^2\text{m}^3 = \text{N}^2/\text{m}$.

Supongamos que las fuentes de sonido se encuentran distribuidas uniformemente por el recinto siguiendo una determinada función de densidad $q(r)$. Donde $q(r)dV$ es la velocidad volumétrica de un elemento diferencial de volumen en r . $q(r)$ puede ser una función compleja considerando las posibles diferencias de fase entre las diferentes fuentes de sonido infinitesimales. En este caso la ecuación de onda la podemos expresar como:

$$\Delta p + k^2 p = -j\omega\rho_0 q(r) \quad (3.8)$$

En este caso, las autofunciones forman un conjunto completo de funciones ortogonales y se puede expandir la función $q(r)$ en función de p_n según la expresión:

$$q(r) = \sum_n D_n p_n(r) \quad (3.9)$$

Donde D_n viene definida por:

$$D_n = \frac{1}{B_n} \iiint_V p_n(r) q(r) dV \quad (3.10)$$

De la misma forma, la solución $p_\omega(r)$ puede ser expandida en autofunciones:

$$p_\omega(r) = \sum_n E_n p_n(r) \quad (3.11)$$

Para poder expresar los coeficientes desconocidos E_n en función de los coeficientes D_n conocidos incluimos ambas series en la ecuación (3.8):

$$\sum E_n (\Delta p + k^2 p) = j\omega\rho_0 \sum D_n p_n \quad (3.12)$$

Considerando en la expresión anterior que:

$$\Delta p_n = -k_n^2 p_n \quad (3.13)$$

Obtenemos finalmente:

$$E_n = j\omega\rho_0 \frac{D_n}{k^2 - k_n^2} \quad (3.14)$$

La solución final adopta una forma particular simple para el caso de una fuente puntual situada en el punto r_0 que presenta una velocidad volumétrica Q (velocidad a la que el fluido es impulsado por la fuente expresada en m^3/s). Esta función se representa matemáticamente por una delta de Dirac:

$$q(r) = Q\delta(r - r_0) \quad (3.15)$$

En base a las propiedades de la función delta los coeficientes D_n en la ecuación (3.10) vienen dados por:

$$D_n = \frac{1}{B_n} Q p_n(r_0) \quad (3.16)$$

Considerando esta expresión en las ecuaciones (3.11) y (3.14) se puede obtener la expresión de la presión sonora en un recinto excitado por una fuente puntual monofrecuencial:

$$p(\omega, r) = jQ\omega\rho_0 \sum \frac{p_n(r)p_n(r_0)}{B_n(k^2 - k_n^2)} \quad (3.17)$$

Esta función se conoce como la función de Green del recinto bajo consideración.

Dado que las condiciones de contorno son usualmente expresiones complejas que contienen el número de onda k_n , podemos expresar k_n como:

$$k_n = \frac{\omega_n}{c} + j \frac{\xi_n}{c} \quad (3.18)$$

Si aceptamos la simplificación de que $\xi_n \ll \omega_n$, podemos escribir la función de Green como:

$$p(\omega, r) = \rho_0 c^2 \omega Q \sum_n \frac{p_n(r)p_n(r_0)}{[2\xi_n \omega_n + j(\omega^2 - \omega_n^2)]B_n} \quad (3.19)$$

Esta expresión es la función de transmisión del recinto entre dos puntos r y r_0 . La frecuencia ω_n se denomina autofrecuencia o frecuencia de resonancia del recinto, ya que cuando la fuente sonora emite en las proximidades de ella el término asociado de la serie toma un valor absoluto muy alto. El coeficiente ξ_n es la constante de amortiguamiento.

Si la fuente sonora no emite una señal monofrecuencial, sino que emite una señal formada por diferentes componentes espectrales, entonces $Q = Q(\omega)$ y se puede representar la señal a partir de la integral de Fourier:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} Q(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (3.20)$$

Con objeto de poder simplificar la aplicación práctica del desarrollo anteriormente expuesto, muchos autores abordan su estudio aplicado a recintos rectangulares, ya que muchos recintos como por ejemplo bibliotecas, iglesias o las plantas industriales en las que prestamos especial atención en nuestro estudio, presentan una forma muy próxima a la de un recinto rectangular ideal, y las soluciones obtenidas, aunque no sean totalmente exactas, pueden ser aceptables para distintas aplicaciones.

Si consideramos la localización de una fuente de sonido en unas determinadas coordenadas $r_s=(x,y,z)$ de un recinto rectangular de unas ciertas dimensiones L_x , L_y , y L_z , con paredes ideales en las que las ondas se reflejan sin pérdidas, la ecuación de onda o ecuación de Helmholtz la podemos escribir como se propone en [KIN95]:

$$\frac{\partial^2 p(r,t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p(r,t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p(r,t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(r,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.21)$$

Donde $p(r,t)$ es la presión acústica en un punto del recinto $r=(x,y,z)$ y c es la velocidad de propagación del sonido, $p(r,t)$ viene dada por la expresión:

$$p(x, y, z, t) = p_1(x)p_2(y)p_3(z)e^{j\omega t} \quad (3.22)$$

Sustituyendo esta expresión en la ecuación de onda (4.21) y separando las variables, se obtiene el conjunto de ecuaciones siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 p_1(x)}{dx^2} + k_x^2 p_1(x) &= 0 \\ \frac{d^2 p_2(y)}{dy^2} + k_y^2 p_2(y) &= 0 \\ \frac{d^2 p_3(z)}{dz^2} + k_z^2 p_3(z) &= 0 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Las constantes k_x , k_y y k_z están relacionadas por la siguiente expresión:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \quad (3.24)$$

Siendo:

$$k^2 = (\omega/c)^2 \quad (3.25)$$

Si consideramos las condiciones de contorno que se establecen al considerar los límites del recinto idealmente rígidos, en $x = 0$ y $x = L_x$, $y = 0$ y $y = L_y$, $z = 0$ y $z = L_z$, siendo L_x , L_y y L_z la longitud, anchura y altura del recinto respectivamente:

$$\frac{\partial p(r,t)}{\partial x} = \frac{\partial p(r,t)}{\partial y} = \frac{\partial p(r,t)}{\partial z} = 0 \quad (3.26)$$

La solución de la ecuación tendrá la forma:

$$p(r,t) = \sum_{n_x, n_y, n_z=0}^{\infty} C_n \cdot \cos(k_x x) \cdot \cos(k_y y) \cdot \cos(k_z z) e^{j\omega t} \quad (3.27)$$

Donde C_n es el factor que indica la amplitud máxima del modo, y donde las componentes del vector k vienen definidas por:

$$k_x = \frac{n_x \pi}{L_x}; \quad k_y = \frac{n_y \pi}{L_y}; \quad k_z = \frac{n_z \pi}{L_z} \quad (3.28)$$

Siendo n_x , n_y y n_z enteros positivos.

Las frecuencias de resonancia dependen de la geometría del recinto y de los coeficientes de reflexión de los materiales, entre otros factores, y vienen dadas por las expresiones:

$$f_{n_x n_y n_z} = \sqrt{f_{n_x}^2 + f_{n_y}^2 + f_{n_z}^2} \quad (3.29)$$

$$f_{n_x n_y n_z} = \sqrt{\left(\frac{n_x c}{2L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y c}{2L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z c}{2L_z}\right)^2}$$

Siendo esta última expresión la conocida formula de Rayleigh. Las respuestas acústicas del módulo de la presión en este tipo de recintos rectangulares en función de la posición, para diferentes modos de propagación, considerando que nos desplazamos por el recinto con un valor de la coordenada z constante (como el caso que nos ocupa de un robot con una altura del micrófono que lleva incorporado que se mantiene constante), se pueden observar en la Fig. 3.1.

Las respuestas acústicas aisladas de la figura 3.1 se obtienen a partir de una fuente de sonido que excita sólo un modo de propagación, en la práctica, la respuesta acústica es más compleja y su complejidad se incrementa con el número de modos excitados simultáneamente por la fuente de sonido.

No obstante, en un escenario real, el número de modos a considerar no es infinito, y si consideramos que en la expresión (3.29) cada una de las frecuencias naturales f pueden considerarse como un vector en un espacio de frecuencias, y que un modo normal puede representarse como un punto en ese espacio de frecuencias, podemos deducir el número de modos N de frecuencia menor a una determinada frecuencia f con la siguiente expresión propuesta por Kinsler en [KIN95] entre otros autores:

$$N \approx \frac{4\pi V}{3c^3} f^3 \quad (3.30)$$

Siendo V el volumen del recinto considerado. Diferenciando esta expresión con respecto a la frecuencia f se obtiene el número de modos ΔN que presentan frecuencias comprendidas en un determinado ancho de banda Δf centrado en la frecuencia f :

$$\frac{\Delta N}{\Delta f} = \frac{4\pi V}{c^3} f^2 \quad (3.31)$$

Como vemos en esta última expresión, al aumentar la frecuencia, el número de modos en la banda considerada aumenta de forma acusada, por lo que a altas frecuencias encontraremos un gran número de modos que se encontrarán solapados.

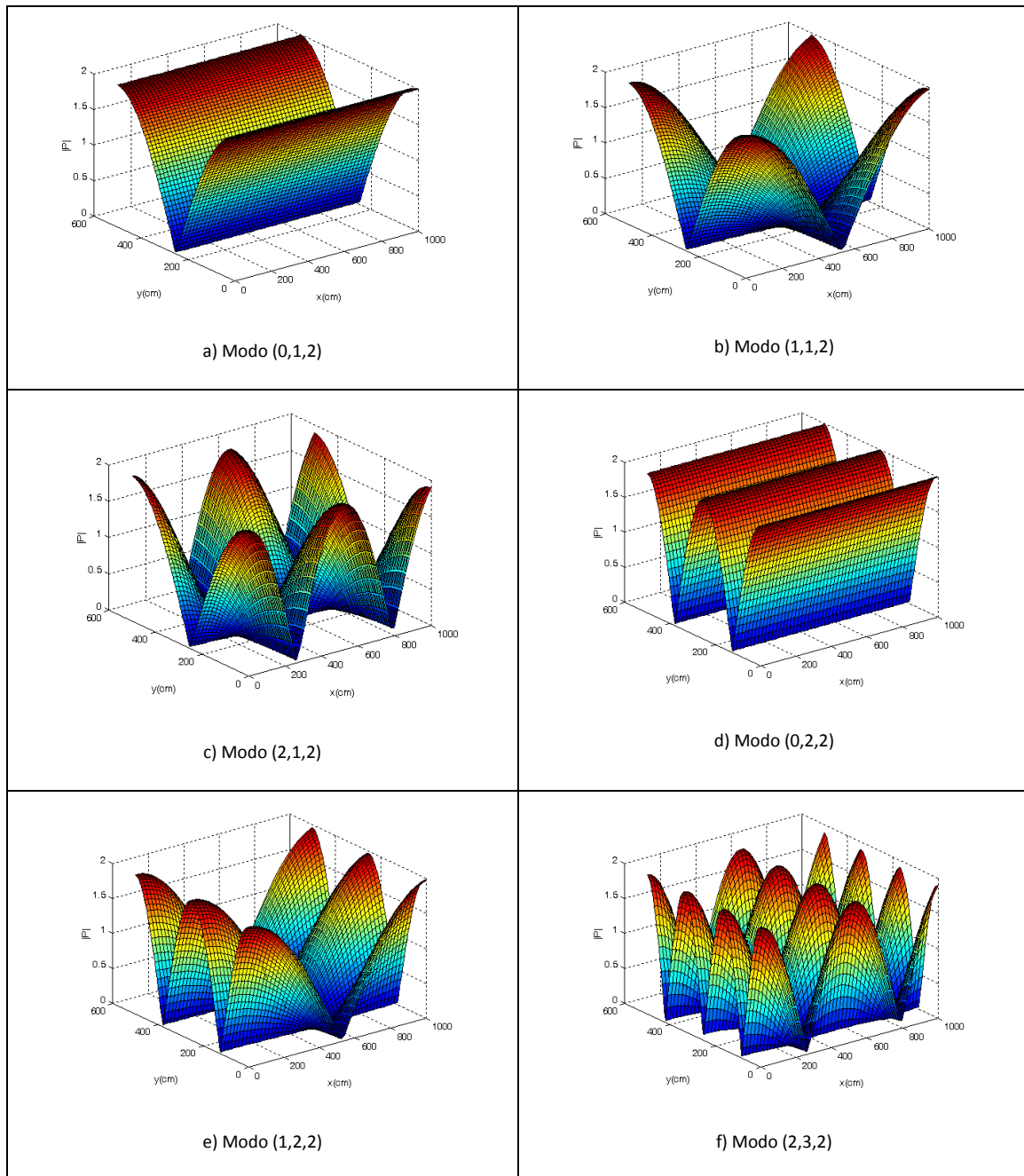


Fig. 3.1. Respuestas ideales del recinto de experimentación para diferentes modos de propagación

Los modos de propagación se pueden clasificar como hemos visto por el conjunto de enteros (n_x , n_y y n_z). Si dos enteros son cero, el modo de propagación se denomina axial, debido a que el vector de propagación es paralelo a uno de los ejes, si uno de los enteros es cero, el modo se denomina tangencial, debido a que el vector de propagación es paralelo a un par de superficies, y si ningún entero es cero, el modo se denomina oblicuo.

Las autofunciones definidas en (3.27) nos indican que podremos obtener la máxima amplitud de la onda estacionaria si situamos el receptor acústico en las esquinas del recinto, y de la misma forma, nos indican que la fuente de sonido producirá la máxima respuesta acústica cuando la situemos en ellos. Por otro lado hay que considerar que estas autofunciones están definidas para el caso en que los límites del recinto fuesen ideales, es decir, para el caso de que la densidad de energía sonora de la onda acústica se conserve

después de haber sufrido las correspondientes reflexiones en ellos si despreciamos la atenuación que se puede producir en el medio de propagación..

Para el caso en que la onda incidente se refleje en una superficie no ideal, la energía de la onda reflejada será menor que la de la onda incidente, y este hecho provoca modificaciones importantes en las autofunciones anteriormente definidas, como por ejemplo señala Kinsler en [KIN95]. En primer lugar, los modos normales decrecerán con el tiempo, y cada frecuencia natural ω_n deberá ser reemplazada por una cantidad compleja ω_n :

$$\omega_n = \omega_n + j\beta_n \quad (3.32)$$

Otra consecuencia es que la onda estacionaria mostrará amortiguamiento espacial, y el vector de propagación k , y por tanto todas sus componentes, deben reemplazarse por una k compleja, que si la expresamos en función de una dimensión genérica u ($u = x, y, z$) quedará definida como:

$$k_u = \frac{n_u \pi}{L_u} + j\alpha_u \quad (3.33)$$

Donde L_u es la dimensión del eje u considerado del recinto y α_u corresponde al coeficiente de absorción de los materiales que conforman los límites del recinto. Para este segundo caso,, las autofunciones definidas en (3.27) pueden expresarse como:

$$p(r,t) = \sum_{n_x, n_y, n_z=0}^{\infty} C_n \cdot \cos(k_x x + \phi_x) \cdot \cos(k_y y + \phi_y) \cdot \cos(k_z z + \phi_z) e^{j\omega t} \quad (3.34)$$

Si sustituimos esta expresión en la ecuación de onda sin pérdidas, se observa que:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 - (\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \left(\frac{\beta}{c}\right)^2 \quad (3.35a)$$

$$\alpha_x k_x + \alpha_y k_y + \alpha_z k_z = \frac{\omega \beta}{c^2} \quad (3.35b)$$

Los valores de los parámetros k , ϕ y α de las expresiones anteriores se obtienen aplicando las condiciones de contorno que describen a las paredes con pérdidas, que también determinan el coeficiente de absorción temporal β de cada uno de los modos normales. Los modos normales y sus frecuencias naturales son función fundamentalmente de la forma y tamaño del recinto, mientras que la rapidez de amortiguamiento depende de las impedancias acústicas específicas de los límites del recinto.

Si consideramos este hecho de que la onda reflejada no tiene la misma energía que la onda incidente, no existirá ningún punto del recinto en que la onda reflejada anule por completo a la onda incidente, y no encontraremos por tanto en el recinto puntos con presión nula. Este aspecto queda reflejado en la figura 3.2, para un caso simplificado unidimensional donde se representa el módulo de la presión $|P|$ de la onda estacionaria en función de la

longitud L_x del recinto para el caso de que las paredes presentaran una impedancia reactiva pura, es decir, que no provocarían pérdidas de energía.

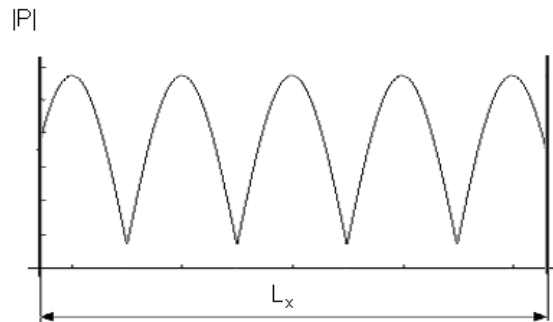


Fig. 3.2. Amplitud de la presión de la onda estacionaria en función de la posición para el caso unidimensional.

Como observamos en la figura, la evolución de la onda estacionaria mostraría un cierto desfase respecto al caso en que los límites del recinto fueran totalmente ideales.

3.5. Función de transferencia de un recinto cerrado.

Como hemos señalado, una forma de abordar el estudio de la respuesta acústica de un recinto es a partir de la función de transferencia acústica, que se define como la respuesta impulsional asociada a las dos posiciones espaciales de la fuente de sonido y del receptor acústico en el recinto, y dependerá de la geometría y de los coeficientes de absorción de los materiales que forman los límites del recinto, entre otros factores.

La obtención de la RTF de un recinto es importante en muchas aplicaciones de audio, como por ejemplo para el procesamiento de la señal acústica y para el control del campo sonoro de un recinto cerrado. Se utilizan en canceladores de resonancias acústicas para eliminar el eco en los recintos como podemos ver en [FUR91] o en [MAK93], controladores activos del ruido como podemos ver en [WID85] o en [MIY88] y sistemas de control de sonido MIMO, entre otras aplicaciones.

Diversos autores proponen diferentes formas para expresar la función de Green definida en (3.19) en forma de función de transferencia acústica en el dominio de la frecuencia. Por ejemplo Haneda et al. en [HAN99] proponen una expresión que se establece entre la localización de la fuente de sonido r_s y la localización del receptor acústico r_m en el recinto, siendo $r=(x,y,z)$ las coordenadas respectivas correspondientes en las tres dimensiones del recinto, que si se acota a un cierto número finito de modos a considerar L , podemos expresar como:

$$H(\omega, r_m, r_s) = C \sum_{n=1}^L \frac{\psi_n(r_m)\psi_n(r_s)j\omega}{\omega^2 - \omega_n^2 - 2j\xi_n\omega_n + \xi_n^2} \quad (3.36)$$

En esta RTF se considera la presión que genera una fuente puntual que emite a una determinada frecuencia angular ω y ξ_n es el coeficiente de amortiguamiento asociado al modo

considerado. $\psi_n(r_m)$ y $\psi_n(r_s)$ son las autofunciones correspondientes a las distintas frecuencias de resonancia del recinto, de valor ω_n , y C es el factor de ganancia.

Las autofunciones que vienen definidas en las posiciones de la fuente de sonido y del micrófono, las podemos expresar para recintos rectangulares, de una forma simplificada como:

$$\begin{aligned}\psi_n(x_s, y_s, z_s) &= \cos \frac{n_x \pi x_s}{L_x} \cos \frac{n_y \pi y_s}{L_y} \cos \frac{n_z \pi z_s}{L_z} \\ \psi_n(x_m, y_m, z_m) &= \cos \frac{n_x \pi x_m}{L_x} \cos \frac{n_y \pi y_m}{L_y} \cos \frac{n_z \pi z_m}{L_z}\end{aligned}\quad (3.37)$$

Expresiones definidas por la tripleta de valores (n_x, n_y, n_z) del modo n considerado, donde $n_x, n_y, n_z \in N$ y donde (x_s, y_s, z_s) y (x_m, y_m, z_m) son las coordenadas cartesianas de la posición de la fuente de sonido y la posición del receptor acústico respectivamente:

La solución formal de la ecuación de onda también puede expresarse como una función de transferencia acústica según la siguiente expresión propuesta por Gustaffson et al. en [GUS00], donde $s = j\omega$ ya que consideramos la respuesta estacionaria del recinto:

$$\frac{P(r_s, r_m, s)}{sU_s(s)} = \rho_o c_o^2 \sum_{n=1}^L \frac{\psi_n(r_s) \psi_n(r_m)}{s^2 + 2\xi_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.38)$$

Otros autores proponen diferentes expresiones que proporcionan una solución aproximada a la función de Green, como la propuesta por Kinsler en [KIN95] que se basa en la similitud que presenta el comportamiento acústico de un recinto al comportamiento de un oscilador armónico subamortiguado. La expresión (3.39) modeliza el comportamiento del recinto cuando es excitado por una fuente monofrecuencial que emite en una posición fija a una determinada frecuencia ω .

La presión que tendremos en un punto del recinto para un determinado modo de propagación n vendrá dada en este caso por la expresión siguiente:

$$p(r_m) = \sum_{n=1}^L \frac{K_n \psi_n(r_m)}{\sqrt{\left(\frac{1}{Q_n}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_n} - \frac{\omega_n}{\omega}\right)^2}} \quad (3.39)$$

Siendo Q_n el factor de calidad del recinto para el modo considerado. El valor de K_n para el modo considerado dependerá de la posición y configuración de la fuente de sonido.

También encontramos en la bibliografía propuestas de la definición de la función de transferencia en el dominio del tiempo, es decir, la respuesta impulsional del sistema. Dado

que la respuesta impulsional de los sistemas resonantes muestra una o más sinusoides que decrecen de forma exponencial, por ejemplo en [KAR02a] se propone la expresión siguiente:

$$h(t) = \sum_{n=1}^L A_n e^{-\tau_n(t-t_0)} \sin[\omega_n(t-t_0) + \phi] u(t-t_0) \quad (3.40)$$

Donde A_n es el nivel de respuesta inicial, $u(t-t_0)$ es la función escalón con un cierto retardo t_0 provocado por el tiempo de retardo de la propagación del sonido, τ es la constante de tiempo de decrecimiento del sonido, ω_n la frecuencia angular del modo n considerado y ϕ la fase inicial de la respuesta. Si consideramos un solo modo, la ecuación (3.40) puede interpretarse como la respuesta impulsional de un filtro de segundo orden, por tanto, de forma generalizada, podemos afirmar que la respuesta a una combinación de L modos puede interpretarse como la respuesta de un filtro de orden $2L$.

CAPÍTULO 4: Modelo teórico de función de transferencia

4.1. Introducción al modelo propuesto.

El modelo que presentaremos en este capítulo es un modelo LTI de la función de transferencia acústica de la presión en el recinto, en el que la mayoría de sus parámetros se calcularán *off-line* a partir de las expresiones que describen el comportamiento físico de la propagación del sonido en recintos cerrados, aunque no es un modelo que podamos definir como estrictamente teórico, dado que requeriremos de la medida de la presión sonora en algunas posiciones de la zona de trabajo del robot para su completa definición, como veremos más adelante.

En el capítulo anterior hemos visto diversas expresiones de la función de transferencia acústica derivadas directamente de la función de Green, así como otras expresiones basadas en la similitud de la respuesta acústica que modeliza la función de Green con la respuesta de un oscilador armónico subamortiguado o con la respuesta que presentaría una asociación de filtros de segundo orden sintonizados a la frecuencia de resonancia correspondiente al modo considerado.

También hemos visto en el capítulo anterior expresiones de las RTF definidas con modelos paramétricos, como las propuestas por Haneda et al. en [HAN99] o por Gustaffson et al. en [GUS00], que trabajan con un número finito de modos y proponen la determinación de los distintos parámetros de las RTF a partir del tratamiento de los datos experimentales trabajando con las expresiones de las RTF en tiempo discreto en el dominio de z .

La función de transferencia que proponemos presenta las siguientes particularidades:

- Trabajaremos con ella en el dominio de la frecuencia, permitiendo un ahorro del tiempo de computación apreciable respecto al que necesitaríamos si trabajáramos con su expresión en tiempo discreto en el dominio de z .
- La determinación de la mayoría de sus parámetros se obtendrá a partir de expresiones basadas en la descripción del comportamiento físico de la propagación del sonido en un recinto, y por tanto la mayoría de los valores de los parámetros se podrán determinar, aunque con un cierto grado de incertidumbre, sin la necesidad de realizar medidas experimentales previas en el recinto.
- No se requerirá un estudio previo del recinto tan detallado como el que requieren otros modelos acústicos.
- Trabajaremos con un único modo, que denominaremos modo principal, para describir la respuesta acústica de la zona del recinto de interés, a diferencia de otros modelos que requieren trabajar con un número de modos que puede llegar a ser muy elevado.

Como hemos comentado anteriormente, Karjalainen et al. en [KAR02a] y [KAR02b] establece la equivalencia de la respuesta acústica generada por L modos excitados por una fuente de sonido en un recinto, con la respuesta de un filtro pasabanda de orden $2L$.

En base a esta última similitud propuesta, podemos considerar que la respuesta de un recinto se asemeja a la respuesta de un sistema formado por una asociación de filtros

pasabanda de segundo orden, sintonizados a la frecuencia ω_n correspondiente a las frecuencias de resonancia de los distintos modos considerados, y cuyas ganancias dependen de la posición del emisor y del receptor en el recinto y de la frecuencia de la señal aplicada, entre otros factores.

Es decir, el módulo de la presión $|P|$ para un modo determinado y para una posición determinada presentará un máximo cuando la frecuencia de la fuente de sonido se sitúe en la frecuencia de resonancia del modo, tal como muestra la figura 4.1.

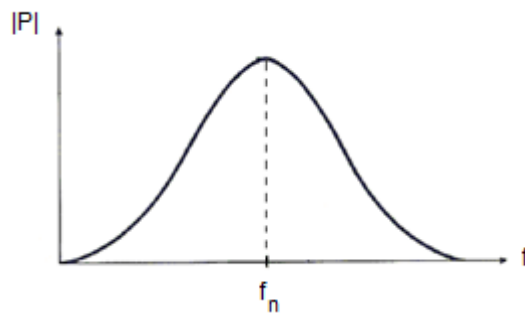


Fig. 4.1. Respuesta en frecuencia del módulo de la presión para un modo en una posición determinada

En base a este comportamiento descrito, La expresión de la RTF que proponemos para nuestro sistema de localización presenta una estructura similar a la de la RTF propuesta por Gustaffson et al. en [GUS00], pero reducida a un único modo n , y viene dada por la expresión (4.1):

$$H(s, r_m) = \frac{P_m(s, r_m)}{P_s(s)} = \frac{K_n(r_m)\psi_n(r_m)s}{s^2 + 2\xi_n\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.1)$$

Siendo ξ_n y ω_n el coeficiente de amortiguamiento y la frecuencia de resonancia del modo n considerado respectivamente, y siendo $K_n(r_m)$ una función que modelizará las variaciones espaciales que se producen en el factor de ganancia medio del modo y que denominaremos *función del factor de ganancia*. Por otro lado, si comparamos esta expresión con las expresiones (3.36) y (3.38) propuestas por otros autores, podemos observar que no aparece la autofunción correspondiente a la posición de la fuente de sonido, hecho que justificaremos a continuación al detallar la definición de nuestra RTF.

Para definir nuestro modelo podríamos haber considerado la respuesta acústica formada por el sumatorio de las respuestas de todos los modos que consideraremos inicialmente, y que seleccionaremos en un proceso de filtrado que detallaremos más adelante, y buscar qué combinación de modos proporcionan una respuesta más aproximada a la presión acústica de la señal recibida por el robot en cada posición analizada.

El problema de esta solución es el elevado tiempo de computación que se requeriría para el análisis de todas las combinaciones posibles, aunque hayamos limitado el número de modos en el proceso de filtrado, y la difícil estimación teórica de la energía contenida en cada

modo, y por tanto, de su factor de ganancia. Por ello hemos preferido trabajar con un único modo principal, en el que intentaremos reflejar la interacción de los distintos modos a través del parámetro correspondiente al factor de ganancia del modo principal, modelizando sus variaciones a través de la función del factor de ganancia que permita que nuestro modelo describa con la suficiente exactitud la respuesta acústica del recinto en el margen de frecuencias considerado.

Trabajaremos con nuestra expresión en el dominio de la frecuencia en régimen estacionario ($s=j\omega$), modelizando la respuesta acústica que se produce en el campo del sonido reverberado un cierto intervalo de tiempo después de la puesta en marcha de la máquina que genere el sonido en el recinto.

Para la determinación del modo que utilizaremos para definir la respuesta acústica del recinto y de su función del factor de ganancia $K_n(r_m)$ asociada partiremos de la expresión siguiente:

$$H(s, r_m) = \frac{P_m(s, r_m)}{P_s(s)} = \sum_{n=1}^N \frac{\overline{K}_n \psi_n(r_m) s}{s^2 + 2\xi_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.2)$$

Donde N es el número de modos que seleccionaremos en un proceso de filtrado de tipo pasabanda que describiremos con detalle en el próximo apartado, y donde consideraremos inicialmente que la función del factor de ganancia adopta un valor \overline{K}_n constante para cada modo, que definiremos en nuestro modelo para cada modo en particular que consideremos, y lo denominaremos *factor de ganancia medio* del modo.

Dado que la mayoría de las plantas industriales y los recintos cerrados objeto de nuestro estudio presentan una forma muy próxima a la de un recinto rectangular ideal, las autofunciones, que vienen definidas en las coordenadas de la fuente de sonido y las del micrófono las podemos expresar de una forma simplificada, suponiendo que el coeficiente de absorción de los materiales que forman sus límites es pequeño, según las siguientes expresiones ya presentadas anteriormente en (3.37), y definidas por la tripleta de valores (n_x, n_y, n_z) del modo n , donde $n_x, n_y, n_z \in N$ y donde (x_s, y_s, z_s) y (x_m, y_m, z_m) son las coordenadas cartesianas de la posición de la fuente de sonido y la posición del receptor de sonido, en nuestro caso el robot, respectivamente:

$$\begin{aligned} \psi_n(x_s, y_s, z_s) &= \cos \frac{n_x \pi x_s}{L_x} \cos \frac{n_y \pi y_s}{L_y} \cos \frac{n_z \pi z_s}{L_z} \\ \psi_n(x_m, y_m, z_m) &= \cos \frac{n_x \pi x_m}{L_x} \cos \frac{n_y \pi y_m}{L_y} \cos \frac{n_z \pi z_m}{L_z} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Si consideramos que en nuestra aplicación, la posición de la fuente de sonido es fija, el valor de la autofunción $\psi_n(r_s)$ es una constante que incluiremos en el cálculo del valor del factor de ganancia medio del modo.

Como señala Kuttruff en [KUT09], la presión sonora en un determinado punto de un recinto en el que actúa una fuente monofrecuencial es el resultado de la interacción de distintos modos con la particularidad de que presentan una distribución aleatoria de sus fases.

Para ilustrar este efecto se puede establecer una analogía con el aspecto que presentaría un diagrama vectorial, en el que el vector correspondiente a la presión resultante es el vector suma de todas sus componentes. Las dificultades que se pueden plantear para cuantificar los desfases y la contribución de cada modo en la presión resultante son evidentes.

Para disminuir el grado de complejidad de nuestro modelo nos situaremos en el rango de las bajas frecuencias, en el que el número de modos que intervienen en la propagación del sonido no es tan elevado, y en el que además reduciremos el número de modos a considerar mediante un filtrado de las señales, como hemos señalado anteriormente, por lo que tendremos más probabilidades de encontrar alguna componente del diagrama vectorial correspondiente a un determinado modo, que en las distintas posiciones en el recinto presente un valor más aproximado a la componente vectorial resultante que el resto de las componentes.

Este modo es el que adoptaremos como principal en nuestro modelo, como veremos posteriormente, y será el que utilizaremos como base para modelizar la presión resultante en los distintos puntos del recinto.

Para ello, determinaremos el valor del factor de ganancia medio $\overline{K_n}$ considerando aisladamente cada modo del conjunto de los modos que son excitados por la fuente de sonido definidos por la expresión (4.2), y adoptaremos el modo que mejor aproxime la presión resultante a la respuesta acústica del recinto, y que denominaremos modo principal, quedando el sumatorio de la expresión (4.2) reducido a un único término:

$$H(s, r_m) = \frac{P_m(s, r_m)}{P_s(s)} = \frac{\overline{K_n} \psi_n(r_m) s}{s^2 + 2\xi_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.4)$$

Como veremos, para localizar este modo realizaremos una comparación entre los valores de la ganancia experimental en las posiciones de unas muestras uniformemente repartidas en el recinto y los calculados teóricamente para los distintos modos, adoptando como modo principal el modo que presente un error cuadrático medio (MSE) menor entre dichos valores.

No obstante debemos tener en cuenta que existirán posiciones en el recinto donde la presión resultante se aleje de la presión del modo que hemos adoptado como principal, y este efecto quedará modelizado como vemos en la expresión (4.1) de nuestra RTF a través de la función del factor de ganancia $K_n(r_m)$. Esta función además recogerá otras fuentes de incertidumbre que afectan directamente a nuestro modelo, como hemos señalado anteriormente, como por ejemplo la incertidumbre debida a que las soluciones que hemos adoptado son las correspondientes a un recinto rectangular ideal, sin obstáculos y con paredes idealmente rígidas y perfectamente perpendiculares, y el grado de acercamiento a estas condiciones ideales en un recinto real pueden alejarse y diferir mucho de un recinto a otro.

En la primera aproximación a la RTF que define nuestro modelo, calcularemos el valor medio del factor de ganancia $\overline{K_n}$ para cada modo basándonos en la convergencia de las soluciones proporcionadas por el modelo estadístico y por el modelo ondulatorio para un

margen de frecuencias determinado, como analizaremos con profundidad también en las próximas secciones.

Entre las causas que producen que el factor de ganancia medio del modo principal \overline{K}_n no adopte un valor constante se encuentra la ya comentada de que, aunque trabajemos con un número reducido de modos, en algunos puntos del recinto la resultante de la presión se puede establecer por la contribución de varios modos que estén excitados en la misma proporción, y por tanto dicha resultante se aleje del valor que adopta la componente del modo principal que hemos seleccionado.

Sin embargo, existen otras causas que provocan que el factor de ganancia medio \overline{K}_n del modo principal no adopte un valor constante, si consideramos que utilizaremos para su determinación las soluciones aportadas por el modelo estadístico, en el que se supone el establecimiento de un campo sonoro difuso en que las ondas se propagan por igual en todas direcciones, suponiendo reflexiones especulares, y no contempla las variaciones de su valor medio debidas a la distribución no uniforme de las superficies absorbentes de los materiales que encontramos en los recintos reales.

Nuestro modelo presenta la estructura de un *grey-box model*, en el que la mayoría de sus parámetros se obtendrán a partir de expresiones basadas en la descripción del comportamiento físico de la propagación del sonido en un recinto, y en que requeriremos para efectuar su descripción final de una medida experimental de la ganancia en unas pocas posiciones determinadas o muestras etiquetadas del recinto.

El intercambio de información que requeriremos entre el modelo teórico y las medidas experimentales de la ganancia en las posiciones de las muestras etiquetadas será necesario para efectuar la selección del modo principal y para realizar una estimación de la incertidumbre de algunos de sus parámetros, como veremos posteriormente.

A modo de resumen la secuencia que seguiremos para el establecimiento del modelo será la siguiente:

- 1) Selección de un número de modos reducido mediante el filtrado de la señal emitida por la fuente de sonido y las señales captadas en las posiciones de unas muestras etiquetadas del recinto.
- 2) Determinación del factor de ganancia medio \overline{K}_n de cada modo tomado aisladamente del conjunto de los modos que son excitados por la fuente de sonido definidos por la expresión (4.2):

$$H(s, r_m) = \frac{P_m(s, r_m)}{P_s(s)} = \sum_{n=1}^N \frac{\overline{K}_n \psi_n(r_m) s}{s^2 + 2\xi_n \omega_n s + \omega_n^2}$$

- 3) Selección del modo principal a partir de los resultados obtenidos con este modelo.
- 4) Determinación de la función del factor de ganancia $K_n(r_m)$ del modo principal que permitirá la definición final de nuestra función de transferencia definida en (4.1):

$$H(s, r_m) = \frac{P_m(s, r_m)}{P_s(s)} = \frac{K_n(r_m)\psi_n(r_m)s}{s^2 + 2\xi_n\omega_n s + \omega_n^2}$$

Finalmente señalar que una importante ventaja que obtendremos al trabajar con funciones de transferencia es que la sensibilidad de la cadena de adquisición de la señal formada por el conjunto del micrófono y del amplificador electrónico no afectarán al cálculo de la ganancia, dado que afectará por igual a la presión captada por el micrófono en las distintas posiciones y a la presión de la señal emitida por la fuente de sonido, ya que utilizaremos el mismo tipo de micrófono y el mismo tipo de amplificador.

4.2. Acotación del orden del modelo: filtrado.

En este apartado pasaremos a describir el proceso de filtrado al que someteremos a la señal emitida por la fuente de sonido y a las señales captadas en las distintas posiciones del robot, con objeto de simplificar el número de modos a considerar en la definición de nuestro modelo.

4.2.1. Frecuencia de Schroeder.

En los modelos estadísticos, como veremos más adelante, se supone que después de un cierto número de reflexiones en el que alcanzamos el régimen permanente un cierto tiempo después de la puesta en marcha de la fuente de sonido, el campo sonoro en el recinto se ha hecho difuso, es decir:

- Las ondas reflejadas se propagan en todas las direcciones con igual probabilidad.
- La distribución de la energía es uniforme, independientemente de la posición que analicemos en el recinto.

Por tanto, el campo sonoro creado no es direccional, siendo la distribución de la energía en el recinto homogénea e isótropa en cualquier punto y en cualquier instante.

Si consideramos el rango de frecuencias bajas, las frecuencias de resonancia de los modos normales presentan una separación apreciable, tal como muestra la figura 4.2 en la que se representa el módulo de la presión $|P|$ en función de la frecuencia para una posición determinada, y este hecho provoca que en ese rango de frecuencias nos alejemos de las condiciones ideales necesarias para el establecimiento de un campo sonoro difuso ideal.

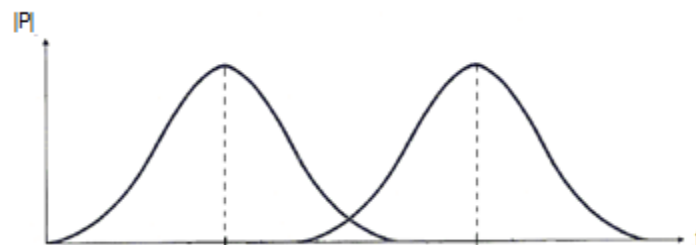


Fig. 4.2. Distribución de modos normales a frecuencias bajas

Por el contrario, en el rango de frecuencias altas, las frecuencias de resonancia de los modos se encuentran tan próximas que se puede considerar que se produce una superposición de los modos, y podemos hablar de condiciones más cercanas al establecimiento de un campo sonoro difuso ideal como el propuesto por los modelos estadísticos, tal como muestra la figura 4.3

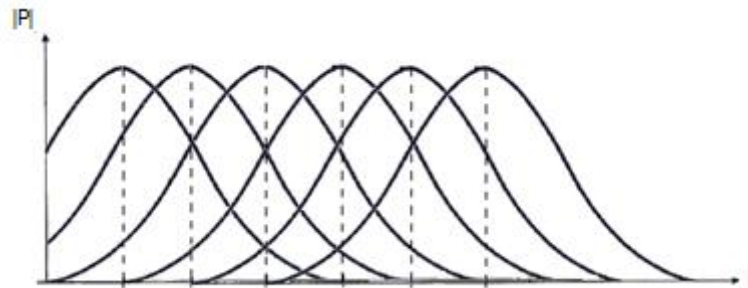


Fig. 4.3. Distribución de modos normales a frecuencias altas

La frecuencia de cruce o frecuencia de Schroeder [SCH96], que denominaremos f_c marca la transición entre la zona de resonancias individuales o de los modos normales, donde los modos se encuentran muy separados y presentan amplitudes muy significativas, y la zona de aparición de múltiples modos superpuestos que presentan amplitudes menores.

A partir de esta frecuencia de cruce al menos tres modos tienen una frecuencia de resonancia comprendida dentro del ancho de banda del modo considerado, y existen como mínimo 10 modos por tercio de octava.

Inicialmente Schroeder y Kuttruf propusieron un valor mayor de la frecuencia de cruce, definiéndola como aquella frecuencia a partir de la cual se producía un solapamiento de diez modos como mínimo, pero después de analizar un mayor número de datos experimentales, Schroeder en 1962 propuso el criterio anterior como una mejor aproximación.

El ancho de banda definido a la potencia mitad de un modo viene dado por la expresión:

$$BW = \frac{\ln 10^6}{2\pi T_r} = \frac{2,2}{T_r} \quad (4.5)$$

Donde T_r es el tiempo de reverberación del recinto, que definiremos posteriormente de una forma más detallada.

El ancho de banda BW necesario para contener un cierto número de modos ΔN viene dado por la siguiente expresión que deriva de la expresión (3.31) ya presentada anteriormente, siendo f la frecuencia central de la región considerada del espectro:

$$BW = \frac{c^3}{4\pi V f^2} \Delta N \quad (4.6)$$

Si tomamos un mínimo de 3 modos superpuestos dentro de ese ancho de banda, y llamamos f_c a la frecuencia a la que se cumple esta condición:

$$BW = 3 \frac{c^3}{4\pi V f_c^2} \quad (4.7)$$

Si igualamos la expresión anterior con la expresión (4.5)

$$\frac{2,2}{T_r} = 3 \frac{c^3}{4\pi V f_c^2} \quad (4.8)$$

Obtenemos la expresión que nos permite calcular teóricamente la frecuencia de cruce a partir del tiempo de reverberación del recinto y de su volumen:

$$f_c = \sqrt{\frac{3c^3 T_r}{8,8\pi V}} \quad (4.9)$$

Tomando la velocidad del sonido a una temperatura ambiente próxima a los 20 °C, la expresión aproximada de la frecuencia de cruce viene dada por la conocida expresión:

$$f_c \approx 2000 \sqrt{\frac{T_r}{V}} \quad (4.10)$$

4.2.2. Objetivo del filtrado.

Dado que nuestro objetivo no es obtener un modelo completo de la respuesta acústica del recinto si no que únicamente nos interesa la respuesta de la planta a la fuente de sonido particular que actúe en el mismo, con el objetivo principal de localizar la posición del robot a partir de la señal acústica captada, no será necesario considerar todos los modos de propagación posibles del recinto y simplificaremos el problema para esta aplicación específica sin necesidad de trabajar con modelos de orden elevado.

La zona de resonancias individuales, situada por debajo de la frecuencia de cruce, se modeliza muy bien a través del modelo ondulatorio, que tiene la ventaja de presentar una gran sensibilidad a la posición del receptor acústico en el recinto, tal como muestran las autofunciones anteriormente definidas, pero presenta la desventaja de que sus soluciones se establecen para recintos con formas regulares y con condiciones bastante ideales que pocas veces encontramos en la práctica, tal como hemos comentado también anteriormente.

En la zona de superposición modal, situada por encima de la frecuencia de cruce, son muy utilizados en la práctica los modelos estadísticos que suponen el establecimiento de un campo sonoro difuso, y que para nuestra aplicación presentan el problema de que sus soluciones no tienen sensibilidad respecto a la posición del receptor acústico en el campo reverberado, pero que presentan la ventaja de facilitar, desde un punto de vista práctico, el estudio de la respuesta teórica acústica de los recintos. Estos modelos son ampliamente utilizados en la acústica arquitectónica y su aplicación se regula a través de diferentes normativas nacionales e internacionales como hemos señalado.

En la figura 4.4 se muestra la evolución del nivel de presión sonora que esperamos en función de la frecuencia en un recinto, basada en el trabajo realizado por Kherzy et al. en

[KHE12] y en ella se indica la zona de resonancias individuales, situada por debajo de la frecuencia de cruce, y la zona de superposición modal, situada por encima de la frecuencia de cruce, de un recinto típico. Se señala también en la figura la zona situada a partir de una frecuencia cuatro veces superior a la frecuencia de cruce en la que las reflexiones que se producen en la mayoría de los límites y objetos del recinto son de tipo especular.

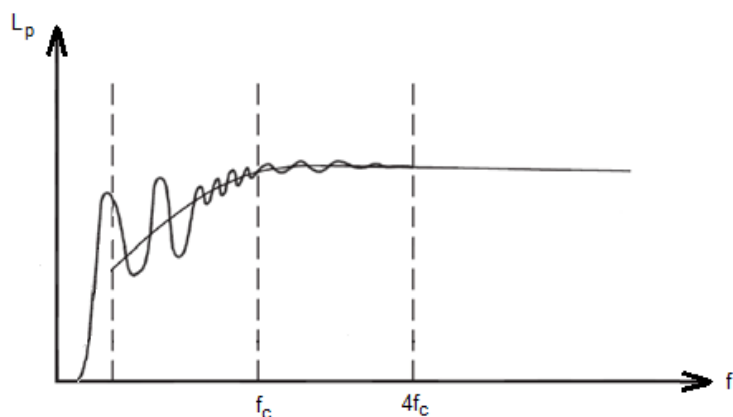


Fig. 4.4. Distribución de las zonas de resonancias individuales y de superposición modal

En las proximidades de la frecuencia de cruce podemos admitir como hipótesis de trabajo, que existirá un cierto grado de convergencia entre las soluciones que proporcionan los modelos estadísticos y las soluciones que proporciona el modelo ondulatorio, con objeto de poder establecer nuestra RTF de una forma eficiente desde el punto de vista de su aplicación práctica, para poder implementar nuestro sistema de localización.

El espectro sonoro de la señal que emiten las máquinas rotativas típicas presentes en las plantas industriales es muy rico en componentes de baja frecuencia, como ya hemos comentado, en la figura 4.5 podemos ver como ejemplo la señal discretizada correspondiente a la presión captada por el micrófono en las proximidades de una cámara climática que se utiliza como fuente de sonido en el recinto de experimentación, y en la figura 4.6 se muestra el espectro correspondiente de la señal, en el que se indica el valor eficaz y la frecuencia de las diferentes componentes frecuenciales, y donde podemos observar que las componentes del espectro con una amplitud significativa se sitúan mayoritariamente en el rango de las bajas frecuencias.

Por otro lado, considerando que el sistema que tratamos es un sistema lineal, podemos plantear el realizar el filtrado de la señal que emite la fuente de sonido y aplicar el mismo filtrado a la señal que recibe el micrófono del robot sin afectar la relación entrada-salida del sistema acústico que se establece en la banda de paso del filtro, y sin perder la información que necesitamos de la respuesta acústica del recinto para realizar la localización acústica del robot mediante nuestro sistema.

El objeto de realizar este filtrado es el de situarnos alrededor de unas frecuencias próximas a la frecuencia de cruce, como hemos señalado, a través de la aplicación de un filtro pasabanda, que seleccionará la componente del espectro de la señal emitida por la fuente de

sonido que se sitúe en ese margen, y donde podamos contemplar la convergencia de las soluciones proporcionadas por el modelo ondulatorio y por los modelos estadísticos.

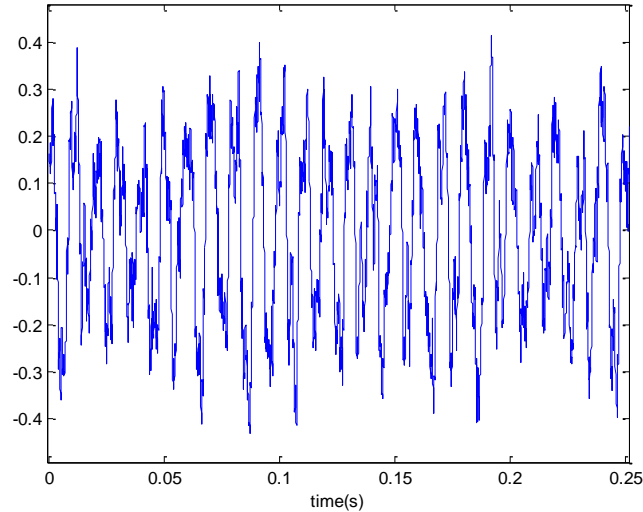


Figura 4.5. Señal emitida por la cámara climática.

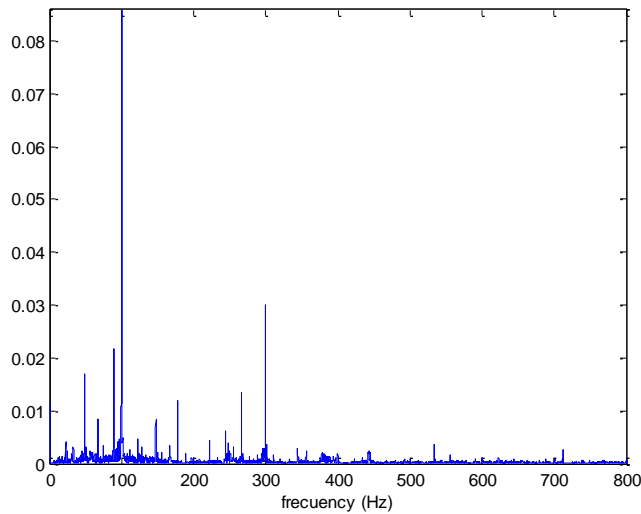


Figura 4.6. Espectro de la señal emitida por la cámara climática.

La realización de este filtrado de las señales nos permitirá considerar uno o unos pocos modos del conjunto de modos excitados por las diferentes componentes frecuenciales del espectro de la señal acústica emitida por la fuente de sonido, con el fin de simplificar nuestro modelo a aplicar a nuestro sistema de localización. Estudios sobre la relación entre el ancho de banda del filtro y la disminución de la complejidad de los modelos han sido realizados por [MAN14] como veremos posteriormente.

Por tanto, para implementar nuestro sistema, el primer paso será seleccionar el rango de frecuencias de interés a partir de un análisis previo del espectro de la señal de audio emitida por la fuente de sonido. La componente frecuencial del espectro que presente una potencia acústica significativa y que se sitúe a una frecuencia próxima a la frecuencia de cruce será la que condicionará la zona del espectro en la que apliquemos nuestro filtrado de tipo pasabanda.

Finalmente señalar que la realización de este tipo de filtro presentará la ventaja añadida de que en el caso de que tengamos en el recinto la presencia de algún ruido de tipo estacionario, el filtro atenuará de forma significativa todas las componentes que se sitúen fuera del ancho de banda del filtro.

4.3. Cálculo teórico de la ganancia media del recinto.

Para la determinación de la expresión que nos permitirá realizar el cálculo teórico de la ganancia media del recinto nos basaremos inicialmente en el modelo estadístico, que aunque simplifica el comportamiento real del sonido en un recinto, proporciona resultados válidos para muchas aplicaciones y en el desarrollo de la tesis veremos su gran utilidad para complementar nuestro modelo, facilitando en gran medida su aplicación práctica.

A través de numerosos estudios experimentales, Wallace Clement Sabine, como podemos ver en [SAB64] estableció una relación empírica entre las características de reverberación de un recinto, sus dimensiones y la cantidad de material absorbente que contiene, definiendo el tiempo de reverberación como el tiempo requerido para que la presión acústica se atenúe 60 dB una vez ha cesado la emisión de la fuente sonora. La ecuación de Sabine viene dada por la conocida expresión siguiente:

$$T_r = \frac{55,2 \cdot V}{A \cdot c_0} \quad (4.11)$$

Si consideramos la velocidad del sonido c_0 de 343 m/s a una temperatura de 20 °C, la expresión toma una forma más comúnmente utilizada:

$$T_r = \frac{0,161 \cdot V}{A} \quad (4.12)$$

Esta expresión relaciona el tiempo de reverberación T_r de un recinto, con su volumen V y A es un parámetro que define la absorción sonora total del recinto, y viene dada en metros cuadrados (*Sabines métricos*). Sabine adoptó la suposición de que la absorción sonora total es la suma de las absorciones A_i de las superficies individuales, como indica la expresión (4.13):

$$A = \sum_i A_i = \sum_i S_i a_i \quad (4.13)$$

Donde a_i es el coeficiente de absorción de la superficie i -ésima. Se define el coeficiente de absorción medio como:

$$\bar{a} = \frac{1}{S} \sum_i S_i a_i \quad (4.14)$$

Existen tablas con los coeficientes de absorción de los distintos materiales más usuales, determinados experimentalmente en cámaras reverberantes, que son cámaras en cuyo interior se establece un campo sonoro que se aproxima a un campo sonoro difuso ideal, con objeto de que sobre el material sometido a estudio el número de ángulos de incidencia de las ondas sonoras que inciden sobre él sea el mayor posible. En estas cámaras se evitan los paralelismos de cualquier superficie con las demás para evitar de esta forma la aparición de modos propios de gran intensidad, y se utilizan difusores repartidos de forma aleatoria por el recinto.

Los coeficientes de difusión de los materiales están definidos a diferentes frecuencias separadas en bandas de octava, que proporcionan la suficiente exactitud muchas aplicaciones de ingeniería y de arquitectura.

La expresión (4.11) propone un valor del tiempo de reverberación constante en todo el recinto ya que supone que en el mismo se establece un campo sonoro difuso ideal. Existen varias causas que se oponen a la generación de un campo difuso ideal en un recinto o en una planta industrial, y entre ellas podemos señalar:

- Formas no ideales del techo, como por ejemplo la que presenta un techo abovedado y que puede producir una distribución no uniforme de la energía, y que juega en contra de la generación de un campo sonoro difuso ideal.
- Posible presencia de grandes ventanales de ventilación en el recinto, que presentan un coeficiente de absorción unitario y también provocan una distribución de la energía no uniforme en sus proximidades.
- Variación en la distribución energética del campo reverberado, según nos situemos en la proximidad o en la lejanía de los límites del recinto.
- La distribución no uniforme de los obstáculos, que pueden presentar diferentes coeficientes de absorción o cuyas dimensiones sean del mismo orden o de un orden superior al de la longitud de onda de la señal, que provocan zonas importantes de sombra acústica.

En la práctica, para la determinación experimental del tiempo de reverberación de un recinto, se realiza la medida del tiempo de reverberación en diferentes puntos del mismo, y se realiza un promediado espacial de los tiempos medidos en las distintas posiciones, con objeto de determinar el tiempo de reverberación que lo caracteriza.

Las normas ISO 3382 [ISO09] definen las condiciones de medida comúnmente adoptadas, estableciendo que se debe utilizar una fuente omnidireccional y que se harán como mínimo 3 mediciones en 3 posiciones fijas distribuidas uniformemente a lo largo de todo el recinto, y que estén separadas como mínimo una distancia equivalente a media longitud de onda, con objeto de asegurar su independencia estadística. La distancia mínima de una posición del micrófono a cualquier superficie reflectante (incluyendo el suelo), debe ser como mínimo de 1/4 de la longitud de onda. Por otro lado, la fuente de sonido debe generar un nivel de presión sonora situado al menos 45 dB por encima del nivel de ruido de fondo en la banda de frecuencia considerada.

El establecimiento de estas y otras normas queda justificada por la importancia que presenta este parámetro para definir la calidad acústica de una sala, y su predicción es una herramienta de gran importancia en la acústica arquitectónica.

Es importante remarcar que la ecuación de Sabine se puede completar teniendo en cuenta la absorción del sonido en el medio, que disminuye el tiempo de reverberación, según la expresión (4.15):

$$T_r = \frac{0,161 \cdot V}{A + 4mV} \quad (4.15)$$

Siendo m una constante de atenuación de energía debida al medio de propagación, en nuestro caso el aire, y expresada en m^{-1} . La importancia de la absorción del aire puede ser importante a frecuencias elevadas y en recintos de gran volumen en que se presenten humedades relativas bajas. Para humedades relativas h entre el 20 % y el 70 % y frecuencias entre 1,5 y 10 kHz podemos utilizar para el cálculo del coeficiente m la expresión propuesta por Kinsler en [KIN95]:

$$m = 5,5 \cdot 10^{-4} (50/h)(f/1000)^{1.7} \quad (4.16)$$

En que f es la frecuencia de la señal acústica.

A partir de la fórmula propuesta por Sabine para determinar el tiempo de reverberación de un recinto, han ido apareciendo nuevos modelos estadísticos que también se aplican en la industria, y que contemplan diferentes aproximaciones y condiciones para su cálculo, como los modelos de Eyring [EYR30], Millington [MIL32], Kuttruff [KUT09], Arau-Puchades [ARA88] y Fitzroy [FIT59] entre otros, aunque la fórmula de Sabine sigue siendo ampliamente utilizada y es la que utilizaremos para determinar la expresión de la ganancia media del recinto.

Por otro lado, tal como hemos señalado anteriormente, diversos autores como Kinsler en [KIN95] establecen en base a la similitud de la respuesta acústica impulsional de un recinto con la respuesta impulsional de un sistema de segundo orden como la que presenta un oscilador mecánico subamortiguado, la expresión que proporciona la evolución de la presión, que viene dada por:

$$p(t) = P_M e^{-t/\tau_E} \cos(\omega_d t + \theta) \quad (4.17)$$

Siendo ω_d la frecuencia amortiguada del sistema, definida por:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi_n^2} \quad (4.18)$$

Expresión en la que ω_n es la frecuencia natural no amortiguada, y ξ_n es el coeficiente de amortiguamiento, que consideraremos en este caso el correspondiente a un determinado modo de propagación del recinto. La relación entre el coeficiente de amortiguamiento y la constante de tiempo τ_E viene dada por:

$$\tau_E = \frac{1}{\xi_n \omega_n} \quad (4.19)$$

4. Modelo teórico de función de transferencia

Siendo el producto $\xi_n \omega_n$ la constante de amortiguamiento σ del sistema. Si consideramos ahora la definición del tiempo de reverberación como el intervalo de tiempo transcurrido para que el nivel de presión sonora decrezca 60 dB a partir de la desconexión de la fuente, podemos expresar el coeficiente de amortiguamiento en función del tiempo de reverberación como:

$$\xi_n = \frac{13,81}{\omega_n T_r} \quad (4.20)$$

Es decir, un modo excitado que provoca un tiempo de reverberación alto en el recinto, viene asociado a una respuesta acústica con un bajo coeficiente de amortiguamiento, presentando su respuesta frecuencial un pico de resonancia acentuado.

Como ya hemos comentado, para el estudio del comportamiento de una fuente que emite un sonido continuo en un recinto se diferencian diferentes zonas del espacio en función de la distancia del punto considerado a la fuente de sonido, que son, de forma genérica, la zona de campo próximo y la zona de campo lejano. A su vez, el campo lejano se divide en dos zonas, que son el campo sonoro directo y el campo reverberante, el campo directo es el que produciría la fuente al aire libre.

La expresión de la potencia sonora producida por una fuente puntual omnidireccional en el campo directo la podemos encontrar en la bibliografía especializada, como en [KIN95] y viene dada por la expresión (4.21):

$$P_d^2 = \frac{\rho c W_s}{4\pi r^2} \quad (4.21)$$

Siendo P_d la presión acústica eficaz en el campo directo a una cierta distancia radial r expresada en metros del centro efectivo de la fuente sonora, ρ la densidad del aire expresada en (Kg/m^3), c la velocidad de propagación del sonido expresada en (m/s) y W_s la potencia acústica radiada por la fuente sonora.

De la misma forma, la potencia sonora en el campo reverberante en régimen estacionario, viene dada por la expresión:

$$P_r^2 = \frac{4\rho c W_s}{A} \quad (4.22)$$

La potencia sonora total vendrá dada por la suma de ambas potencias como:

$$P^2 = \rho c W_s \left(\frac{1}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right) \quad (4.23)$$

Esta expresión muestra que para posiciones cercanas a la fuente, es decir, en las que se cumpla que:

$$4\pi r^2 < A/4 \quad (4.24)$$

Es decir, cuando la distancia r del receptor acústico a la fuente de sonido cumpla la condición:

$$r < \sqrt{\frac{A}{16\pi}} \quad (4.25)$$

La influencia del recinto empezará a tener poca importancia en los niveles de la presión acústica captada. En nuestros modelos fijaremos la atención en el campo reverberante, que ocupa un volumen mucho mayor que el campo directo para las dimensiones usuales de los recintos que consideraremos, como por ejemplo las plantas industriales, y en el que se desplazará principalmente el robot.

En el modelo ondulatorio de la RTF que hemos propuesto y con objeto de simplificar la determinación teórica de sus parámetros y facilitar su aplicación práctica en nuestro sistema de localización, nos serviremos del modelo estadístico, considerando que en las condiciones en que lo aplicaremos, comentadas anteriormente, el módulo de nuestra RTF promediado espacialmente puede aproximarse al valor del módulo obtenido a través del modelo estadístico

Con objeto de determinar el módulo de la RTF obtenido con el modelo estadístico, consideraremos la potencia sonora en el campo reverberante dada por la expresión (4.22), y la expresión del tiempo de reverberación definida en (4.11), con lo que podremos expresar la potencia sonora en función del tiempo de reverberación como:

$$P_r^2 = \frac{T_r \rho_o c_o^2 W_s}{13,8 \cdot V} \quad (4.26)$$

Si consideramos que la potencia que emite una fuente de sonido puntual se puede determinar a partir de la presión captada en el campo directo a una distancia r de la fuente, que denominaremos $P(r)$, como hemos visto en la expresión (4.21), podemos determinar la potencia radiada con la siguiente expresión:

$$W_s = \frac{4\pi r^2}{\rho c} P(r)^2 \quad (4.27)$$

Es importante considerar que la potencia de la fuente tiene un valor constante que no depende de la distancia r , no siendo así para la presión captada que disminuye al alejarnos de la fuente.

Sustituyendo la expresión (4.27) en la expresión (4.26) obtenemos:

$$P_r = P(r) \sqrt{\frac{T_r c 4\pi r^2}{13,8V}} \quad (4.28)$$

Esta expresión, la podemos escribir en forma de función de transferencia de presión acústica, relacionando la presión acústica captada por el receptor acústico con la generada por la fuente de sonido, según la expresión:

$$\frac{P_r}{P_s} = \frac{P(r)}{P_s} \sqrt{\frac{T_r c 4\pi r^2}{13,8V}} \quad (4.29)$$

Al cociente entre el valor de la presión captada en el campo directo generado por la fuente de sonido a una cierta distancia r de la fuente y la presión generada por la propia fuente de sonido lo denominaremos constante de la fuente de sonido:

$$K_f = \frac{P(r)}{P_s} \quad (4.30)$$

Dado que la presión medida a una cierta distancia de la fuente será igual o menor que la presión generada por la propia fuente, el valor máximo que teóricamente podrá adoptar esta constante será la unidad para valores de r muy próximos a la fuente.

La determinación de esta constante presenta grandes dificultades debidas a que la medida de la presión generada por la fuente de sonido P_s se debe efectuar dentro de los límites del campo próximo de la fuente.

El campo próximo presenta la particularidad de ser fuertemente direccional y en él la presión y la velocidad de las partículas no están en fase, presentándose por tanto efectos de almacenamiento de energía, además de presentar alinealidades muy acusadas adicionales en la evolución de la atenuación del sonido en función de la distancia. Diversos autores remarcan que las medidas experimentales de la presión dentro del campo cercano no son aconsejables como ya hemos señalado.

Por tanto nos encontraremos con el mismo problema a la hora de calcular la ganancia experimental en las distintas posiciones del robot en el recinto, dado que está referida a la presión P_s generada por la fuente de sonido.

Para paliar estas dificultades y a efectos simplificativos adoptaremos un valor unitario para la constante de la fuente, estableciendo una función de transferencia de presión que nos relacionará la presión captada en el campo reverberado en las distintas posiciones del recinto con la presión captada a una cierta distancia de la fuente medida en el campo directo y fuera de los límites del campo cercano, tal como indica la expresión siguiente.

$$H(\omega, r_m) = \frac{P_m(r_m)}{P(r)} \quad (4.31)$$

La adopción de un valor unitario para la constante de la fuente equivale a decir que la presión se mantiene constante desde la posición de la fuente hasta el punto situado a una cierta distancia r de la fuente, donde efectuaremos la captación del sonido emitido por la misma, por lo que la aplicación del modelo no será válida para posiciones del recinto que se encuentren por debajo de esa distancia.

Por tanto, la expresión que proponemos finalmente para calcular el módulo de la función de transferencia acústica del recinto en base al modelo estadístico quedará finalmente definida como:

$$|\bar{H}(\omega, r_m)| = \left| \frac{P_m(r_m)}{P(r)} \right| = \sqrt{\frac{T_r c 4\pi r^2}{13,8V}} \quad (4.32)$$

La distancia r a la que efectuamos la medida de la presión radiada por la fuente de sonido se ha de situar dentro del campo directo pero lo suficientemente alejada de la fuente como para evitar una influencia excesiva del campo próximo generado por ella como hemos comentado. Su valor afectará directamente al valor de la ganancia teórica y a todos los valores de la ganancia experimental que se calculan tomando como referencia esta presión.

La relación entre nuestra RTF referida a la presión $P(r)$ respecto a la que habíamos definido inicialmente en la expresión (4.4) referida a P_s vendrá dada por:

$$H(s, r_m) = \frac{P_m(s, r_m)}{P_s(s)} = K_f \frac{P_m(s, r_m)}{P(s, r)} \quad (4.33)$$

Y como hemos tomado la simplificación de adoptar un valor de la constante K_f unitario admitiremos a efectos simplificativos la igualdad de ambas funciones de transferencia.

Esta simplificación queda justificada porque aunque nuestra RTF al estar referida a la presión captada a una cierta distancia r de la fuente, de un valor menor que la presión generada en la propia posición de la fuente de sonido, presentará una ganancia mayor que la RTF definida respecto a P_s , no obstante conservará el carácter ondulatorio proporcionado por la autofunción definida en las distintas posiciones del micrófono, como vemos en la expresión siguiente:

$$H(s, r_m) = \frac{P_m(s, r_m)}{P(s, r)} = \frac{1}{K_f} \left(\frac{K_n(r_m) \psi_n(r_m) s}{s^2 + 2\xi_n \omega_n s + \omega_n^2} \right) \quad (4.34)$$

Por lo que nuestra nueva RTF seguirá presentando la misma utilidad a la hora de modelizar las variaciones de la presión captada por el robot en función de las distintas posiciones que ocupe en el recinto.

Es de destacar finalmente, como hemos comentado anteriormente, el hecho de que el tiempo de reverberación teórico se calcula en base a los coeficientes de absorción de los distintos materiales presentes en el recinto, y definidos típicamente a las siguientes frecuencias separadas en bandas de octava: 63, 125, 250, 500, 1000, 2000 y 4000 Hz, por lo que la expresión (4.32) la aplicaremos considerando el valor de los coeficientes de absorción que presenten los objetos y los materiales que conformen los límites del recinto en las inmediaciones de la frecuencia de trabajo que hayamos seleccionado.

4.4. Cálculo teórico del factor de ganancia medio.

La primera aproximación al modelo que habíamos propuesto para nuestra RTF está definido para un cierto número de modos N del total de modos excitados por la fuente de sonido en el recinto, que obtenemos en el proceso de filtrado al efectuarlo alrededor de una componente frecuencial situada en las proximidades de la frecuencia de cruce vendrá dado por la expresión (4.2) vista anteriormente, ya que hemos adoptado un valor para la constante de la fuente de sonido K_f igual a la unidad:

$$H(s, r_m) = K_f \frac{P_m(s, r_m)}{P(s, r)} = \frac{P_m(s, r_m)}{P_s(s)} = \sum_{n=1}^N \frac{\bar{K}_n \psi_n(r_m) s}{s^2 + 2\xi_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.35)$$

El valor del módulo de la función de transferencia de la presión del modelo estadístico proporcionado por la expresión (4.32) se puede interpretar como el valor medio obtenido al promediar los valores de la presión captada en las diferentes posiciones del recinto, tal como proponen las diferentes normas utilizadas en la acústica arquitectónica para la determinación del tiempo de reverberación.

Las variaciones espaciales del valor de la presión acústica que encontramos en la práctica quedan muy bien reflejadas por el modelo ondulatorio, y serán el resultado de la interacción de los distintos modos que han sido excitados apreciablemente por la fuente de sonido en las distintas posiciones del recinto, como hemos señalado también en apartados anteriores.

Para el cálculo teórico del factor de ganancia medio de los modos considerados, necesario para definir nuestra RTF, nos basaremos en la hipótesis establecida referente a la convergencia de las soluciones proporcionadas por el modelo ondulatorio y por el modelo estadístico en las proximidades de la frecuencia de cruce o de Schroeder.

Para ello consideraremos en primer lugar la expresión del módulo de la respuesta frecuencial de la expresión (4.4), definido para una determinada posición del receptor acústico r_m , y para un determinado modo n , que viene dada por:

$$|H(\omega, r_m)| = \frac{\overline{K}_n \omega \psi_n(r_m)}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_n \omega_n \omega)^2}} \quad (4.36)$$

Siendo ω la frecuencia de la señal que emitiría una fuente de sonido monofrecuencial, o en nuestro caso, la correspondiente a la componente frecuencial del espectro de la señal emitida por la fuente de sonido y seleccionada en el proceso de filtrado, que presente una amplitud apreciable y se sitúe alrededor de la frecuencia de cruce.

Nos interesa ahora la expresión del valor medio del módulo de la presión para este modo considerado, que obtendríamos si promediáramos el valor del módulo de la presión calculado en las distintas posiciones correspondientes a las muestras etiquetadas del recinto, de forma similar a la que se realiza en el modelo estadístico para la determinación experimental del tiempo de reverberación, con objeto de poder igualar los resultados proporcionados por ambos modelos a partir de los resultados experimentales obtenidos en unas determinadas posiciones del recinto.

La expresión que obtendremos al promediar espacialmente los distintos valores de presión proporcionados por la expresión (4.36) para este modo n , vendrá dado por:

$$|\overline{H}(\omega, r_m)| = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\overline{K}_n \omega \psi_n(r_m)}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_n \omega_n \omega)^2}} \quad (4.37)$$

Siendo M el número de posiciones consideradas, que en nuestro caso serán las posiciones de las muestras etiquetadas que tomemos en el recinto.

Si tenemos en cuenta que que para un modo de propagación determinado los únicos términos que no presentarán un valor constante en las distintas posiciones en la expresión

anterior serán los correspondientes a la autofunción definida en las distintas coordenadas del micrófono, podemos poner la expresión (4.37) como:

$$|\bar{H}(\omega, r_m)| = \frac{\bar{K}_n \omega}{M \sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_n \omega_n \omega)^2}} \sum_{m=1}^M \psi_n(r_m) \quad (4.38)$$

Si igualamos la expresión anterior (4.38) correspondiente a la RTF propuesta que deriva del modelo ondulatorio, con la expresión (4.32) obtenida a partir del modelo estadístico:

$$\frac{\bar{K}_n \omega}{M \sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_n \omega_n \omega)^2}} \sum_{m=1}^M \psi_n(r_m) = \sqrt{\frac{T_r c 4\pi r^2}{13,8V}} \quad (4.39)$$

El valor promedio del factor de ganancia del modo considerado lo podremos calcular entonces con la siguiente expresión, para cada modo considerado, a partir del cálculo teórico del tiempo de reverberación del recinto:

$$\bar{K}_n = \frac{M \sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_n \omega_n \omega)^2} \sqrt{\frac{T_r c 4\pi r^2}{13,8V}}}{\omega \sum_{m=1}^M \psi_n(r_m)} \quad (4.40)$$

En la que el coeficiente de amortiguamiento asociado al modo vendrá determinado por la expresión (4.41) ya presentada anteriormente:

$$\xi_n(\omega_n) = \frac{13,81}{\omega_n T_r} \quad (4.41)$$

Y donde el tiempo de reverberación lo determinaremos mediante la ecuación de Sabine:

$$T_r = \frac{0,161V}{\sum_i S_i a_i} \quad (4.42)$$

La forma de determinar el número de muestras M y la ubicación de las distintas posiciones r_m a considerar para el cálculo de las autofunciones $\psi_n(r_m)$, será la misma que se aplica usualmente para la determinación empírica del tiempo de reverberación de los recintos, y que vienen inspiradas en las normas ISO 3382 [ISO09], repartiéndolas uniformemente por el recinto de experimentación, de forma que sean estadísticamente independientes.

Las expresiones (4.40), (4.41) y (4.42) nos permiten calcular los parámetros de los distintos modos que vienen definidos por en la expresión (4.2), y a partir de la definición propuesta de los distintos modos, buscaremos el modo de propagación que mejor aproxime las variaciones de la presión que se producen en el recinto, que definirá nuestro modo principal o más significativo, como hemos señalado anteriormente.

Esto modo seleccionado definirá un modelo LTI de la respuesta acústica de la presión en el recinto, y presentará un error apreciable en aquellas posiciones en las que la respuesta acústica resulte de la interacción de varios modos que sean excitados en la misma proporción

por la fuente de sonido, pudiendo considerar en estos casos que el factor de ganancia medio que presenta este modo principal se encuentra modulado por la acción del resto de modos involucrados en la respuesta acústica de la posición analizada.

Para reflejar este hecho y otras causas que hemos comentado anteriormente que provocan una variación en el factor de ganancia dejaremos de considerar un valor constante del factor de ganancia medio $\overline{K_n}$ para nuestro modelo y utilizaremos una función que nos refleje las variaciones de este factor, quedando entonces definida nuestra RTF para el modo principal adoptado finalmente por la expresión (4.1) ya presentada en apartados anteriores:

$$H(s, r_m) = \frac{P_m(s, r_m)}{P_s(s)} = \frac{K_n(r_m)\psi_n(r_m)s}{s^2 + 2\xi_n\omega_n s + \omega_n^2}$$

Por otro lado, al igual que ocurre con el tiempo de reverberación de un recinto, que es un factor importante en su caracterización, podemos proponer el contemplar un nuevo factor que podría servir para enriquecer la información relativa a su caracterización acústica, que sería el de la *ganancia media* del recinto.

Esta ganancia, que se puede calcular teóricamente a partir de las expresiones anteriores, se podría determinar también de forma experimental a partir de la medida de la presión emitida por una fuente de sonido estacionaria y la captada en las distintas posiciones de un micrófono en el campo reverberado. La determinación experimental de esta *ganancia media* nos permitiría obtener, de forma indirecta, el tiempo de reverberación experimental, al aplicar al resultado obtenido en la expresión (4.32), y podría servir para contrastar este resultado con el obtenido con las medidas típicas experimentales efectuadas para determinar el tiempo de reverberación, y pensamos que podría ser una aportación interesante de la tesis.

4.5. Función del factor de ganancia.

La función del factor de ganancia que proponemos debe cumplir las siguientes condiciones:

- Si consideramos el aspecto referente a la convergencia de las soluciones proporcionadas por el modelo ondulatorio con las proporcionadas por el modelo estadístico, la función del factor de ganancia debería proporcionar a nuestra RTF una respuesta de la presión sonora de tipo periódico, que no presente discontinuidades, y centrada sobre un valor medio constante proporcionado por el valor del factor de ganancia medio definido en las secciones anteriores, obtenido a partir del valor medio teórico proporcionado por el modelo estadístico.
- En una primera aproximación, en la que consideraremos los límites del recinto idealmente rígidos, la influencia de los distintos modos sobre el modo principal no afectará al hecho de que los máximos de la presión acústica se encuentren en las esquinas del recinto, ya que todos los modos teóricos cumplen esta condición.

Por otro lado, como veremos en capítulos posteriores, será en esta función donde modelizaremos las fuentes de incertidumbre que afectan a nuestro modelo.

Una función periódica que dota a nuestro modelo de estos requisitos, es una función similar a la propia función definida para la autofunción del modo principal que hemos adoptado, como pasaremos a comprobar a continuación, y que definimos como:

$$K_n(x_m, y_m, z_m) = \widehat{A}_n \psi_n(x_m, y_m, z_m) \quad (4.43)$$

Siendo \widehat{A}_n el valor máximo de la función y siendo x_m e y_m las coordenadas del micrófono del robot en el recinto y en la que la autofunción ψ_n vendrá definida, si la expresamos en coordenadas cartesianas, por la expresión (4.44)

$$\psi_n(x_m, y_m, z_m) = \cos \frac{n_x \pi x_m}{L_x} \cos \frac{n_y \pi y_m}{L_y} \cos \frac{n_z \pi z_m}{L_z} \quad (4.44)$$

Dado que la altura del micrófono es constante en todas las posiciones y si consideramos una altura del recinto media L_z constante, podemos escribir la expresión anterior de la forma:

$$\psi_n(x_m, y_m) = C' \cos \frac{n_x \pi x_m}{L_x} \cos \frac{n_y \pi y_m}{L_y} \quad (4.45)$$

La constante C' de la autofunción la podemos incluir en la expresión (4.43) de la función del factor de ganancia:

$$K_n(x_m, y_m) = \widehat{A}_n C' \left[\cos \frac{n_x \pi x_m}{L_x} \cos \frac{n_y \pi y_m}{L_y} \right] \quad (4.46)$$

Pudiendo escribir esta función, que dependerá de las coordenadas del micrófono (x_m, y_m) como:

$$K_n(x_m, y_m) = \widehat{K}_n \left[\cos \frac{n_x \pi x_m}{L_x} \cos \frac{n_y \pi y_m}{L_y} \right] \quad (4.47)$$

Siendo \widehat{K}_n el valor máximo de la función del factor de ganancia.

Si recordamos nuevamente la expresión (4.1) que define nuestro modelo:

$$H(s, r_m) = \frac{P_m(s, r_m)}{P_s(s)} = \frac{K_n(r_m) \psi_n(r_m) s}{s^2 + 2\xi_n \omega_n s + \omega_n^2}$$

El hecho de que esta función proporciona un valor de ganancia medio constante en nuestro modelo queda puesto fácilmente de manifiesto si adoptamos un modo principal de tipo axial o tangencial cuyo valor n_y sea nulo, ya que al realizar el producto de la función del factor de ganancia y la autofunción ψ_n , y aplicando la identidad trigonométrica de la equivalencia entre el producto y la suma de cosenos, obtenemos la expresión:

$$K_n(x_m) \psi_n(x_m) = \widehat{K}_n \left[\frac{1}{2} \cos \left(\frac{2n_x \pi x_m}{L_x} \right) + \frac{1}{2} \right] \quad (4.48)$$

Donde el valor medio de esta función producto tendría un valor constante que vendría dado por:

$$\overline{K_n} = \frac{\widehat{K_n}}{2} \quad (4.49)$$

Esta expresión nos permitirá calcular el valor máximo teórico de la función del factor de ganancia a partir del valor medio teórico obtenido con la expresión (4.40).

De forma similar podemos definir esta función producto para el caso de que adoptemos un modo principal axial con un valor de n_y no nulo, obteniendo una expresión similar a la (4.48) que nos relaciona el valor máximo de la función del factor de ganancia con el valor medio teórico.

En el caso más complejo en que el modo principal no sea un modo de tipo axial, y en que n_x y n_y sean distintos de cero, el producto de ambas funciones vendrá dada por la siguiente expresión, obtenida al aplicar la identidad trigonométrica de la equivalencia entre el producto y la suma de cosenos:

$$\begin{aligned} K_n(x_m, y_m)\psi_n(x_m, y_m) \\ = \widehat{K_n} \left[\frac{1}{8} \cos(2A + 2B) + \frac{1}{8} \cos(2A - 2B) + \frac{1}{2} \cos(2A) + \frac{1}{2} \cos(2B) \right. \\ \left. + \frac{1}{4} \right] \end{aligned} \quad (4.50)$$

Siendo:

$$A = \frac{n_x \pi x_m}{L_x} \quad (4.51)$$

$$B = \frac{n_y \pi y_m}{L_y} \quad (4.52)$$

$$\overline{K_n} = \frac{\widehat{K_n}}{4} \quad (4.53)$$

En este caso el valor medio del factor de ganancia se reduce a la mitad respecto al valor máximo que presenta un modo axial, hecho que concuerda con la consideración de que estos modos presentarán una amplitud menor, al reflejarse las ondas de presión modelizadas por ellos en las cuatro paredes del recinto.

CAPÍTULO 5: Modelos de identificación paramétricos

5.1. Introducción a los modelos paramétricos.

Como ya hemos comentado anteriormente, los modelos paramétricos son ampliamente utilizados debido a las ventajas que presentan, ya que aunque en algunos casos no presenten una relación directa con la interpretación física del proceso que modelizan, permiten abordar con éxito muchas de las problemáticas que se presentan en la modelización de sistemas.

Un esquema que describe la estructura general de los modelos lineales paramétricos es el que muestra la figura 5.1, en el que la salida $y(t)$ del sistema se ve afectada tanto por los valores de la entrada $u(t)$, como por los valores de $e(t)$, que es una señal de ruido. La función de transferencia $G(q)$ modeliza la dinámica del sistema o parte determinista del sistema, y la función de transferencia $H(q)$ modeliza las perturbaciones o parte estocástica del sistema.

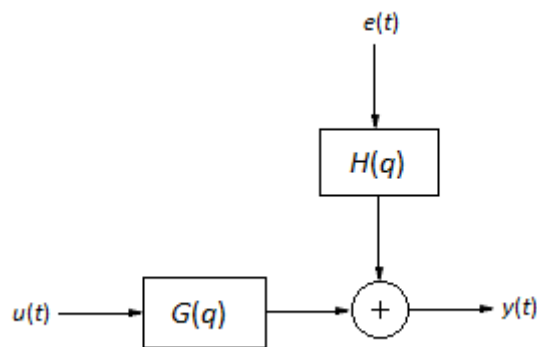


Fig. 5.1. Estructura general de los modelos paramétricos.

La salida del sistema puede ser definida por la siguiente expresión:

$$y(t) = G(q^{-1})u(t) + H(q^{-1})e(t) \quad (5.1)$$

Donde q^{-1} es el operador retardo definido como: $q^{-1}u(t)=u(t-1)$ y donde:

$$G(q^{-1}) = \sum_{k=0}^{\infty} g(k)q^{-k} \quad (5.2)$$

Y

$$H(q^{-1}) = 1 + \sum_{k=0}^{\infty} h(k)q^{-k} \quad (5.3)$$

En muchos casos es impracticable definir las funciones $G(q)$, $H(q)$ y $f_e(x)$, la función de probabilidad de $e(t)$, con secuencias infinitas, y se trabaja con estructuras que permitan la

especificación de G y H con secuencias finitas, como las funciones racionales, y se describe $f_e(x)$ no como una función, si no en términos de unas pocas características numéricas, típicamente su media y su varianza, y se acepta comúnmente la hipótesis de que presenta una distribución Gaussiana.

Esto nos permite definir la expresión (5.1) en términos de un número finito de coeficientes, que se representan por un vector θ , y que vendría dada por:

$$y(t, \theta) = G(q, \theta)u(t) + H(q, \theta)e(t) \quad (5.4)$$

Siendo $f_e(x, \theta)$ la función de probabilidad de $e(t)$, un ruido blanco (Gaussiano con media nula, varianza constante y que no presenta autocorrelación).

Como perturbaciones que afectan al sistema se engloba tanto el ruido como las entradas exógenas al sistema y se utiliza como vemos un marco probabilístico para modelizarlas. La función $H(q)$ modeliza la respuesta del sistema a las perturbaciones y se asume que es causal y estable.

Se han definido un gran número de modelos paramétricos para modelizar diferentes sistemas, que pueden ser establecidos a partir de la siguiente expresión de la estructura generalizada de un modelo:

$$A(q^{-1})y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})}u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})}e(t) \quad (5.5)$$

Donde $A(q^{-1})$ es el polinomio autoregresivo que indica la dependencia de la salida con las observaciones anteriores.

Una clasificación general de los modelos paramétricos se puede establecer por la forma de modelizar la respuesta del sistema a las perturbaciones, en función de que $H(q)$ adopte o no adopte un valor unitario.

Algunos de estos modelos se relacionan en la tabla 5.1, donde se indican los polinomios utilizados en los mismos [LJU87]:

Polinomios	Nombre de la estructura del modelo
$B(q)$	AR
$A(q)B(q)$	ARX
$A(q)B(q)C(q)$	ARMAX
$A(q)C(q)$	ARMA
$A(q)B(q)D(q)$	ARARX
$A(q)B(q)C(q)D(q)$	ARARMAX
$B(q)F(q)$	OE (output error)
$B(q)F(q)C(q)D(q)$	BJ (Box-Jenkins)

Tabla 5.1. Polinomios utilizados en algunos modelos paramétricos.

Finalmente señalar que también existen modelos paramétricos no lineales, como por ejemplo el modelo NARMAX (Non- linear Auto-Regressive Moving Average with eXogenous inputs) que es una generalización de la series de Volterra.

5.2. Modelos paramétricos en audio.

Ya hemos comentado anteriormente que diversos autores señalan la elevada complejidad que se plantea a la hora de modelizar la respuesta acústica de un recinto a partir de sus modos de resonancia asumiendo un sistema lineal invariante en el tiempo (LTI), incluso en el rango de las bajas frecuencias en que la densidad de modos no es tan elevada, ya que como señala por ejemplo Karjalainen et al. en [KAR02b], estos modos pueden exhibir complicados comportamientos muy difíciles de parametrizar.

Esta elevada complejidad ha provocado el estudio y la propuesta de diferentes modelos paramétricos concebidos para diferentes aplicaciones, como por ejemplo los propuestos por M. Karjalainen et al. en [KAR02b], Haneda et al. en [HAN99], Gustaffson et al. en [MAL93] o por J. Mourjopoulus et al. en [MOU91].

Dado que la respuesta impulsional acústica de un recinto se puede expresar en forma discreta por una secuencia $h(t)$ estable y causal, la RTF puede expresarse por una función racional en función de la posición de la fuente de sonido r_s y del receptor acústico r_m , en el dominio de z , de la forma:

$$H(z, r_s, r_m) = \frac{C_z z^{-Q_1} \prod_{i=1}^{Q_2} [1 - a_i(r_s, r_m) z^{-1}]}{\prod_{i=1}^{Q_3} [1 - b_i(r_s, r_m) z^{-1}]} \quad (5.6)$$

Donde C_z es una constante de ganancia y donde a_i y b_i son los ceros y los polos de la RTF respectivamente. Esta expresión se corresponde a un modelo ARMA y ha sido estudiado en el rango de las bajas frecuencias por Haneda et al. en [HAN94], proporcionando un orden del modelo menor para modelizar la respuesta acústica de un recinto que el que presentan algunos otros modelos.

A partir de esta expresión general de polos y ceros de la RTF se pueden derivar también otros diferentes modelos que han sido estudiados por diferentes autores, por ejemplo un modelo que presenta una muy directa relación con la interpretación física de la propagación del sonido en los recintos es el modelo CAPZ (common acoustical pole and zero) propuesto también por Haneda et al. en [HAN92] y [HAN99], y que viene dado por la expresión:

$$H(z, r_s, r_m) = \frac{C_z z^{-Q_1} \prod_{i=1}^{Q_2} [1 - a_i(r_s, r_m) z^{-1}]}{\prod_{i=1}^{Q_3} [1 - b_i z^{-1}]} \quad (5.7)$$

En el que se considera el hecho de que las frecuencias de resonancia del recinto y sus coeficientes de amortiguamiento no dependen de la posición del emisor y del receptor acústico, tal como se indica en la expresión en los coeficientes correspondientes a los polos. Este modelo requerirá menos parámetros para expresar las variaciones de la RTF que el modelo convencional ARMA, no obstante, es bastante complejo expresar las variaciones de los

ceros como funciones explícitas. Para minimizar estas dificultades se proponen también en [HAN92] y [HAN99] modelos que contemplan los polos y sus residuos para expresar las variaciones de la RTF con funciones más simples.

Otros autores han propuesto otros modelos que aunque no presentan una relación tan directa con el comportamiento físico de la propagación del sonido, pueden proporcionar buenos resultados.

Un ejemplo de estos modelos es el modelo todo-polos (*all-pole model*) propuesto por J. Mourjopoulos et al. en [MOU91], que se corresponde a un filtro del tipo IIR y que viene dado por la expresión:

$$H(z, r_s, r_m) = \frac{C_z}{\prod_{i=1}^{Q_3} [1 - b_i(r_s, r_m)z^{-1}]} \quad (5.8)$$

O como por ejemplo el modelo AR del tipo todo-ceros (*all-zero model*), que se corresponde a un filtro de tipo FIR y que viene dado por la expresión:

$$H(z, r_s, r_m) = C_z z^{-Q_1} \prod_{i=1}^{Q_2} [1 - a_i(r_s, r_m)z^{-1}] \quad (5.9)$$

También J. Mourjopoulos et al. en [MOU91] aplican estos modelos con objeto de anular la reverberación de las señales en recintos, llegando a la conclusión de que los modelos del tipo todo-polos presentan la ventaja de requerir de un orden mucho menor para definir las funciones de transferencia en las distintas posiciones del recinto que los modelos del tipo todo-ceros (de un orden 40 veces menor), aunque presentan la desventaja de ser menos sensibles que los modelos del tipo todo-ceros.

Los modelos anteriores no están concebidos para su aplicación específica en funciones de navegación robótica. En [BOL03] encontramos sin embargo un modelo acústico pensado específicamente para la navegación de robots en recintos cerrados trabajando con una fuente de sonido no estacionaria, a este trabajo nos referiremos también en el próximo capítulo cuando estudiemos los sistemas de localización propuestos.

Los autores proponen trabajar con la transformada wavelet, dado que una característica distintiva que presenta la transformada wavelet es su capacidad de multirresolución, característica que es muy adecuado para el procesamiento de señales no estacionarias. La transformada wavelet puede descomponer el espacio $L^2(R)$ en una combinación lineal de un conjunto de subespacios ortogonales que dividen el conjunto de bandas de frecuencia en una serie de subbandas, desde la baja hasta la alta frecuencia, representando las características de multiresolución de la señal original.

Por tanto, la idea de la transformación de la señal es la de separar la señal entrante en bandas de frecuencia. Esta función tanto puede ser efectuada con el uso de banco de filtros o con la transformada wavelet. Los autores proponen la implementación de estas bandas con un árbol diádico de cuatro niveles.

Se selecciona una frecuencia de muestreo de 8 kHz, las frecuencias del árbol diádico correspondiente son 0-250 Hz, 250-500 Hz, 500-1000 Hz, 1000-2000 Hz, 1000-2000 Hz y 2000-4000 Hz. Cada señal de entrada se descompone en 4 niveles, es decir, si llamamos S_i a la señal de audio, la señal se descompone como: $S_i = A4_i + D4_i + D3_i + D2_i + D1_i$, donde $A4_i$ es la aproximación de la señal original S_i y D_j ($j = 1,4$) son las señales de detalle de S_i .

Los autores utilizan un modelo MAX (Moving Averaging Exogenous) que viene dado por la expresión:

$$y(n) = \sum_{k=0}^q b(n; k)u(n - k) + \sum_{k=0}^r c(n; k)e(n - k) \quad (5.10)$$

En el que $y(n)$ es la salida del sistema, $u(n)$ es la entrada observable y $e(n)$ es la señal de ruido. En este modelo los coeficientes se obtienen con la transformada wavelet de Daubechies y sólo se seleccionan para modelizar el sistema aquellos coeficientes que presenten un mayor poder de discriminación en las distintas señales de audio captadas.

5.3. Modelo ARX y modelo LPV propuesto.

Para proponer la estructura de un nuevo modelo para nuestro sistema de localización, propondremos un modelo de RTF que nos permita seleccionar un modelo paramétrico con una estructura sencilla y que no requiera de un orden excesivamente elevado para modelizar la respuesta acústica del recinto en la zona de trabajo del robot.

Si suponemos a efectos simplificativos que trabajamos en una zona del espectro en que los modos se encuentran lo suficientemente separados y establecemos la similitud de la respuesta acústica de un recinto con la de un filtro pasabanda que hemos comentado en capítulos anteriores, podemos expresar la RTF del recinto para un modo de propagación determinado por la expresión:

$$H(s, r_m) = \frac{P_m(s, r_m)}{P_s(s)} = \frac{\bar{K}_n \psi_n(r_m) s}{s^2 + 2\xi_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.11)$$

En esta función de transferencia, el valor del módulo de la ganancia para una posición determinada del receptor acústico r_m determinada vendrá dado por:

$$|H(j\omega_n, r_m)| = \frac{\bar{K}_n \psi_n(r_m) \omega}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_n \omega_n \omega)^2}} \quad (5.12)$$

El valor del módulo de la ganancia máxima que se producirá si la fuente de sonido monofrecuencial emite a la frecuencia de resonancia, vendrá dado por:

$$|H(j\omega_n, r_m)| = \frac{\bar{K}_n \psi_n(r_m)}{2\xi_n \omega_n} \quad (5.13)$$

Si forzamos en esta función de transferencia acústica a que el producto obtenido al multiplicar el factor de ganancia por la autofunción correspondiente a las diversas posiciones

del receptor acústico en el recinto adopte un valor constante para todas las posiciones, tal como indica la expresión siguiente:

$$k = \overline{K}_n \psi_n(r_m) \quad (5.14)$$

La función de transferencia acústica la podemos expresar como:

$$H(s, r_m) = \frac{P_m(s, r_m)}{P_s(s)} = \frac{ks}{s^2 + 2\xi_n(r_m)\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.15)$$

En la que las variaciones que se producen en el valor de la ganancia de la función de transferencia en las distintas posiciones del receptor acústico serían provocadas en este caso por las variaciones que sufriría el factor de amortiguamiento, por lo que podemos escribir la expresión del módulo de la ganancia como:

$$|H(j\omega_n, r_m)| = \frac{k\omega}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_n[r_m]\omega_n\omega)^2}} \quad (5.16)$$

En este caso, el valor del módulo de la ganancia máxima que se producirá si la fuente de sonido monofrecuencial emite a la frecuencia de resonancia, vendrá dado por:

$$|H(j\omega_n, r_m)| = \frac{k}{2\xi_n(r_m)\omega_n} \quad (5.17)$$

La función de transferencia presentaría un par de polos conjugados que vendrían dados por:

$$s_{1n}[r_m] = -\xi_n[r_m]\omega_n + \omega_n\sqrt{(\xi_n[r_m])^2 - 1} \quad (5.18a)$$

$$s_{2n}[r_m] = -\xi_n[r_m]\omega_n - \omega_n\sqrt{(\xi_n[r_m])^2 - 1} \quad (5.18b)$$

Dado que la variación real de la ganancia máxima en las distintas posiciones vendría dada por el carácter sinusoidal de la autofunción $\psi_n(r_m)$, al focalizar estas variaciones en el valor de los polos en esta función de transferencia, es de esperar que la función que describa la evolución de los polos en las distintas posiciones siga este mismo patrón.

Si extrapolamos este comportamiento a un cierto número de modos y lo expresamos en el dominio de z , cada modo de resonancia de la función de transferencia del recinto aparecerá como un par de polos complejos conjugados (z_{1n}, z_{2n}) en el diagrama de polos y ceros o plano complejo z , y es de esperar que las variaciones de su posición en dicho plano complejo presentaran un patrón de tipo sinusoidal.

En la selección de la estructura del modelo paramétrico correspondiente a nuestro modelo, nos hemos decantado por un modelo ARX (AutoRegresivo con variables eXógenas) [LJU87] dado que presenta una estructura sencilla, que corresponde a la de un filtro de tipo IIR, y en el que focalizaremos las diferentes posiciones del robot en el recinto en la determinación de los parámetros correspondientes a los polos del modelo, lo que nos permitirá proponer una función de transformación entre el espacio de medidas y el espacio de características de forma más sencilla que la que nos proporcionan otros modelos, y que nos

permitirá modelizar el retardo entre la señal de entrada y la señal recibida en las distintas posiciones del robot.

Para la calibración de los parámetros del modelo con un método de estimación se utilizará el método de los mínimos cuadrados (LSE) por su simplicidad y porque no presenta problemas de convergencia. Una vez elegido el modelo comprobaremos que su aplicación en el sistema de localización de la posición del robot proporcione buenos resultados.

Este modelo es básicamente una expresión geométrica de la RTF, pero también presenta una cierta relación con el modelo de comportamiento físico de la respuesta acústica de un recinto cerrado, reflejada en la posición de los polos, como veremos posteriormente.

Aunque el modelo ARMAX permite una descripción más precisa de las perturbaciones al describir la ecuación del error como un promediado móvil del ruido (MA), y necesita usualmente de un número menor de parámetros, hay que tener en cuenta que en algunos casos el seguimiento de las variaciones de los polos y los ceros es compleja, porque no son independientes unas de otras, un ejemplo se presenta cuando se producen cancelaciones de polos y ceros en muchas configuraciones del emisor y el receptor acústico, y este hecho nos dificultaría la obtención de una función de transformación entre el espacio de características y el espacio de medidas.

El modelo ARX presenta la estructura de la figura 5.2:

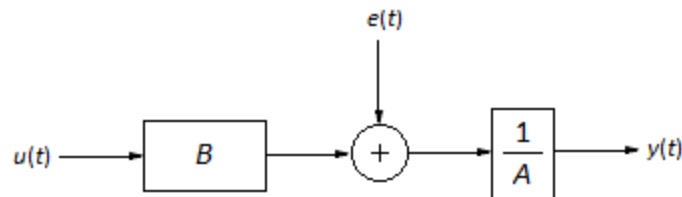


Fig. 5.2. Diagrama de bloques del modelo ARX.

Este modelo viene definido por la siguiente expresión:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t - nk) + e(t) \quad (5.19)$$

Donde $y(t)$ es la salida del sistema, $u(t)$ es la entrada observable del sistema que será la señal emitida por la fuente de sonido y captada en sus inmediaciones, nk es el retardo de la entrada respecto a la salida y $e(t)$ es una señal de ruido blanco.

Siendo la parte determinista:

$$G(q^{-1}) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \quad (5.20)$$

Y la parte estocástica:

$$H(q^{-1}) = \frac{1}{A(q^{-1})} \quad (5.21)$$

El polinomio $A(q^{-1})$ es un polinomio autoregresivo de orden na :

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na} \quad (5.22)$$

Como vemos en las expresiones anteriores, el ruido que se adiciona a la salida es un ruido blanco filtrado por un filtro autoregresivo con polos iguales a los del proceso.

La validez de este modelo para aplicaciones en autolocalización de robots móviles se ha comprobado experimentalmente en [MAN09a], como veremos en el capítulo de resultados experimentales, mediante la señal emitida por una cámara climática en el recinto de experimentación, un laboratorio docente de ensayos de componentes y circuitos electrónicos.

Las distintas señales utilizadas en los ensayos, correspondientes a la señal emitida por la fuente de sonido, las señales captadas en las posiciones de las muestras y las señales captadas en las posiciones del robot se someten al mismo tipo de filtrado que para el modelo teórico propuesto en el capítulo anterior.

El modelo de identificación ARX seleccionado en el recinto de experimentación tiene un número de polos $na = 10$, un número de ceros $nb = 4$ y un retardo $nk = 2$ y ha sido obtenido a partir de las señales captadas en 5 posiciones del recinto situadas alrededor de la trayectoria del robot en una etapa de muestreo previo del recinto.

Para calibrar estos 5 modelos,, se utiliza el criterio FPE (Function Prediction Error) y el criterio MSE (Mean Square Error), proporcionando valores de alrededor del orden de 10^{-10} y del 3% respectivamente. Además, para el conjunto estimado de los modelos se analiza la autocorrelación de los residuos y la correlación cruzada entre las entradas y los residuos y no muestran correlación, indicando la bondad de los modelos.

El diagrama de polos y ceros de los modelos obtenidos se indica en la figura 5.3, en la que podemos observar la sensibilidad que muestran los polos a la hora de indicar las variaciones de las posiciones correspondientes a la señal captada en el recinto.

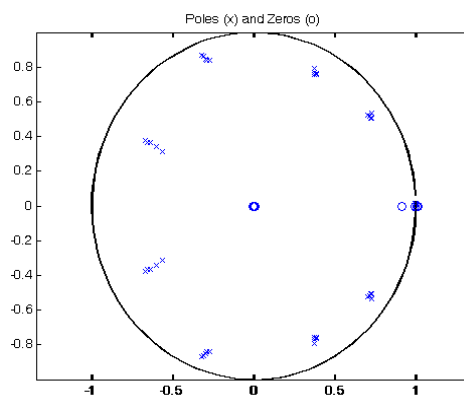


Fig. 5.3. Posición de los polos y los ceros en cinco posiciones de las muestras del recinto de experimentación (Cámara climática)

En [MAN10] se amplía el estudio realizado mediante el ensayo de una segunda fuente de sonido en el mismo recinto, una insoladora de placas de circuitos impresos electrónicos, seleccionándose un modelo ARX con un número de polos $na = 10$, un número de ceros $nb = 2$ y un retardo $nk = 4$.

El diagrama de polos y ceros obtenidos se muestra en la figura 5.4:

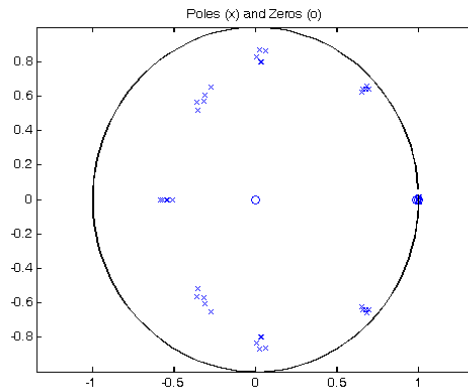


Fig. 5.4. Posición de los polos y los ceros en cinco posiciones de las muestras del recinto de experimentación (Insoladora PCB)

En esta figura 5.4 se observa también la elevada sensibilidad de los polos para indicar las diferentes posiciones en las que ha sido captada la señal.

Esta interpretación de la función de transferencia no tiene una correspondencia directa con la descripción física de la propagación del sonido en el recinto, pero proporciona buenos resultados a la hora de obtener un modelo de orden reducido para modelizar la evolución de la ganancia acústica del recinto en las distintas posiciones.

También se expone una interpretación geométrica simplificada de este comportamiento de los polos en el plano complejo z en [MAN09b].

Un sistema lineal de parámetros variables LPV (Linear Parameter Varying) depende de un vector de parámetros $\theta(t)$ que varía en el tiempo, y se describe en el espacio de estados por las ecuaciones:

$$\dot{x}(t) = A[\theta(t)]x(t) + B[\theta(t)]u(t) \quad (5.23)$$

$$\theta(t) = [\theta_1(t) \dots \theta_r(t)]^T \in \Omega \subset R^r \quad (5.24)$$

Donde $x(t)$ es el vector de estado, $u(t)$ es el vector de control, A es la matriz de estado y B es la matriz de entrada.

Estos parámetros se encuentran confinados dentro de un conjunto conocido, es decir, el vector de parámetros satisface en cualquier instante la condición:

$$\theta(t) \in \Omega = \{\theta(t): \theta_i^- \leq \theta_i \leq \theta_i^+; \forall i = 1, 2, \dots, r\} \subset R^r$$

Donde son conocidas las cotas inferior y superior θ_i^- y θ_i^+ del parámetro θ_i .

Los sistemas LPV pueden interpretarse de dos formas, pueden interpretarse como sistemas lineales sujetos a incertidumbres o como una familia de sistemas lineales provenientes de mediciones en tiempo real del vector de parámetros. La primera interpretación da lugar a un enfoque de control robusto y la segunda a una estrategia de control del tipo programación de ganancias. En la literatura encontramos muchos trabajos de

modelización y control de sistemas con modelos LPV, como por ejemplo en [BEL05], [BIA97] o [GUI06].

En el modelo que hemos expuesto anteriormente podríamos plantear un enfoque alternativo que permitiera plantear el modelo como un modelo LPV, posibilidad que ha sido propuesta en [MAN10] y [MAN11]. En [MAN12] se propone además una mejora del modelo anteriormente propuesto introduciendo un factor de atenuación que intenta modelizar el amortiguamiento espacial que presentan los modos.

El modelo anteriormente propuesto para el que seleccionábamos una estructura de modelo paramétrico ARX, venía definido por la siguiente RTF:

$$H(s, r_m) = \frac{P_m(s, r_m)}{P_s(s)} = \frac{ks}{s^2 + 2\xi_n(r_m)\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.25)$$

En la que las variaciones que se producen en el valor máximo de la ganancia de la función de transferencia en las distintas posiciones del receptor acústico son provocadas por las variaciones que sufriría el factor de amortiguamiento.

Si consideramos que el robot, desde el instante de tiempo en que inicia su recorrido en el recinto desde, por ejemplo, la puerta de entrada del mismo hasta su punto de destino, va encontrando al desplazarse una respuesta acústica equivalente a la de un sistema resonante cuyo parámetro correspondiente al factor de amortiguamiento va variando en función del tiempo $\xi_n(t)$, podemos plantear que el sistema se englobe dentro de la familia de los sistemas de tipo LPV.

El modelo vendría dado entonces por la expresión:

$$H(s, t) = \frac{P_m(s, t)}{P_s(s)} = \frac{ks}{s^2 + 2\xi_n(t)\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5.26)$$

El valor del módulo de la ganancia vendría dado en este modelo por la expresión:

$$|H(j\omega_n, t)| = \frac{k\omega}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_n[t]\omega_n\omega)^2}} \quad (5.27)$$

Dado que las variaciones del módulo de la ganancia son provocadas por la autofunción correspondiente a las diversas posiciones del receptor acústico en el recinto, y que dichas variaciones las focalizamos en el factor de amortiguamiento, podemos esperar que la trayectoria que siga este parámetro tenga un patrón de tipo sinusoidal, de forma similar al que presentan las autofunciones.

5.4. Efecto del filtrado en la reducción del orden del modelo.

Para la aplicación de estos modelos paramétricos, se propone la realización de un filtrado a las distintas señales captadas, al igual que propusimos para el modelo teórico con objeto de simplificar los modelos.

En [MAN14] se realizaron estudios sobre la relación del ancho de banda del filtro que aplicamos a las distintas señales analizadas y la disminución del error cometido en la estimación de la señal por el modelo con el sistema calibrado, relación debida a que al disminuir el ancho de banda del filtro intervienen menos componentes frecuenciales del sonido emitido por la máquina en la señal captada en las distintas posiciones, disminuyendo por tanto el número de modos excitados por la fuente de sonido que afectan al modelo.

Por ejemplo, para el caso en el que en el recinto de experimentación se utiliza como fuente de sonido una cámara climática y con el modelo ARX seleccionado, que tiene un número de polos $na = 10$, un número de ceros $nb = 4$ y un retardo $nk = 2$, se estudian los resultados de la calibración del modelo con el criterio MSE (Mean Square Error) en la posición de una muestra situada en las proximidades de una de las esquinas del recinto (etiquetada como M1 en el capítulo de resultados experimentales), y que por tanto se verá afectada por un número de modos más elevado que el resto de las muestras que se encuentran más alejadas de las esquinas del recinto.

El filtrado que se aplica a la señal para el calibrado del modelo, tanto para la señal emitida por la cámara climática como para la señal recibida en la posición de la muestra se realiza con un filtro digital de Cauer de sexto orden con un ancho de banda de 14,5 Hz y una atenuación máxima en la banda de paso de 0,5 dB, ya que este tipo de filtros presentan una zona de transición entre la banda de paso y la banda atenuada muy estrecha, y requieren de un orden menor que el que requerirían otras estructuras para cumplir con las especificaciones, optimizando así el tiempo de computación.

En las figuras siguientes se representa la señal captada y la señal estimada con los modelos calibrados para diferentes anchos de banda del filtro, en las figuras también se indica el error cuadrático medio obtenido entre la señal captada y la señal estimada.

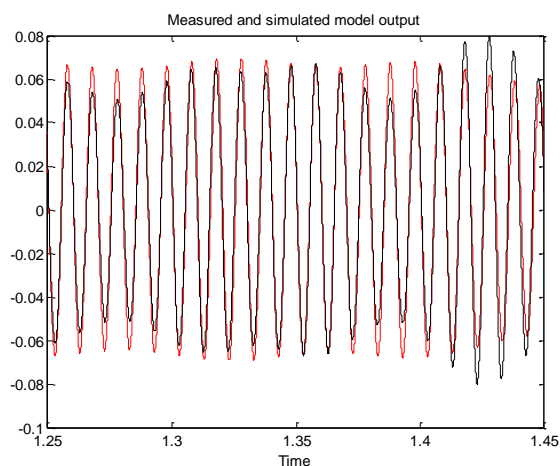


Fig. 5.5. Ancho de banda = 17,2 Hz / MSE = 18,55 %

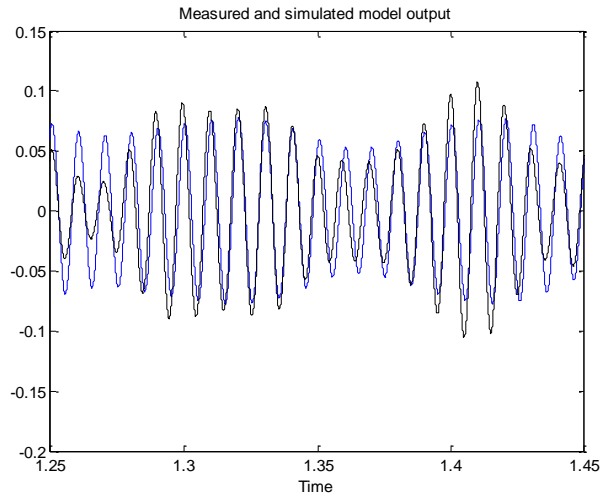


Fig. 5.6. Ancho de banda = 32,9 Hz / MSE = 39,41 %

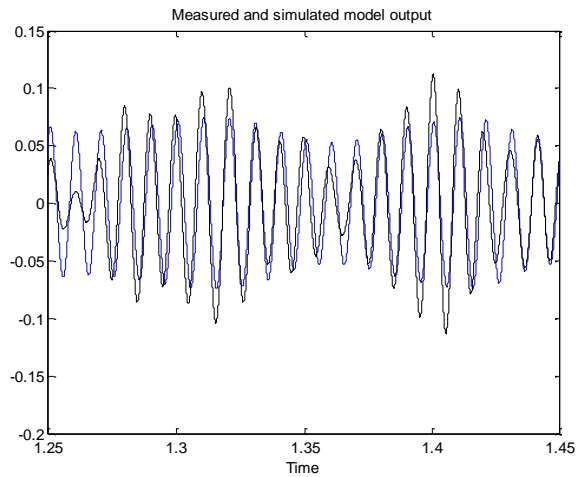


Fig. 5.7. Ancho de banda = 68,4 Hz / MSE = 43,76 %

Para finalizar se muestra en la figura 5.8 siguiente una función polinómica aproximada, interpolada a partir de los datos experimentales, que relaciona el MSE que se produce entre la señal captada y la señal identificada en la posición de la muestra M1 en función del ancho de banda del filtro utilizado.

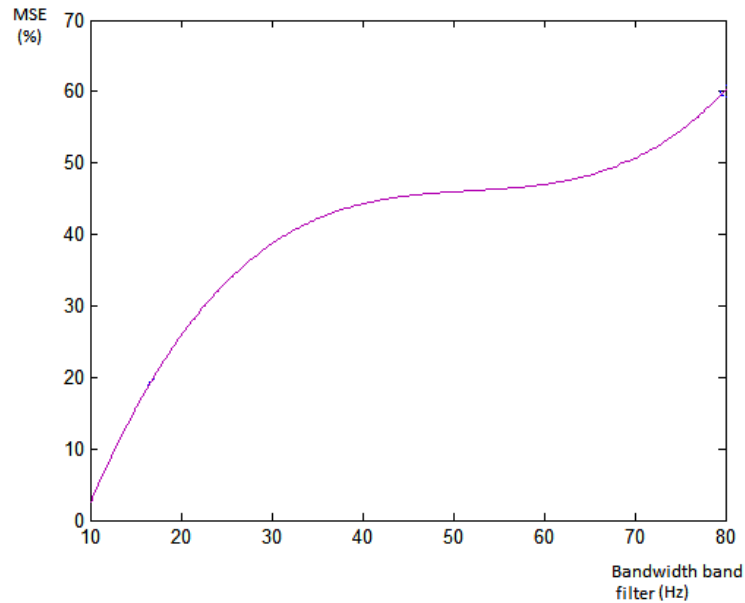


Fig. 5.8. Relación ancho de banda-MSE

En esta figura 5.8 podemos observar la fuerte relación existente entre el ancho de banda del filtro y el error cometido en la estimación de la señal con el modelo ARX adoptado, debido al efecto del aumento del número de modos excitados por la señal de la fuente de sonido que afectan a la señal captada en la posición de la muestra y que no han sido contemplados en el modelo. Por tanto, si aumentamos el ancho de banda del filtro utilizado para el tratamiento de las señales requeriremos de un orden del modelo de identificación más elevado para mantener el error cometido por el modelo dentro de unos márgenes aceptables.

La elección de un ancho de banda de 14,5 Hz que hemos seleccionado para el filtrado de las diferentes señales en los estudios experimentales realizados es una solución de compromiso entre la reducción del orden del filtro utilizado y el orden del modelo ARX necesario para mantener los errores del modelo en un margen aceptable para la aplicación.

CAPÍTULO 6: Sistemas de autocalización del robot

6.1. Sistema de adquisición de la señal.

Para la adquisición de la señal en el robot se propone la utilización de un micrófono preferiblemente con un diagrama de directividad de tipo cardioide, con objeto de que queden atenuados los posibles ruidos de fondo que pudieran aparecer en la sala.

El micrófono se debe ubicar en la parte superior del robot, para evitar la posible atenuación de la señal que pudiera producir la propia estructura del robot y la que podría provocar la presencia de sombras acústicas provocadas por los diferentes obstáculos presentes en el recinto, siendo preferible si es posible que esté situado a una altura igual o mayor que la de la altura máxima que presenten.

Para el sistema de localización propuesto en base al modelo teórico, la señal captada por el micrófono se rectifica en onda completa, tal como muestra la figura 6.1, con el fin de ganar sensibilidad, dado que al calcular el cociente de presiones para obtener el módulo de la función de transferencia de presión, el resultado del cociente no se verá afectado por este hecho.

El sistema completo se muestra esquemáticamente en la figura siguiente:

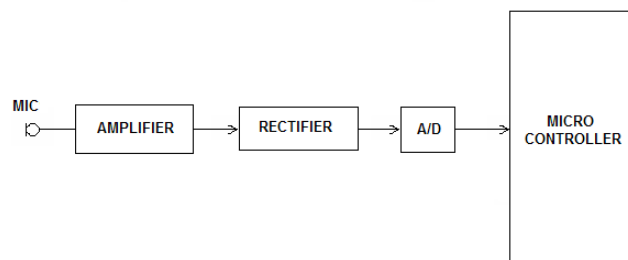


Fig.6.1. Diagrama de bloques del sistema de adquisición de la señal.

Para los sistemas de localización propuestos en base a los modelos paramétricos, se elimina la etapa rectificadora del diagrama de bloques de la figura 6.1, con objeto de no afectar a las distintas señales captadas utilizadas para la identificación de los parámetros de las distintas funciones de transferencia.

De la misma forma para estos sistemas de localización, el sistema ubicado en el robot, debe recibir la señal emitida por la fuente de sonido además de la señal captada en su posición, con objeto de realizar el proceso de identificación de los parámetros de las distintas funciones de transferencia. Para ello se propone la utilización de un sistema de transmisión y recepción por radiofrecuencia, en el que el transmisor de la señal de radio y el micrófono que capta la señal emitida por la fuente de sonido se encuentra ubicado en las proximidades de la fuente, y el receptor de la señal de radiofrecuencia se encuentra ubicado en el propio robot.

El micrófono de recepción de la señal del robot en las distintas posiciones, estará ubicado en una plataforma giratoria en todos los sistemas de localización propuestos, como veremos en el próximo apartado.

6.2. Sistema de orientación del micrófono del robot.

El sistema propuesto está pensado inicialmente para trabajar con una única máquina o fuente de sonido en el recinto, y con objeto de tener la máxima intensidad de la señal captada en las distintas posiciones del robot, orientaremos el micrófono en la dirección en que se reciba la máxima intensidad de sonido mediante una plataforma giratoria donde estará ubicado el micrófono.

Para los sistemas de localización paramétricos propuestos, deberemos conocer el ángulo que forma la plataforma giratoria respecto a la fuente de sonido, como veremos posteriormente con detalle, y por tanto deberemos asegurar que la plataforma giratoria oriente el micrófono de captación de la señal en dirección a la fuente de sonido.

Por otra parte, la orientación del micrófono hacia la fuente de sonido evitará las variaciones que nos provocaría en el nivel de la señal captada el diagrama de directividad del micrófono, variaciones que se acentuarían en las proximidades del campo sonoro cercano, manteniendo su sensibilidad en un valor máximo aproximadamente constante para cualquier orientación del robot.

Para ello, nos serviremos de dos micrófonos de tipo cardioide situados en los extremos de una plataforma giratoria, plataforma en la que estará también ubicado en su parte central el micrófono encargado de captar la señal a tratar por el sistema de localización, tal como muestra la figura 6.2.

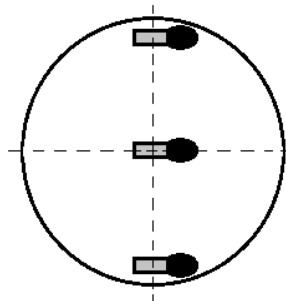


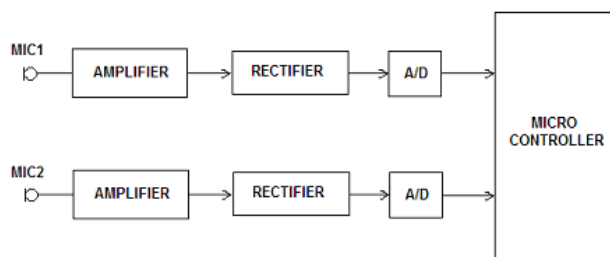
Fig. 6.2. Plataforma giratoria con los micrófonos.

Existen numerosos trabajos realizados que proponen técnicas de localización de fuentes de sonido, por ejemplo en [BRAN97] y otros trabajos similares se propone la utilización de un array de micrófonos ubicados en el receptor acústico para la detección de la posición de la fuente de sonido.

La utilización de una plataforma giratoria nos permitirá simplificar el número de micrófonos a utilizar, pudiendo realizar la orientación de la plataforma hacia la fuente de sonido analizando la señal diferencial obtenida por los dos micrófonos, dado que la señal diferencial presentará un valor mínimo cuando la plataforma esté orientada hacia la fuente de sonido.

Para este sistema de orientación de la plataforma móvil en base a los dos micrófonos, utilizamos un sistema independiente al de captación de la señal utilizado para el sistema de

autolocalización indicado anteriormente. El sistema de orientación se realiza en base a un microcontrolador dedicado a esta función, tal como se indica en la figura 6.3.



**Fig. 6.3. Diagrama de bloques del sistema de orientación
Del micrófono.**

La utilización de micrófonos direccionales de tipo cardioide nos permitirá reducir significativamente la influencia del ruido de fondo respecto a la utilización de micrófonos omnidireccionales, al igual que ocurre con el micrófono dedicado a la adquisición de la señal, además de permitirnos aprovechar la directividad que presentan para orientar correctamente la plataforma.

Idealmente, en la posición inicial de trabajo del robot la plataforma deberá estar orientada hacia la fuente de sonido, evitando así el error que podría generar la posible presencia de máximos producidos por las reflexiones de la señal y que no sean producidos directamente por la influencia del campo directo generado por la fuente de sonido. Hay que considerar que a distancias elevadas de la fuente de sonido, este efecto se irá incrementando.

6.3. Filtrado de ruido no estacionario.

Aunque en nuestra tesis nos centraremos primordialmente en fuentes sonoras que producen un sonido de carácter estacionario y que operan en recintos en los que no sea habitual la presencia de operarios, hemos realizado previamente trabajos, como en [GRA07], que tienen también como objetivo el filtrar señales típicas de estos entornos industriales que son usualmente de carácter no estacionario, como por ejemplo las señales de voz o la posible presencia de ruido de fondo que pueden enmascarar la señal de interés emitida por la máquina.

En estos casos la señal generada por la máquina puede resultar difícil de identificar utilizando técnicas de análisis en el dominio frecuencial, como la transformada de Fourier propuesta en [MOR96], o utilizando técnicas estadísticas como el Análisis de Componentes Independientes (ICA) propuesto en [ROB01].

La transformada wavelet es muy utilizada por su capacidad en la extracción de características de las señales como podemos ver en [MAL93], y en la eliminación de ruido [DON99]. En algunos tipos de señales, el método de Donoho resulta poco efectivo. No obstante, cuando se combinan el método de Donoho con las características del sonido, y se añade un método de eliminación del ruido basado en la wavelet de Morlet, la metodología resulta muy efectiva para identificar sonidos producidos por máquinas industriales, como se analiza en [LIN01].

Como ejemplo de aplicación de la transformada wavelet en el filtrado de señales que vienen acompañadas de ruido no estacionario y en la extracción de características describiremos brevemente la metodología que propusimos en [GRA07]. En dicho trabajo se utilizan dos señales producidas por máquinas y contaminadas con un ruido de fondo correspondiente al generado por el habla de un conjunto de personas

El método propuesto consta de los siguientes pasos:

- 1) Filtrado inicial de la señal con la transformada de Morlet, despreciándose los coeficientes wavelets que no superen un cierto umbral.
- 2) Obtención del espectro frecuencial de la señal filtrada.
- 3) Selección de las características que se utilizarán como base para identificar las señales producidas por las máquinas.

Los resultados obtenidos al realizar el filtrado de una señal generada por una máquina mediante la wavelet de Morlet se muestran en la figura 6.4. En esta figura se representa el espectro de la señal original $s_1(t)$, el espectro de la señal con un ruido de fondo añadido y el espectro de la señal filtrada.

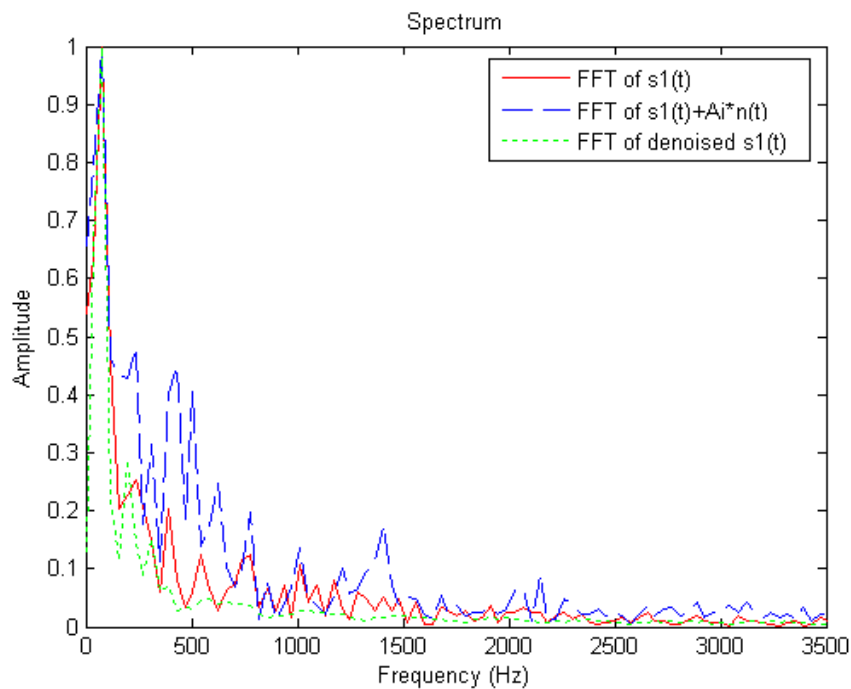


Fig.6.4. Espectros de la señal original, señal con ruido y señal filtrada.

En la figura podemos observar la similitud del espectro de la señal filtrada respecto al espectro de la señal original, pudiendo comprobar el efecto del filtrado realizado con la wavelet de Morlet.

Para evaluar la robustez del método, en los ensayos se incrementa progresivamente el nivel de la señal de ruido comprobándose que aunque la relación señal-ruido (SNR) sea muy baja no se pierde la capacidad de identificación de las señales afectadas por el ruido.

Estos y otros métodos de filtrado propuestos por diferentes investigadores podrían ser utilizados como refuerzo de nuestro sistema de localización para el caso de que la señal emitida por la máquina pudiera ser enmascarada por la presencia de ruidos de tipo no estacionario.

6.4. Sistema de localización en base al modelo teórico.

6.4.1. Sistema de localización.

El sistema de localización se basará en el cálculo teórico de la ganancia del modo principal n considerado definido por nuestro modelo, que viene dada por la expresión:

$$|H(\omega, r_m)| = \frac{K_n(r_m)\omega\psi_n(r_m)}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_n\omega_n\omega)^2}} \quad (6.1)$$

Siendo $\psi_n(r_m)$ el valor de la autofunción definido en la posición del robot, que podemos expresar en coordenadas polares en función del ángulo θ formado respecto al eje de abscisas adoptado, según la expresión:

$$\psi_n(r_m) = \cos \frac{n_x \pi r_m \cos \theta}{L_x} \cos \frac{n_y \pi r_m \sin \theta}{L_y} \quad (6.2)$$

Y siendo $K_n(r_m)$ la función del factor de ganancia, que también podemos expresar en coordenadas polares como:

$$K_n(r_m) = \widehat{K}_n \left[\cos \frac{n_x \pi r_m \cos \theta}{L_x} \cos \frac{n_y \pi r_m \sin \theta}{L_y} \right] \quad (6.3)$$

La variable a determinar será la distancia r_m existente entre la posición del robot y el origen de coordenadas del recinto, ya que dotaremos al robot de un sistema que será capaz de determinar el ángulo de orientación θ que forma la posición del micrófono del robot respecto a dicho origen de coordenadas y el eje de abscisas adoptado.

Para poder realizar esta función será necesario situar una baliza luminosa en la esquina del recinto donde se ubica el origen de coordenadas adoptado en nuestro modelo, preferiblemente a una altura suficientemente elevada, y dotar al robot de una brújula electrónica y una cámara hemisférica que permitirá mediante el procesado de la imagen, determinar el ángulo buscado.

Nuestro sistema de localización tendrá como variables de entrada la presión acústica captada por el micrófono P_m y el ángulo de orientación θ que forma el micrófono respecto al origen de coordenadas y el eje de abscisas adoptado, y como salida las coordenadas (x,y) de la posición del robot, tal como muestra la figura 6.5 siguiente.

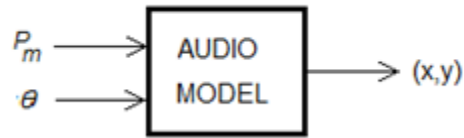


Fig. 6.5. Diagrama de bloques del sistema de localización.

El algoritmo de localización determinará el valor de la distancia r_m que será aquel valor que iguale el módulo de la ganancia calculado con la expresión (6.1) con el modulo de la ganancia obtenido experimentalmente en la posición del robot, tal como muestra por ejemplo la figura 6.6, donde se representa la función de la ganancia teórica y el valor de la ganancia experimental obtenida en el recinto de experimentación en la posición del robot que hemos denominado R2, junto con el intervalo de soluciones posibles considerando la última posición del robot, para el caso en que se ha utilizado como fuente de sonido una insoladora de placas de circuito impreso, como veremos en el capítulo de resultados experimentales.

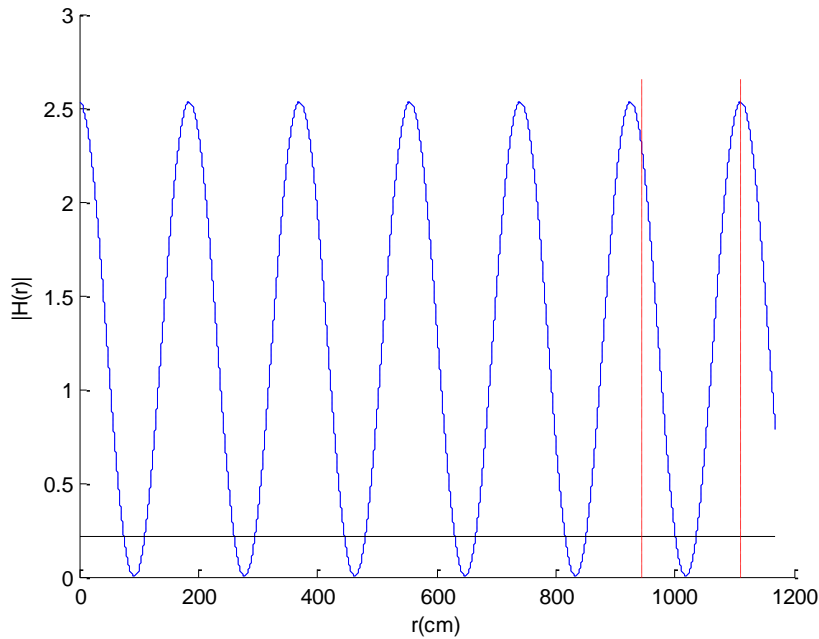


Figura 6.6. Ganancias teóricas y experimental en la posición del robot R2.

Una vez determinada dicha distancia r_m existente entre la posición del robot y el origen de coordenadas, el cálculo de las coordenadas cartesianas del robot vendrá dada por las expresiones:

$$x_m = r_m \cos \theta \quad (6.4)$$

$$y_m = r_m \sin \theta \quad (6.5)$$

Dado el carácter periódico de la autofunción de la posición del micrófono, obtendremos más de una posible solución para la determinación de la distancia r_m , por lo que tendremos

que tener en cuenta la velocidad de desplazamiento del robot y considerar la posición anterior del robot para la determinación de su posición actual y poder acotar el conjunto de soluciones posibles. Este conjunto de posibles soluciones viene definido por el intervalo delimitado por las líneas discontinuas que se indica en la misma figura 6.6

En los primeros ensayos experimentales realizados para comprobar los resultados de nuestros sistemas de localización, el robot partirá desde una posición inicial conocida con exactitud e intentará mantener siempre un sentido de avance que tienda a reducir la distancia existente entre su posición actual y el origen de coordenadas, en cuyas proximidades se situará el punto de destino del robot, como veremos también en el capítulo de resultados experimentales. Para efectuar la determinación de su posición actual el robot se detendrá en la posición a determinar.

Una manera de reducir el número de soluciones posibles que queden contenidas en el intervalo considerado, es asegurar que el robot no recorra una distancia superior a la del periodo más pequeño de la función de ganancia del modelo sin que haya efectuado el cálculo de su posición. No obstante, si reducimos en exceso la distancia máxima que permitimos recorrer al robot entre el cálculo de dos posiciones consecutivas, podemos alargar en exceso el intervalo de tiempo necesario para que el robot se desplace desde la posición inicial hasta su destino, por lo que deberemos adoptar una solución de compromiso, como veremos posteriormente.

Otro aspecto que juega en contra de adoptar una distancia excesivamente pequeña entre el cálculo de dos posiciones consecutivas está relacionado con la incertidumbre de nuestro modelo, ya que debemos permitir que el robot recorra una distancia lo suficientemente grande respecto al intervalo de incertidumbre como para dotar a nuestro sistema de localización de una resolución suficiente frente al intervalo de posibles soluciones considerado, como por ejemplo se indica en la figura 6.7, en la que se representa el valor de la ganancia experimental y la evolución de la función de ganancia con la incertidumbre adoptada junto con el intervalo de posibles soluciones considerado, para la posición del robot que hemos denominado R3 y utilizando como fuente de sonido una insoladora de placas de circuito impreso.

Por tanto, buscaremos una solución de compromiso entre la disminución del tiempo máximo que dejaremos transcurrir para efectuar el cálculo de las coordenadas entre dos posiciones contiguas, la incertidumbre adoptada y el valor del intervalo de tiempo máximo que el robot deberá utilizar para desplazarse desde su punto de origen hasta su destino.

Otro aspecto importante a considerar es que aunque restrinjamos mucho la máxima distancia que puede recorrer el robot sin calcular su nueva posición, siempre encontraremos posiciones del robot, para valores relativamente grandes o relativamente pequeños de la ganancia, en las que nuestro modelo, a partir de la determinación de la ganancia calculada en su posición, proporcionará como mínimo dos soluciones posibles para computar su posición, tal como podemos deducir de la inspección de las funciones de ganancia representadas en las figuras 6.6.

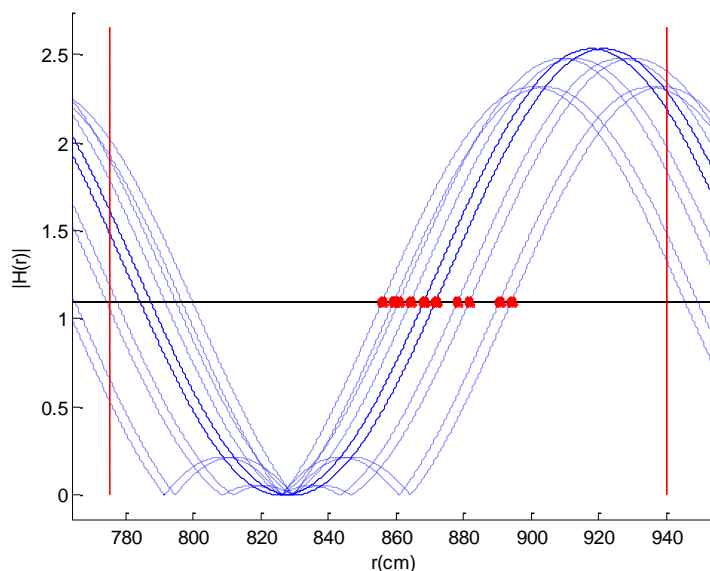


Figura 6.7. Ganancias teórica y experimental en la posición del robot R3.

En estos casos, y dado que desconoceremos la trayectoria que seguirá el robot entre dos posiciones contiguas, podríamos otorgar la máxima probabilidad al conjunto de posibles soluciones que se encuentren más alejadas de la última posición calculada, como se indica por ejemplo en el conjunto de puntos señalados en la figura 6.7, considerando el objetivo del robot de mantener siempre un sentido de avance que tienda a reducir la distancia existente entre su posición actual y el origen de coordenadas, y siempre que el número de obstáculos a bordear en sus posibles trayectorias no sea muy elevado.

No obstante, esta solución presenta muchas restricciones, y pensamos que una forma mucho más adecuada para reducir la incertidumbre del sistema de localización producida por estas situaciones dotando al robot de un sistema de odometría, que pudiera estimar la distancia recorrida desde la última posición computada. Este sistema auxiliar lo podríamos reforzar comprobando si se ha producido un incremento apreciable en el ángulo de giro de la plataforma giratoria de los micrófonos, que al orientarse hacia la fuente de sonido, mostrará una variación apreciable para los casos en que el robot no se desplace en la misma dirección hacia la fuente de sonido entre dos posiciones analizadas consecutivas.

La misma función la podríamos obtener mediante un análisis de la imagen captada por la cámara hemisférica, que podría indicar el avance del robot desde la última posición y nos permitiría determinar en cuál de los dos intervalos de incertidumbre se encuentra la solución correcta correspondiente a la distancia existente entre el robot y el origen de coordenadas, aunque esta última solución requeriría de unos recursos computacionales más elevados.

Finalmente señalar que el algoritmo de localización tomará como solución para estimar la posición del robot, la obtenida al promediar las soluciones extremas del intervalo de incertidumbre.

6.4.2. Incertidumbre.

Como hemos visto, la función que describe la evolución de la ganancia en el recinto proporcionada por nuestro modelo para el modo principal seleccionado viene dada por la expresión:

$$|H(\omega, r_m)| = \frac{K_n(r_m)\omega\psi_n(r_m)}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_n\omega_n\omega)^2}} \quad (6.4)$$

En la que el coeficiente de amortiguamiento viene dado por:

$$\xi_n = \frac{13,81}{\omega_n T_r} \quad (6.5)$$

Y la función del factor de ganancia por la expresión:

$$K_n(r_m) = \widehat{K}_n \left[\cos \frac{n_x \pi r_m \cos \theta}{L_x} \cos \frac{n_y \pi r_m \sin \theta}{L_y} \right] \quad (6.6)$$

Para un modo de tipo axial o tangencial, con n_x o n_y igual a cero, el valor máximo \widehat{K}_n de la función del factor de ganancia está relacionado con el valor del factor de ganancia medio del modo principal seleccionado, por la expresión:

$$\overline{K}_n = \frac{\widehat{K}_n}{2} \quad (6.7)$$

Y para un modo tangencial u oblicuo con n_x y n_y distintos de cero por la expresión:

$$\overline{K}_n = \frac{\widehat{K}_n}{4} \quad (6.8)$$

El valor teórico del factor de ganancia medio del modo principal se obtiene a partir de la expresión ya presentada anteriormente:

$$\overline{K}_n = \frac{M \sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\xi_n\omega_n\omega)^2} \sqrt{\frac{T_r c^4 \pi r^2}{13,8V}}}{\omega \sum_{m=1}^M \psi_n(r_m)} \quad (6.9)$$

Donde el valor teórico del tiempo de reverberación lo determinaremos mediante la ecuación de Sabine:

$$T_r = \frac{55,2 \cdot V}{A \cdot c} \quad (6.10)$$

Independientemente de la incertidumbre que encontramos al no conocer con exactitud el grado de aproximación entre el valor medio de la ganancia proporcionado por el modelo estadístico y el valor medio de la ganancia proporcionado por el modelo ondulatorio, y la incertidumbre generada al efectuar la modelización del comportamiento acústico del recinto en la banda de frecuencias de interés con el modo principal, existen otras causas de incertidumbre que afectan a los resultados que obtenemos al manejar las expresiones anteriores que definen nuestro modelo, y que son, entre otras:

- Las posibles variaciones que se pueden producir en la velocidad de propagación del sonido debidas a posibles variaciones de temperatura, que provocarán variaciones en el tiempo de reverberación del recinto
- Las formas geométricas que presentan las plantas industriales o los recintos cerrados se pueden alejar en mayor o menor medida de la forma rectangular ideal adoptada para obtener las soluciones proporcionadas por el modelo ondulatorio.
- Aunque acotemos el espectro de la señal emitida por la fuente de sonido, la zona del espectro considerada puede contener más de un armónico de importancia emitido por la fuente de sonido que aleje su comportamiento del de una fuente de sonido ideal monofrecuencial.

Estas fuentes de incertidumbre afectarán principalmente al cálculo del factor de ganancia medio del modo principal, y por tanto, al valor máximo \widehat{K}_n de la función del factor de ganancia propuesta.

Otras fuentes de incertidumbre que afectan al modelo son debidas a que los modos de propagación en un recinto real presentan un cierto desfase, una pérdida de amplitud y un amortiguamiento espacial, dado que las superficies de los límites del recinto no son idealmente rígidas, tal como muestra como ejemplo la figura 6.8, en la que se representa el módulo de la presión $|P|$ en función de la coordenada x del robot en el recinto para un modo de tipo axial con n_x distinto de cero.

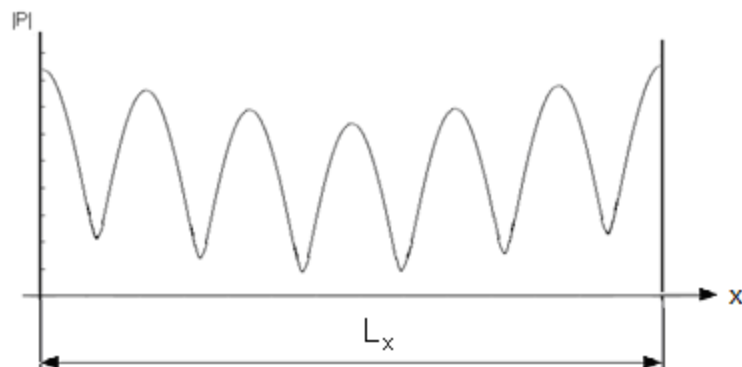


Fig. 6.8. Amplitud de la presión de la onda estacionaria en función de la posición para un modo axial considerando pérdidas.

En la figura 6.8 podemos observar que el ángulo de desfase del modo en los límites del recinto presenta signos opuestos, debido a que las ondas reflejadas en cada pared tienen la misma dirección pero sentidos opuestos. En la misma figura podemos observar también que no encontraremos en un recinto puntos con presión nula, dado que la onda reflejada no tiene la misma energía que la onda incidente, y por tanto no existirá ningún punto del recinto en que la onda reflejada anule por completo a la onda incidente.

Las variaciones de presión que se producen en un recinto real debidas al desfase que se produce en los modos de propagación, las modelizaremos en nuestra función de ganancia mediante la expresión (6.11):

$$K_n(x_m, y_m) = \widehat{K}_n \left[\cos \left(\frac{n_x \pi x_m}{L_x} \pm \phi_x \right) \cos \left(\frac{n_y \pi y_m}{L_y} \pm \phi_y \right) \right] \quad (6.11)$$

En la que ϕ_x y ϕ_y representan el desfase del modo en las direcciones de propagación x e y en el recinto, y que vienen dados por las expresiones ya presentadas anteriormente:

$$\phi_x = \frac{n_x \pi x_d}{L_x} \quad (6.12a)$$

$$\phi_y = \frac{n_y \pi y_d}{L_y} \quad (6.12b)$$

Siendo x_d e y_d los valores del desfase del modo que usualmente expresaremos en cm.

Como podemos observar en las expresiones anteriores, la función de la ganancia del modo principal presentará una sensibilidad muy elevada ante las posibles variaciones de estos ángulos de desfase, de valor mucho mayor que el que produce la variación que se pueda presentar en el valor máximo del factor de ganancia \widehat{K}_n .

Las estimación teórica de la incertidumbre de los ángulos ϕ de desfase de la onda estacionaria en un recinto real generado por los distintos materiales de las superficies absorbentes, presenta dificultades evidentes, considerando que las tablas existentes del coeficiente de absorción de los distintos materiales obtenidos en ensayos en cámaras reverberantes no incluyen este parámetro y considerando además la distribución aleatoria de dichas superficies que se presenta típicamente en los recintos.

En 1993 la ISO presentó la primera edición de la Guía para la expresión de la incertidumbre en la medida (GUM), en ella y en ediciones sucesivas se detalla que la incertidumbre de una medida consta generalmente de varias componentes que pueden agruparse en dos tipos:

- Tipo A: aquellas componentes que se evalúan por métodos estadísticos.
- Tipo B: Aquellas componentes que se evalúan por otros medios.

La incertidumbre tipo B consta de unas componentes que dependen de factores diferentes a los puramente estadísticos, y dada la dificultad que encontramos para realizar la estimación de la distribución de la probabilidad de la incertidumbre en los parámetros correspondientes a los ángulos de desfase de la onda estacionaria del modo principal, podemos establecer que la incertidumbre en estos parámetros de nuestro modelo se engloban dentro de este segundo tipo.

Para la estimación de la incertidumbre de dichos parámetros recurriremos a un intercambio de información entre el modelo y las medidas experimentales realizadas en unas pocas muestras etiquetadas del recinto, y tomaremos como hipótesis de partida a efectos simplificativos en este primer estudio experimental del modelo, una distribución de probabilidad uniforme, con objeto de determinar los valores máximos de incertidumbre correspondientes a los ángulos de desfase del modo de propagación principal, tal como veremos en el apartado de resultados experimentales.

Como hemos señalado en el capítulo 4, al presentar nuestro modelo, el modelo presenta la estructura de un *grey-box model*, en que la mayoría de sus parámetros se obtendrán a partir de expresiones basadas en la descripción del comportamiento físico de la propagación del sonido en un recinto, y en el que requeriremos para efectuar su descripción final de una medida experimental de la ganancia en unas posiciones determinadas o muestras etiquetadas del recinto.

6.5. Sistema de localización en base a los modelos paramétricos.

6.5.1. Introducción.

Independientemente de la diferente concepción del modelo que planteamos para estos sistemas de localización, introduciremos una modificación añadida respecto al sistema de localización presentado para el modelo teórico no paramétrico propuesto anteriormente, con el objetivo principal de reducir el tiempo de computación necesario para la determinación de la posición del robot, dado que la identificación de las distintas funciones de transferencia en las distintas posiciones del robot ya requieren de unos recursos computacionales elevados.

Como hemos visto anteriormente, para la aplicación del modelo teórico hemos dotado al robot de una cámara hemiesférica que permite, mediante el procesado de la imagen, determinar el ángulo que forma la posición del robot respecto al origen de coordenadas y el eje de abscisas adoptados. La orientación de la plataforma hacía la dirección donde se recibe la máxima intensidad de sonido se realizaba simplemente con objeto de aumentar la sensibilidad del sistema de captación del sonido.

La modificación que proponemos en este sistema de localización en base a los modelos paramétricos es la eliminación de la cámara hemiesférica, y por tanto de la necesidad de realizar el procesado de la imagen, y trabajar con el ángulo que nos proporciona la plataforma giratoria cuando está orientada hacia la fuente de sonido, esto nos presentará la importante ventaja de reducir de forma muy acusada el tiempo de computación.

No obstante este sistema presentará una serie de inconvenientes que no se nos presentan de la misma forma en el caso de utilizar la cámara hemiesférica, y que son principalmente los siguientes:

- Debemos asegurar que la altura de la plataforma sea superior que la de los obstáculos presentes en el recinto con objeto de que la generación de sombras acústicas por parte de dichos obstáculos no afecte a la correcta orientación de la plataforma.
- Aunque en la práctica no existe una distancia claramente definida de un receptor acústico respecto a la posición de la fuente de sonido donde podamos asegurar que la influencia del campo directo en la zona del campo reverberado sea completamente nula, si que para recintos de grandes dimensiones y a distancias relativamente elevadas de la fuente de sonido, no sería aconsejable trabajar con este sistema.
- Preferiblemente la zona de trabajo del robot debería estar alejada de las esquinas del recinto, ya que en las proximidades de dichas esquinas se presentarán máximos de presión producidos por las señales reflejadas y que pueden afectar a la correcta orientación de la plataforma.

Con objeto de facilitar el seguimiento de la posición de la fuente de sonido a través de la orientación de la plataforma en las distintas posiciones del robot en el recinto, sería conveniente que la posición inicial del robot esté situada en las proximidades de la ubicación de la fuente de sonido, o en su defecto, asegurar como mínimo una correcta orientación de la plataforma en la posición inicial del robot.

6.5.2. Espacio de características.

Como hemos comentado en capítulos anteriores, en [BOL03] encontramos una referencia de un sistema de autolocalización robótica en recintos cerrados basado en la extracción de características de señales de audio, en el que se trabaja con señales no estacionarias, y la función de transformación que se propone entre el espacio de características y el espacio de medidas se realiza en base a una aproximación polinómica. El modelo de identificación propuesto es el modelo MAX.

El nuevo sistema de localización que proponemos se basa en el modelo ARX que hemos presentado en el capítulo 5 y que viene definido por la siguiente expresión:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t - nk) + e(t) \quad (6.13)$$

Donde $y(t)$ es la salida del sistema, $u(t)$ es la entrada observable del sistema que será la señal emitida por la fuente de sonido y captada en sus inmediaciones, nk es el retardo de la entrada respecto a la salida y $e(t)$ es una señal de ruido blanco.

Los coeficientes del modelo vienen dados por:

$$A(q^{-1}) = 1 - a_1q^{-1} - \dots - a_{na}q^{-na} \quad (6.14a)$$

$$B(q^{-1}) = b_1q^{-1} - \dots - b_{nb}q^{-nb} \quad (6.14b)$$

Los parámetros de los distintos modelos que iremos obteniendo en las distintas posiciones del robot correspondientes a los polos, serán los que utilizaremos como vector de características y que denominaremos X_S :

$$X_S = (a_1, a_2, \dots, a_{na})$$

Para cada señal de entrada correspondiente a una posición del robot se genera un nuevo vector que representa un nuevo punto en el espacio de características, espacio de dimensiones na .

El espacio de características servirá para clasificar las diferentes señales captadas, por ello deberemos conocer con precisión la posición de algunas muestras etiquetadas en lo que denominaremos el espacio de medidas. Cuando el vector correspondiente a una muestra no etiquetada entra en el espacio de características, se computa la distancia que la separa de las muestras etiquetadas, y esta distancia nos servirá para estimar las distancias existentes de la muestra a las muestras etiquetadas en el espacio de medidas.

Por esta razón, necesitamos una función de transformación que convierta la distancia existente en el espacio de características, de dimensiones na , en una distancia en el espacio

bidimensional de medidas. Hay que considerar que la distancia es un valor escalar independientemente de la dimensión del espacio donde haya sido computada.

Para el cálculo de la distancia utilizaremos la distancia Euclídea, y la distancia entre dos muestras, S_i y S_j en el espacio de características se definirá como:

$$d_{fs}(S_i, S_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^{na} (a_{kS_i} - a_{kS_j})^2} \quad (6.15)$$

Donde a_{kS_i} y a_{kS_j} son los coeficientes a de cada RTF obtenidas en las posiciones de las diferentes muestras.

6.5.3. Función de transformación e incertidumbre.

La función de transformación f_t realizará la conversión entre la distancia existente en el espacio de características y la distancia existente en el espacio de medidas. Para obtenerla nos basaremos en unas muestras etiquetadas obtenidas al realizar un muestreo previo del recinto, y calcularemos la distancia entre todas ellas en el espacio de características y la distancia que les corresponde en el espacio físico, y a partir de estos valores interpolaremos la función de transformación

En [BOL08], donde se trabaja con una fuente de sonido no estacionaria, y donde la principal mejora que propondremos se basará en la reducción de posibles soluciones considerando el ángulo de orientación de la plataforma giratoria, como veremos posteriormente, se trabaja con el modelo MAX (Moving Averaging Exogenous) anteriormente expuesto, y se obtiene una función de transformación que se aproxima con el criterio del menor MSE a un polinomio de 4º orden, que viene dado por la expresión (6.16). Referencias a este trabajo también las encontramos en [MAN11].

$$d_{fs} = 9,65 \cdot 10^{10} \cdot d_{xy}^4 + 1,61 \cdot 10^5 \cdot d_{xy}^3 - 8,49 \cdot 10^2 \cdot d_{xy}^2 + 144,9 \cdot d_{xy} + 107,84 \quad (6.16)$$

En esta expresión d_{fs} correspondería a la distancia existente entre muestras en el dominio del espacio de medidas y d_{xy} correspondería a la distancia existente en el dominio del espacio físico.

La representación de esta función viene dada en la figura 6.9.

En [MAN09a] y en trabajos posteriores que hemos realizado, se propone una estructura de la función de transformación con una más directa aproximación física. Esta estructura que proponemos se basa en la consideración de que la variación de la ganancia en un recinto real viene impuesta principalmente por la variación del valor de la autofunción $\psi_n(r_m)$, como hemos visto anteriormente, que es función de la posición del micrófono. Dado que esta función sigue un patrón de variación de tipo sinusoidal como hemos visto también en los capítulos anteriores, es de esperar que la función de transformación sea una función que presente también este patrón de variación de tipo sinusoidal.

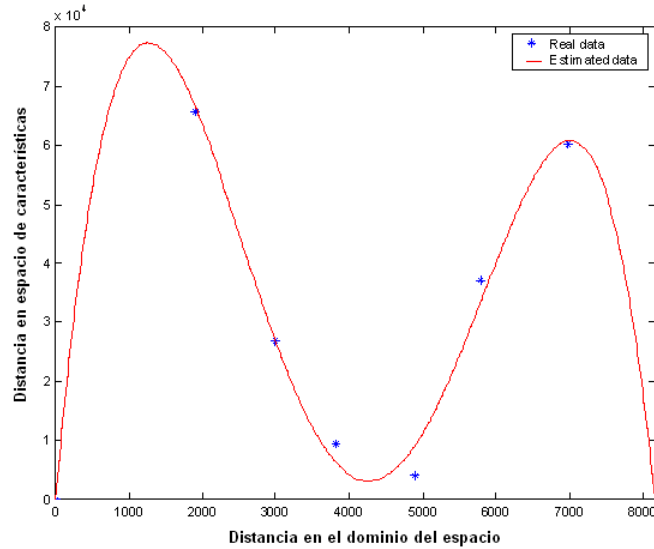


Fig. 6.9. Función de transformación polinómica.

Las distancias euclídeas tanto en el espacio de características como en el espacio de medidas son siempre positivas, ya que no tendría sentido físico el considerar distancias negativas, por lo que teniendo en cuenta estos dos aspectos, en una primera aproximación podemos proponer dos expresiones genéricas para la función de transformación, la primera expresión propuesta vendría dada por:

$$d_{fs} = \left| A_M \sin \left(\frac{2\pi}{T} d_{xy} \pm \phi \right) \right| \quad (6.17)$$

Siendo en esta expresión A_M el valor máximo de la función, d_{xy} la distancia existente en el espacio de medidas, ϕ y T el periodo y el desfase de la función respectivamente, y d_{fs} la distancia existente en el espacio de características.

La segunda expresión que proponemos vendría dada por:

$$d_{fs} = A_M + A_M \sin \left(\frac{2\pi}{T} d_{xy} \pm \phi \right) \quad (6.18)$$

Nos hemos decantado finalmente por la estructura de la expresión (6.18), ya que a diferencia de la expresión (6.17), presenta la ventaja de no presentar discontinuidades en su valor mínimo, hecho que concuerda mucho mejor con el comportamiento físico de la propagación del sonido.

Tal como hemos señalado, a partir del análisis de las muestras etiquetadas y con el criterio de minimización del MSE, obtendremos los valores de los parámetros de la función de transformación nominal, siendo dicha función como podemos ver en su estructura, muy sensible a los parámetros correspondientes al periodo y al ángulo de desfase de la función.

Por ejemplo, en [MAN09a] se trabaja con el sonido proveniente de una cámara climática, y la función de transformación obtenida viene dada por la expresión (6.19):

$$d_{fs} = 2,2 + 2,2\sin\left(\frac{2\pi}{170}d_{xy} - \frac{144\pi}{170}\right) \quad (6.19)$$

La representación de esta función viene dada en la figura siguiente, junto con los valores obtenidos en las muestras etiquetadas:

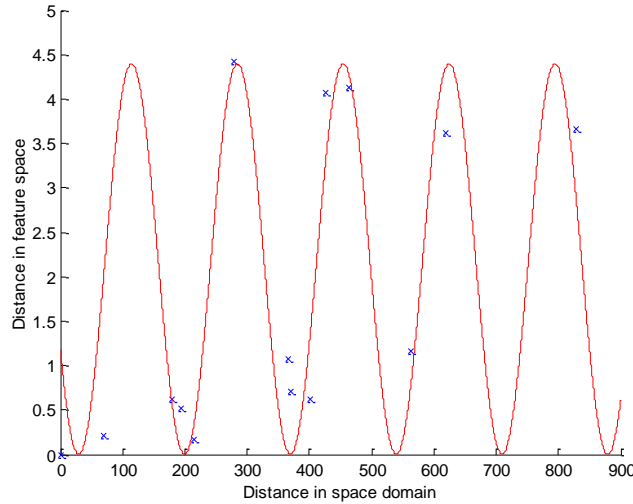


Fig. 6.10. Ejemplo de función de transformación de tipo sinusoidal.

Esta función propuesta proporciona buenos resultados, como veremos en el capítulo de resultados experimentales, aunque hay que considerar que una misma distancia en el dominio de características, nos proporciona varias posibles soluciones en el dominio del espacio, al igual que ocurría con la función de ganancia del modelo teórico, por lo que habría que considerar la posición anterior del robot y/o considerar la posición estimada por otro sensor (por ejemplo como el que ya hemos señalado de tipo odométrico).

Por otro lado, existen numerosas causas de incertidumbre que afectan al sistema de localización, por ejemplo la debida a la imposibilidad de asegurar que la plataforma esté exactamente orientada hacia la fuente de sonido, ya que su orientación dependerá entre otros factores de la sensibilidad de los micrófonos y la de la electrónica asociada, o de lo alejada que se encuentre la posición del robot respecto de la posición de la fuente de sonido, dado que la sensibilidad del sistema respecto al ángulo de giro de la plataforma variará con esta distancia.

Dado que hemos supuesto una variación de tipo sinusoidal en la descripción de la función de transformación, la determinación de los valores nominales correspondientes a su valor máximo, a su periodo y a su ángulo de desfase los realizaremos a partir de la información obtenida en las muestras etiquetadas con el criterio de minimización del error cuadrático medio.

La función de transformación propuesta presenta una gran sensibilidad a la incertidumbre que presentan el periodo y su ángulo de desfase ϕ , como podemos observar en su definición.

En [MAN10] y en trabajos posteriores se estudia el sistema de localización con el sonido proveniente de la insoladora de placas de circuitos impresos y con el sonido proveniente de la cámara climática comentadas anteriormente, proponiéndose unas funciones

de transformación que contemplan la incertidumbre en la determinación de su periodo y en el ángulo de desfase, como veremos en el capítulo de resultados experimentales, siendo por ejemplo la función de transformación propuesta al utilizar la cámara climática como fuente de sonido, la indicada en la expresión (6.20)

$$d_{fs} = 2,2 + 2,2 \sin\left(\frac{2\pi}{170 \pm 50} d_{xy} - \frac{144\pi}{170 \pm 50}\right) \quad (6.20)$$

No obstante, esta forma de reflejar la incertidumbre en la función de transformación presenta la limitación de que no podemos aplicarla en aquellos casos en que nos proporcione soluciones que se correspondan a distancias relativamente elevadas en el dominio del espacio, ya que la incertidumbre aumenta de forma muy acusada con el valor de la distancia que consideremos en dicho dominio.

Una estructura genérica de la función de transformación que evita este problema al mantener el valor de la incertidumbre constante e independiente de la distancia que consideremos en el dominio del espacio, viene dada por la expresión (6.21).

$$d_{fs} = A_M + A_M \sin\left(\frac{2\pi}{T} (d_{xy} \pm d_{inc}) \pm \phi\right) \quad (6.21)$$

En la que ϕ es el ángulo de desfase de la función, d_{xy} es la distancia en el dominio del espacio entre las posiciones analizadas y d_{inc} modeliza la incertidumbre asociada a esta distancia, ambas distancias las expresaremos usualmente en cm.

Para determinar los parámetros que definen a la función de transformación nominal, nos basaremos en un proceso iterativo con el criterio de la minimización del MSE a partir de las muestras etiquetadas, pero podremos tener en cuenta las siguientes consideraciones para facilitar su estimación y confirmar su validez, y que provienen del estudio realizado en el modelo teórico:

- Dado que como hemos visto anteriormente en el modelo teórico, la variación del módulo de la ganancia de las funciones de transferencia del recinto presentaban una variación periódica definida principalmente por el periodo de la función de ganancia del modo principal, esperamos que el periodo de la función de transformación presente un valor próximo al obtenido con el modo principal en el modelo teórico.

- Partiremos de la hipótesis de que el valor de la incertidumbre máxima del parámetro d_{inc} correspondiente a la distancia en el dominio del espacio entre dos posiciones analizadas, y que es provocado por los diferentes desfases que se producen en los modos debido a los diferentes coeficientes de absorción que presentan los límites y los distintos objetos del recinto, presentará un valor aproximadamente igual al que hemos obtenido en la función de ganancia del modo principal del modelo teórico.

Por otro lado, dado que nos encontramos en el mismo caso que nos encontrábamos para estimar la incertidumbre de los ángulos de desfase del modo principal del modelo teórico, para la estimación de la incertidumbre de estos parámetros supondremos también una distribución de la función de probabilidad uniforme, y recurriremos al intercambio de

información entre el modelo teórico de la función y las medidas experimentales realizadas en las muestras etiquetadas del recinto para su determinación.

6.5.4. Determinación de las coordenadas del robot.

En [BOL03] la metodología que se propone para determinar la posición de una muestra no etiquetada es elegir las tres muestras etiquetadas más próximas en el espacio de características y se determina la distancia entre ellas y la muestra no etiquetada en el dominio del espacio a través de la función de transformación.

Idealmente la consideración de estas distancias nos debería proporcionar una única solución, pero debido a las múltiples causas de incertidumbre que afectan al sistema, obtendremos varios puntos posibles como soluciones de la posición del robot, que se corresponderán con los puntos de intersección de los tres circunferencias trazadas con centro en la posición de cada muestra considerada y con radio igual al de la distancia computada entre el robot y la muestra etiquetada proporcionada por la función de transformación. La solución que se adopta finalmente es la obtenida al calcular el centroide formado por el conjunto de puntos que forman las soluciones posibles.

En [BOL08] proponemos una aportación a esta metodología, como hemos señalado anteriormente, a través de la consideración del ángulo de giro de la plataforma, dado que al estar orientada hacia la fuente de sonido nos permitirá reducir el número de soluciones posibles a analizar para determinar la posición del robot.

Por ejemplo, si S_i y S_j son dos muestras etiquetadas, y r_i y r_j son las distancias existentes en el dominio del espacio a la muestra no etiquetada S_k , la intersección de las dos circunferencias que se muestra en la figura 6.11 proporcionará dos soluciones posibles. Para discriminar la solución correcta se considerará el ángulo formado por la plataforma giratoria y la fuente de sonido

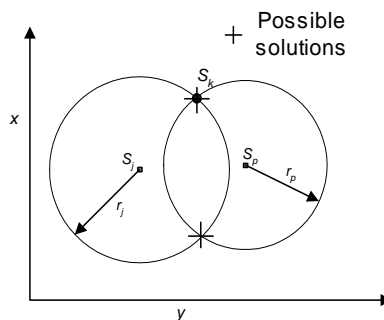


Fig. 6.11. representación geométrica de la intersección de dos circunferencias para determinar la posición de la muestra no etiquetada S_k

La figura 6.12 muestra esta situación de una forma más detallada. Dado que el robot computa el ángulo formado entre él y la fuente de sonido, el problema radica en identificar el punto correcto de la intersección de las dos circunferencias I_1 e I_2 , y para cada uno de ellos se computa el ángulo teórico formado respecto a la fuente de sonido (α_1 y α_2), y este cálculo se puede realizar ya que la posición de la fuente de sonido, es decir sus coordenadas (x_s, y_s) son conocidas.

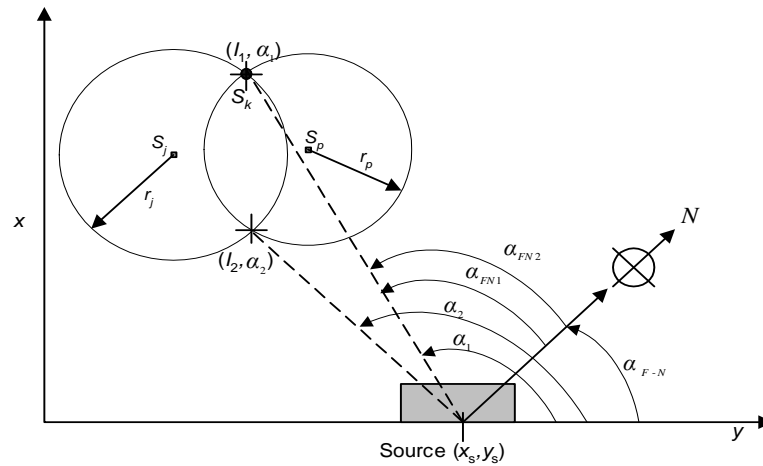


Fig. 6.12. Computación de los ángulos a considerar para la determinación de la posición de la muestra no etiquetada S_k

Los ángulos α_1 y α_2 se determinarán mediante las expresiones:

$$\alpha_1 = \arctg \frac{y_{I_1} - y_s}{x_{I_1} - x_s} \quad (6.22a)$$

$$\alpha_2 = \arctg \frac{y_{I_2} - y_s}{x_{I_2} - x_s} \quad (6.22b)$$

Estos ángulos deben ser corregidos respecto al norte con objeto de tener el mismo *offset* que el ángulo computado a bordo del robot, mediante las expresiones:

$$\alpha_{FN1} = \alpha_1 - \alpha_{F-N} \quad (6.23a)$$

$$\alpha_{FN2} = \alpha_2 - \alpha_{F-N} \quad (6.23b)$$

Siendo α_{F-N} el ángulo formado por el recinto respecto al norte magnético.

Finalmente, para determinar la solución correcta, sólo es necesario encontrar el ángulo teórico que proporcione un valor más próximo al ángulo computado por la plataforma del robot.

Por tanto, para la determinación de la posición del robot en el recinto, utilizaremos la siguiente metodología:

1) El robot capta la señal de audio en su posición actual y realiza el proceso de identificación tomando como señal de entrada al sistema la señal filtrada de la fuente de sonido y como señal de salida la señal captada y filtrada en su posición. Los parámetros correspondientes a los polos obtenidos en este proceso de identificación serán los que se utilizarán como vector de características para las etapas siguientes.

2) Se determinan las distancias euclideas en el espacio de características entre este vector de características y los vectores de características de las distintas muestras etiquetadas.

3) Se eligen las dos muestras más próximas al robot en el espacio de características y se determina la distancia entre ellas y el robot en el dominio del espacio a través de la función de transformación, esto nos proporciona dos posibles soluciones que vienen dadas por la intersección de las dos circunferencias en el dominio del espacio.

4) Dichos puntos de intersección formarán unos ángulos teóricos de orientación del robot respecto a la fuente de sonido que se compararán con el ángulo real obtenido por la plataforma giratoria de los micrófonos, tomando como solución el punto de intersección teórico en el que más se aproxime el ángulo calculado al ángulo medido proporcionado por la plataforma.

En los trabajos realizados en [MAN09a], [MAN10], [MAN11], [MAN12] y [MAN14] los pasos 3 y 4 se realizan con todas las muestras etiquetadas, dado que aunque aumente el número de posibles soluciones a considerar para determinar la posición del robot, se escogerá la solución que proporcione una mejor aproximación al ángulo medido proporcionado por la plataforma, mejorando la exactitud del sistema de localización, como veremos en el capítulo de resultados experimentales.

En la figura 6.13 se muestra el diagrama funcional del sistema de localización, que incluye el bloque de filtrado, la extracción de los coeficientes de los modelos, el cálculo de las distancias en el espacio de características y el bloque de reconocimiento de la posición.

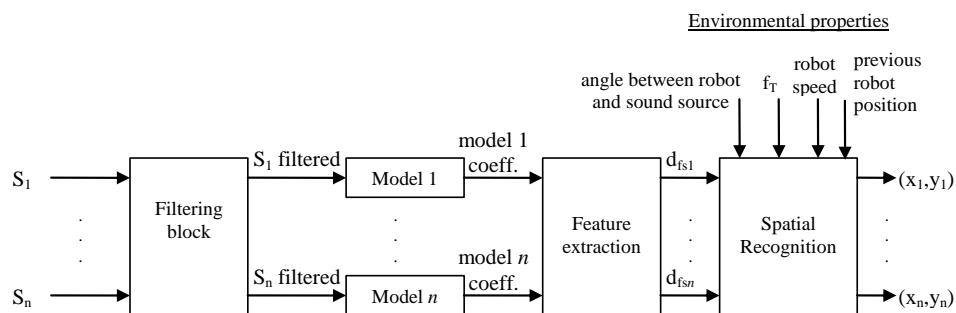


Fig. 6.13. Diagrama funcional del sistema de localización.

Para la determinación de una posición concreta del robot, el algoritmo de localización determinará las soluciones proporcionadas por la función de transformación nominal y por los valores extremos del intervalo de incertidumbre, de forma que obtendremos seis soluciones posibles en el espacio de medidas al interseccionar las circunferencias correspondientes a las distancias calculadas existentes entre la posición del robot analizada y las dos muestras etiquetadas consideradas.

La incertidumbre teórica máxima se produciría en el caso de que las intersecciones entre las circunferencias fueran perpendiculares, tal como muestra como ejemplo la figura 6.14, dado que las posibles soluciones presentarían una distancia máxima de separación entre ellas, la selección de la solución que adoptaremos como correcta de las seis posiciones posibles será aquella que forme un ángulo respecto a la fuente de sonido que se aproxime más al ángulo real indicado por la plataforma.

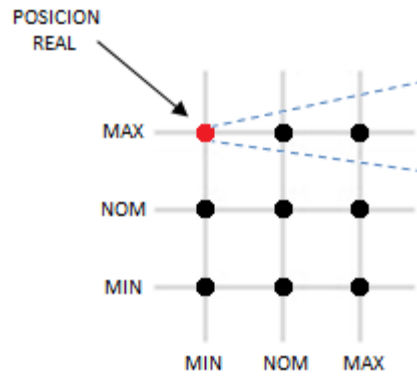


Fig. 6.14. Ejemplo del conjunto de posibles soluciones proporcionadas por el sistema de localización para una posición del robot.

Una nueva fuente de incertidumbre la encontraríamos si tres o más de las posibles soluciones se encontrarán alineadas aproximadamente en la misma dirección que la que indica el ángulo de orientación de la plataforma, como por ejemplo se indica en la figura 6.14, y la posición real del robot se ubicara en una posición muy próxima a la posición de alguna de las soluciones extremas, tal como se indica también en la figura, en la que el máximo error se produciría en la determinación de la coordenada x . Una situación similar encontraríamos al plantearnos el máximo error que se produciría en la determinación de la coordenada y .

En estos casos, en el que encontramos más de una solución teórica posible considerando el ángulo de orientación de la plataforma, el algoritmo de localización tomará como solución el resultado de realizar el promedio de las posibles soluciones.

CAPÍTULO 7: Resultados experimentales

7.1.- Recinto de experimentación y fuentes de sonido.

La vista en planta del recinto donde se realizaron la mayoría de los ensayos experimentales es la que se muestra esquemáticamente en la figura 7.1 en la que se señala también la ubicación de las dos fuentes de sonido utilizadas en los ensayos. El recinto es un laboratorio docente de ensayos de componentes y circuitos electrónicos que también se dedica a la fabricación de placas de circuitos impresos, por lo que dispone de una sala interna aislada para la manipulación de los productos químicos necesarios para su fabricación.

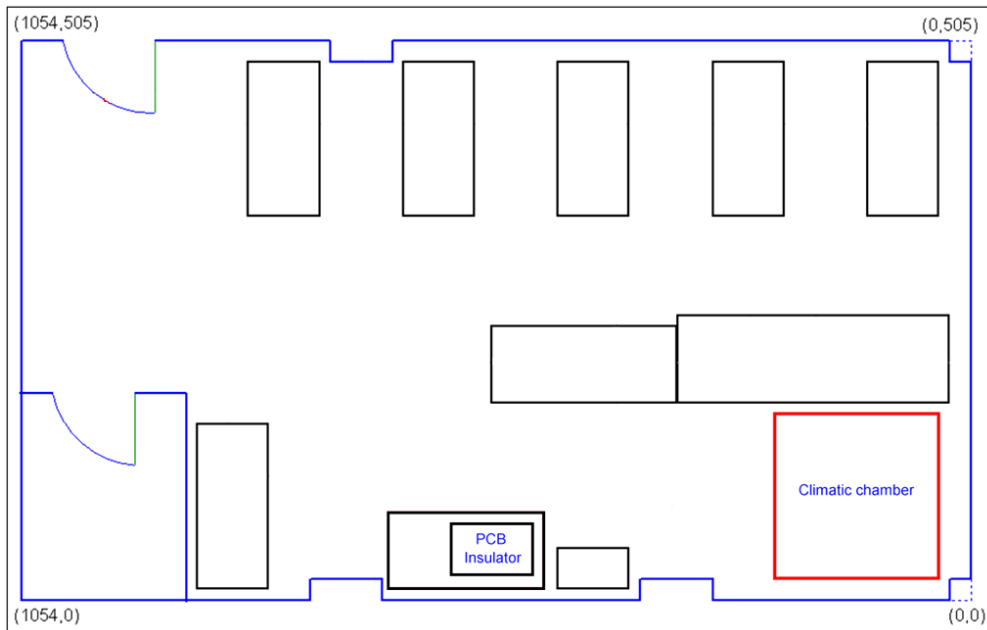


Fig. 7.1 Vista en planta del recinto de experimentación.

El laboratorio contiene 9 mesas, una de ellas con una longitud casi doble a la del resto de mesas y con una anchura aproximadamente igual que ellas, 18 taburetes que se ubican debajo de las mesas cuando el laboratorio no está ocupado, una cámara climática dedicada a la realización de ensayos climáticos de componentes y equipos electrónicos, una insoladora para la realización de placas de circuitos impresos (PCB). así como un armario metálico.

Aunque la forma que presenta el recinto es aproximadamente rectangular, es de destacar que presenta un tipo de techo abovedado.

Las dimensiones del recinto son las siguientes:

- Altura máxima del arco: 5 m
- Altura mínima del arco: 3,8 m
- Anchura máxima: 5,05 m
- Anchura mínima: 3,12 m
- Longitud máxima: 10,54 m
- Longitud mínima: 8,35 m

- Superficie total: 222,72 m²

- Volumen calculado a partir de la altura media del recinto y descontando el volumen de la sala de manipulación de productos químicos: 215,6 m³

Es importante destacar que la pared lateral contigua a la sala interna de manipulación de productos químicos no llega hasta el techo del recinto, y tiene una altura de 2,5 metros, lo que provoca la presencia de una apertura a lo largo de toda su longitud.

En la figura 7.2 se muestra una panorámica del recinto de experimentación. En esta figura podemos observar la presencia de los numerosos objetos, como por ejemplo las mesas de trabajo del laboratorio, que complican la modelización acústica del recinto.



Fig. 7.2. Recinto de experimentación.

En la figura 7.3 se muestra la sala interna para la manipulación de los productos químicos ubicada en el interior del recinto.



Fig. 7.3. Sala interna de manipulación de productos químicos.

En la figura 7.4 se muestra la forma abovedada del techo del recinto.



Fig. 7.4. Techo del recinto

En la figura 7.5 se muestra la abertura que presenta la pared lateral contigua a la sala interna de manipulación de productos químicos.



Fig. 7.5. Apertura lateral.

En el laboratorio, como hemos comentado, existe una cámara climática dedicada a la realización de ensayos climáticos de componentes y equipos electrónicos, que contiene un compresor y un ventilador interno para la recirculación de aire, y una insoladora para la realización de placas de circuitos impresos (PCB), que serán las que utilizaremos como fuentes de sonido.

La cámara climática utilizada como fuente de sonido y la insoladora de placas de circuito impreso se muestran en las figura 7.6 y 7.7 respectivamente.



Fig. 7.6. Cámara climática



Fig. 7.7. Insoladora de placas de circuitos impresos.

La selección del origen de coordenadas se sitúa en la esquina del recinto más próxima a la cámara climática, en el extremo opuesto a la puerta de entrada, dado que las paredes contiguas a esta posición no presentan ningún tipo de apertura.

Las coordenadas de estas fuentes de sonido estimadas a partir de la posición de los motores de ambas fuentes son de (537,85) cm para la insoladora de PCB y (94,60) cm para la cámara climática.

Los ensayos se han realizado en ausencia de alumnos o de operarios en el recinto y con un nivel de ruido de fondo despreciable, y la temperatura ambiental se ha situado en el intervalo comprendido entre 18 y 23 °C en todos los ensayos.

7.2. Posiciones de las muestras y del robot analizadas.

Para la selección de las posiciones de las muestras etiquetadas, que han sido distribuidas uniformemente por el recinto en ubicaciones cercanas a las posibles trayectorias del robot, se han seguido las recomendaciones de la norma ISO 3382 en cuanto a su separación y en cuanto a que las posiciones han sido distribuidas relativamente alejadas de los límites del recinto, tal como se indica en la tabla 7.1 donde se indican sus coordenadas y las distancias y ángulos que forman respecto al origen de coordenadas y el eje de abscisas adoptado.

Es importante recordar en este punto que trabajaremos con un número de muestras reducido, con objeto de comprobar la posible viabilidad de nuestro sistema de localización en técnicas de SLAM, en las que el robot debería ser capaz de construir el mapa acústico del recinto a partir de un número reducido de muestras.

Posición Muestra	M1	M2	M3	M4	M5
Localización (cm)	(819,461)	(654,325)	(474,325)	(474,255)	(294,255)
Distancia (cm)	939,8	730,3	574,7	538,2	389,2
θ	29,37°	26,42°	34,44°	28,28°	40,94°

Tabla 7.1. Coordenadas, distancias y ángulos al origen de las muestras etiquetadas.

Las coordenadas de las posiciones del robot analizadas y las distancias y los ángulos que forman respecto al origen de coordenadas se indican en la tabla 7.2.

Posición Robot	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Localización (cm)	(974,461)	(974,325)	(819,255)	(654,255)	(654,105)	(474,105)	(294,105)
Distancia (cm)	1077.6	1026.8	857.8	702.0	662.4	485.5	312.2
θ	25,33°	18,45°	17,29°	21,30°	9,12°	12,49°	19,65°

Tabla 7.2. Coordenadas, distancias y ángulos respecto al origen de las posiciones del robot analizadas.

Las distintas señales se han registrado mediante la plataforma giratoria ubicada en el robot, y La incertidumbre en la determinación de las posiciones de las muestras y en la determinación de las posiciones del robot es debida a que la posición del micrófono de captación de la señal de audio no coincide con el centro geométrico del robot, que es el punto que adoptamos inicialmente para situarlo en las distintas posiciones, y por tanto esta distancia de separación, de 17,1 cm, generará una incertidumbre máxima de $\pm 17,1$ cm en función de la orientación del robot en el momento en que efectúa la captación de la señal.

La brújula electrónica utilizada para la determinación de ángulo formado por el micrófono del robot respecto al origen de coordenadas presenta un error estático máximo de $\pm 0,25^\circ$, y la cámara utilizada tiene una resolución mínima de 1536 pixels, lo que nos proporciona una incertidumbre máxima de $0,117^\circ/\text{pixel}$, por lo que la incertidumbre total que adoptaremos para la determinación del ángulo será de $\pm 0.367^\circ$.

El robot tiene como objetivo desplazarse desde la puerta de entrada del laboratorio hasta una ubicación próxima a las fuentes de sonido, manteniendo siempre que le sea posible un sentido de avance que tienda a reducir la distancia existente entre su posición actual y el origen de coordenadas, tal como se muestra en la figura 7.8, donde se indican las posiciones del robot analizadas y las posiciones de las fuentes de sonido.

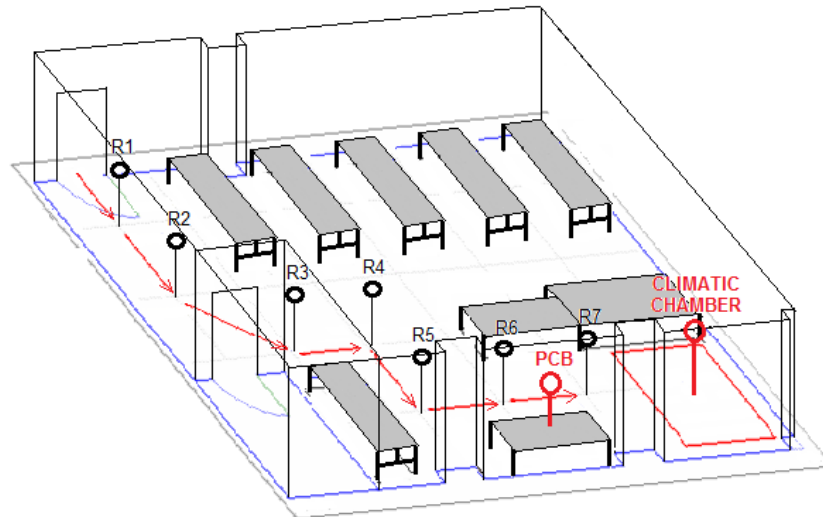


Fig. 7.8. Posiciones analizadas del robot en el recinto de experimentación.

En la figura 7.9 se señalan conjuntamente de forma aproximada en la vista en planta del laboratorio, las posiciones del robot analizadas, indicadas como R1, R2,...R7 y las posiciones de las muestras, indicadas como M1, M2,...,M5

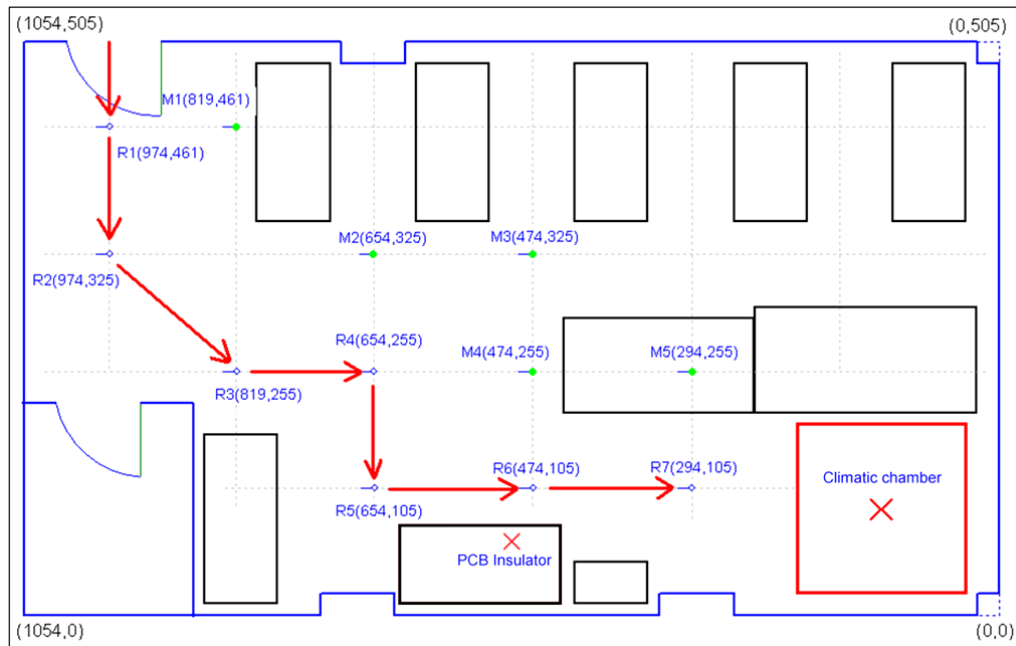


Fig. 7.9. Posiciones de las muestras y posiciones analizadas del robot en el recinto de experimentación.

Las señales de audio emitidas por las fuentes de sonido funcionando en régimen continuo presentan un valor medio de presión aproximadamente constante en los intervalos de tiempo de operación del robot en el recinto, como se ha comprobado experimentalmente, por lo que las consideraremos como fuentes estacionarias de sonido y no nos será necesario

recurrir a la generación de una señal específicamente dedicada a nuestro sistema de localización.

No obstante, se debería realizar un proceso de calibrado del sistema de localización del robot a intervalos de tiempo regulares, efectuando la medida de la presión media de la señal emitida por la fuente de sonido, con objeto de contemplar las posibles variaciones de la amplitud de la señal emitida debidas a procesos como por ejemplo los provocados por el desgaste mecánico de sus elementos.

También podemos considerar que si el punto de partida del movimiento del robot en el recinto lo situamos en un punto próximo al de la ubicación de la fuente de sonido, éste podría realizar el calibrado del sistema cada vez que iniciara su periodo de trabajo.

7.3. Caracterización acústica del recinto.

Todos los ensayos han sido realizados con el laboratorio desocupado, a una temperatura ambiente próxima a la temperatura de 20 °C y con un nivel de ruido de fondo despreciable.

La caracterización acústica teórica del recinto la realizaremos suponiendo que el laboratorio se encuentra desocupado, para una temperatura ambiente de 20 °C y suponiendo un nivel de ruido de fondo despreciable. En estas condiciones los distintos parámetros obtenidos son los siguientes:

- Absorción sonora total del recinto:

Calculada con los coeficientes de absorción de los distintos materiales tabulados a una frecuencia de 125 Hz, que es una frecuencia muy próxima a las componentes frecuenciales de baja frecuencia del espectro de las señales emitidas por las fuentes de sonido:

$$A = \sum_i A_i = \sum_i S_i a_i = 48,39 \text{ m}^2 \quad (7.1)$$

- Coeficiente de absorción medio:

$$\bar{a} = \frac{1}{S_T} \sum_i S_i A_i = \frac{48,39}{222,72} = 0,2173 \quad (7.2)$$

Al ser menor de 0,25 se puede admitir la aplicación de la ecuación de Sabine como una buena aproximación.

- Tiempo de reverberación teórico:

Calculado a partir de la ecuación de Sabine a la temperatura de 20 °C:

$$T_r = \frac{0,161 \cdot V}{A} = \frac{0,161 \cdot 215,6}{48,39} = 0,7173 \text{ (s)} \quad (7.3)$$

Por otro lado, la distancia a la fuente a partir de la que empieza a ejercer influencia el campo directo será:

$$r < \sqrt{\frac{A}{16\pi}} \quad (7.4)$$

$$r < \sqrt{\frac{48,39}{16\pi}}$$

$$r < 0,9811 \text{ (m)}$$

- Ganancia teórica media:

La ganancia teórica media del recinto calculada a una temperatura ambiente de 20 °C y a la frecuencia de 125 Hz, viene dada por la expresión (7.5) presentada anteriormente:

$$|\bar{H}(\omega, r_m)| = \left| \frac{P_m(r_m)}{P(r)} \right| = \sqrt{\frac{T_r c_o 4\pi r^2}{13,8V}} \quad (7.5)$$

Como hemos comentado en capítulos anteriores, la distancia r a la que efectuamos la medida de la presión radiada por la fuente de sonido se ha de situar dentro del campo directo, es decir, a una distancia menor de 0,9811 cm, pero a una distancia prudencial de la fuente como para evitar una influencia excesiva del campo próximo generado por ella.

La señal emitida por la insoladora adoptada como señal de referencia para nuestra RTF se capta a una distancia de 0,7 metros del centro de la cara frontal de la fuente, dentro del campo cercano y evitando además la saturación del sistema electrónico de captación, presentando un nivel de presión sonora a esta distancia de 79,2094 dB.

La ganancia media teórica toma el siguiente valor:

$$|\bar{H}(\omega, r_m)| = \left| \frac{P_m(r_m)}{P(r)} \right| = \sqrt{\frac{0,7173 \cdot 343 \cdot 4\pi \cdot 0,7^2}{13,8 \cdot 215,6}} = 0,7136$$

La señal emitida por la cámara adoptada como señal de referencia se capta a una distancia de 0,65 metros del centro de la cara frontal de la fuente, presentando un nivel de presión sonora de 73,5521 dB a esta distancia.

La ganancia media teórica toma el siguiente valor:

$$|\bar{H}(\omega, r_m)| = \left| \frac{P_m(r_m)}{P(r)} \right| = \sqrt{\frac{0,7173 \cdot 343 \cdot 4\pi \cdot 0,65^2}{13,8 \cdot 215,6}} = 0,6626$$

- Frecuencia de cruce de Schroeder.

La frecuencia de cruce viene dada por la expresión (7.6):

$$f_c = \sqrt{\frac{3c^3 T_r}{8,8\pi V}} \quad (7.6)$$

Que aplicada a nuestro recinto nos proporciona el siguiente resultado:

$$f_c = \sqrt{\frac{3.343^3 \cdot 0,7173}{8,8 \cdot \pi \cdot 215,6}} = 120,7012 \text{ Hz}$$

7.4. Adquisición, filtrado de las señales y selección de los modos.

Para todos los ensayos experimentales salvo los correspondientes al modelo paramétrico MAX, la altura a la que se posiciona el micrófono del robot es de 70 cm, el micrófono utilizado es de tipo cardioide de uso general y de tipo capacitivo, con una sensibilidad de 2 mV/Pa (-54 dB). El micrófono como hemos señalado se orienta hacia la dirección en que la intensidad del sonido es máxima y la captura de la señal se realiza a una frecuencia de muestreo de 44,1 kHz.

La señal emitida por la insoladora y captada a una distancia de 0,7 metros es la que se muestra en la figura siguiente:

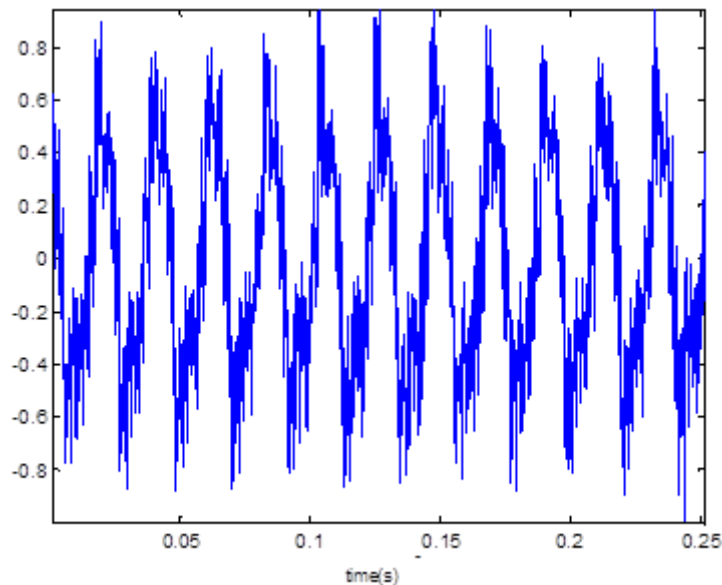


Figura 7.10 Señal emitida por la insoladora.

El espectro de la señal discretizada emitida por la insoladora se muestra en la figura 7.11, en la que se indica el valor eficaz de las diferentes componentes frecuenciales de la onda de presión:

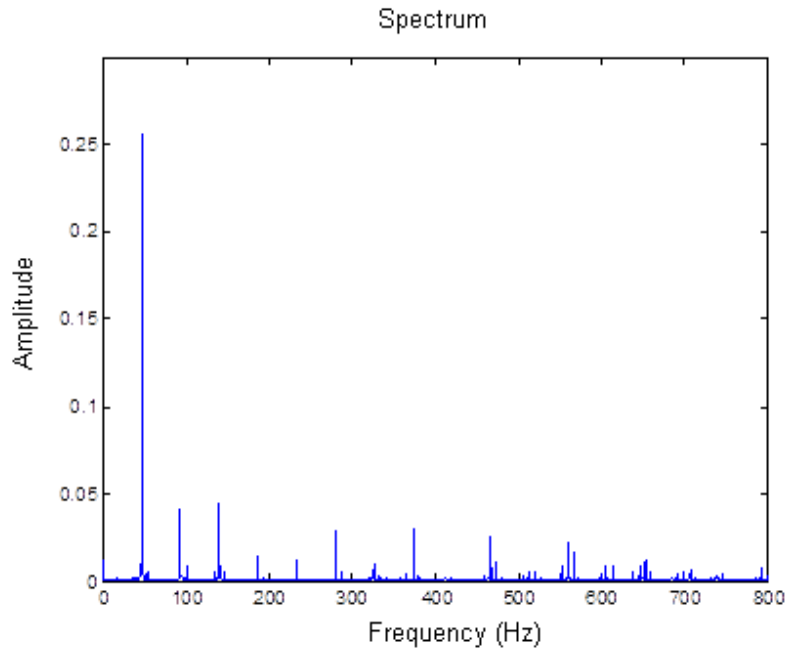


Figura 7.11. Espectro de la señal emitida por la insoladora.

Seleccionaremos la componente espectral cuya frecuencia sea más próxima a la frecuencia de cruce, y no muy alejada de ella, con objeto de no perder sensibilidad para la determinación del modo o de los modos más significativos, esta componente se encuentra en 93,2 Hz.

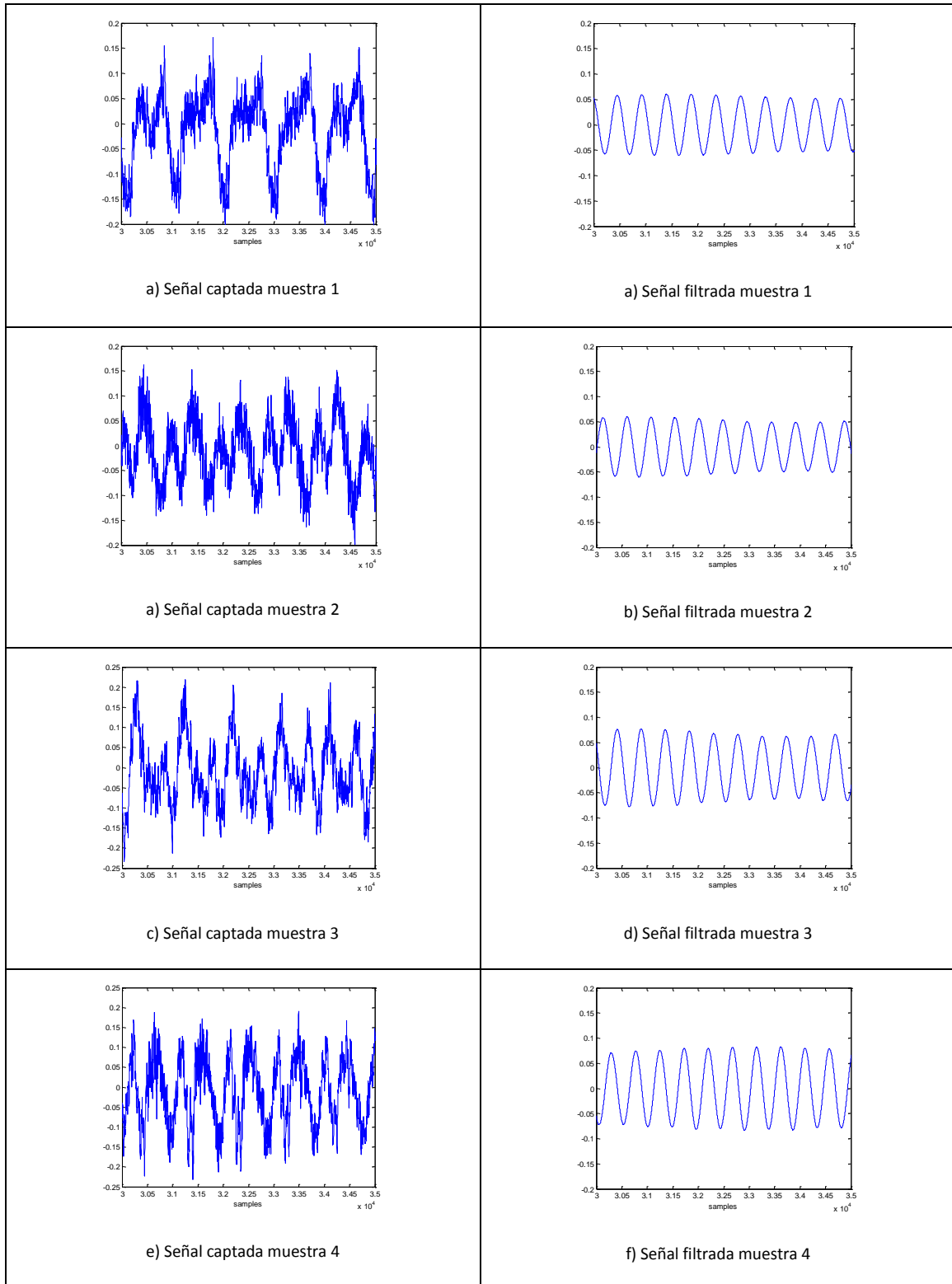
Para la selección de la estructura del filtro nos decantamos por un filtro digital de Cauer (elíptico), ya que este tipo de filtros presentan una zona de transición entre la banda de paso y la banda atenuada muy estrecha, y requieren de un orden menor que el que requerirían otras estructuras para cumplir con las especificaciones, como las estructuras de Chebyshev o Butterworth, optimizando así el tiempo de computación, aunque estos filtros tengan la desventaja de presentar una fase no lineal.

Por tanto, aplicaremos un filtrado de tipo pasabanda, que realizamos con un filtro digital de Cauer con una atenuación máxima en la banda de paso de 0,5 dB, de forma que para implementarlo no requeriremos de un orden del filtro excesivamente elevado.

El filtro requerido para unas frecuencias de corte situadas en 85,2 Hz y en 99,7 Hz (ancho de banda de 14,5 Hz) será de sexto orden, y el filtrado se aplica con objeto de que la fuente pueda ser tratada por nuestro modelo con un comportamiento similar a la de una fuente monofrecuencial y para reducir el número de modos a considerar por el modelo. Los coeficientes de absorción que presentaran los distintos materiales a la frecuencia de 93,2 Hz se encontrarán muy próximos a los suministrados por las tablas existentes a una frecuencia de 125 Hz, dado que la variación de los coeficientes de absorción de los materiales en el rango de las bajas frecuencias es muy pequeña.

En las figuras siguientes se muestran las señales captadas y las señales filtradas en las distintas posiciones de las muestras M1, M2, M3, M4 y M5.

7. Resultados experimentales



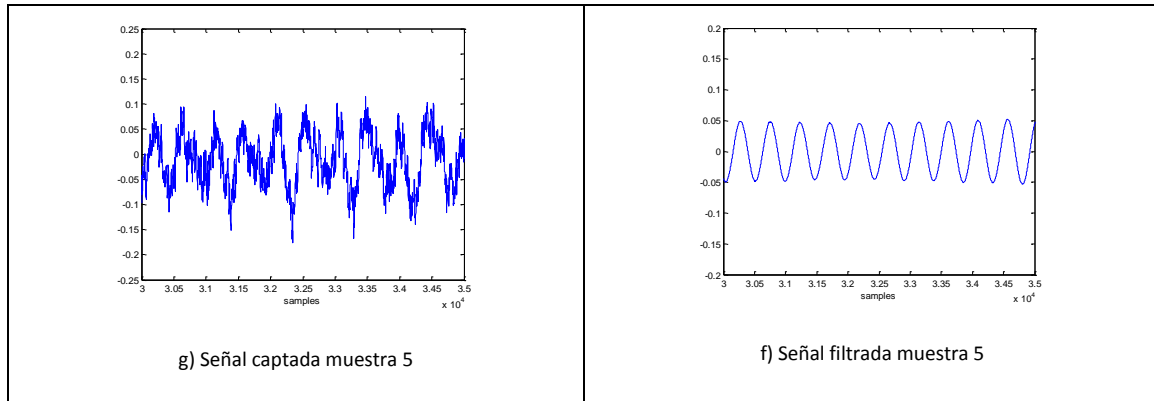


Fig. 7.12. Señales captadas (izquierda) y señales filtradas (derecha) de la insoladora.

A la frecuencia seleccionada de 93,2 Hz le corresponde a una longitud de onda para la señal a 20 °C de:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} = \frac{343}{93,2} = 3,6803 \text{ m} \quad (7.7)$$

La frecuencia propia de los modos posibles que tenemos en el recinto vienen dados por la expresión (5) ya presentada anteriormente:

$$f_{n_x, n_y, n_z} = \sqrt{\left(\frac{n_x c}{2L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y c}{2L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z c}{2L_z}\right)^2} \quad (7.8)$$

Tal como hemos comentado, esta fórmula proporciona las soluciones para un recinto rectangular ideal. Nosotros la tomaremos como una solución aproximada para nuestro recinto considerando una altura igual a la altura media del recinto de 4,4 m, una longitud igual a la longitud máxima del recinto de 10,54 m y una anchura igual a la anchura máxima de 5,05 m.

Los modos a considerar dentro de este margen de frecuencias serán los indicados en la tabla 7.3:

n_x	n_y	n_z	f_n
1	1	2	86,57
5	1	0	88,16
5	0	1	90,21
2	1	2	91,05
3	0	2	91,98
3	2	1	92,28
4	2	0	94,07
5	1	1	96,39
6	0	0	97,63
3	1	2	98,05

Tabla 7.3. Modos considerados para la insoladora.

La señal emitida por la segunda fuente de sonido, la cámara climática, y captada a una distancia de 0,65 metros es la que se muestra en la figura siguiente:

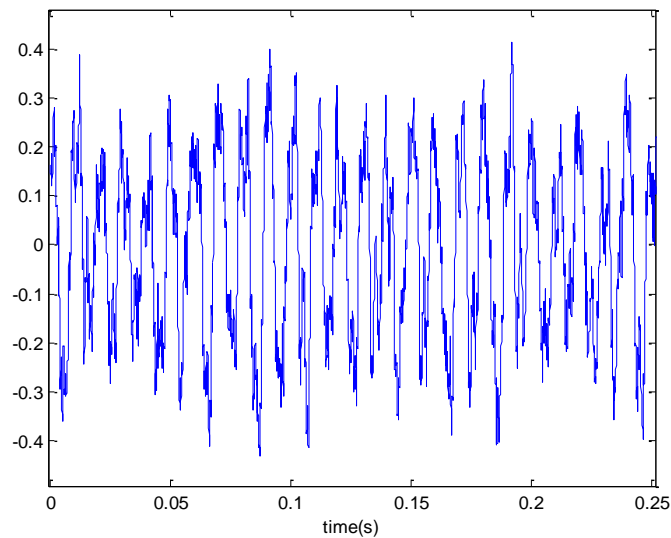


Figura 7.13. Señal emitida por la cámara climática.

El espectro de la señal discretizada se muestra en la figura 7.14, en la que se indica el valor eficaz de las diferentes componentes frecuenciales:

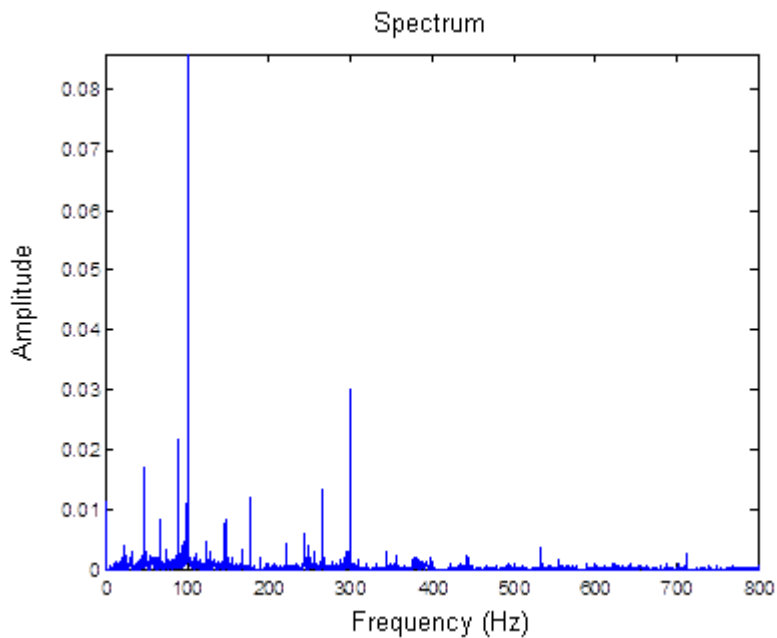


Figura 7.14. Espectro de la señal emitida por la cámara climática.

La frecuencia de la componente del espectro más próxima a la frecuencia de cruce de Schroeder se encuentra en este caso en 99,97 Hz, y aplicaremos también un filtrado

pasabanda alrededor de esta frecuencia realizado con el mismo filtro digital de Cauer que el utilizado con la anterior fuente de sonido, buscando el atenuar la componente de 89 Hz próxima a nuestra frecuencia de interés, componente que se puede observar con más detalle en la figura 7.15, con objeto de aproximar lo más posible el comportamiento de la fuente al comportamiento de una fuente monofrecuencial.

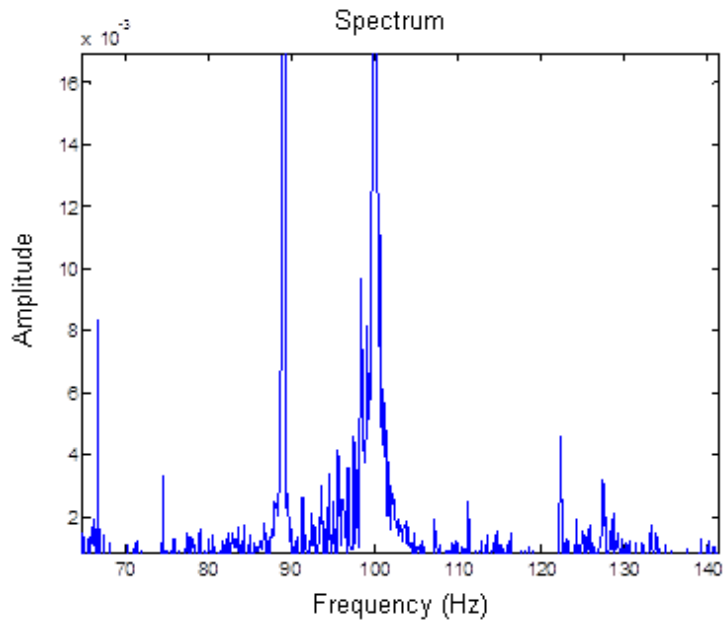


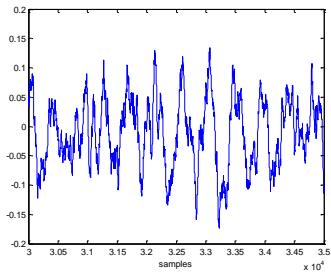
Figura 7.15. Detalle del espectro de la señal emitida por la cámara climática.

En la figura siguiente 7.16 se muestran las señales captadas y las señales filtradas en las distintas posiciones de las muestras M1, M2, M3, M4 y M5.

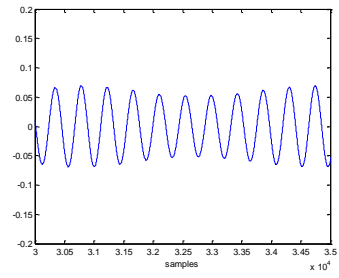
A la frecuencia seleccionada de 99,97 Hz le corresponde a una longitud de onda para la señal a 20 °C de:

$$\lambda = \frac{c_o}{f} = \frac{343}{99.97} = 3,4310 \text{ m}$$

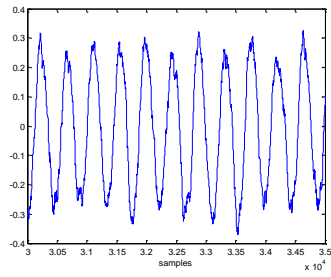
7. Resultados experimentales



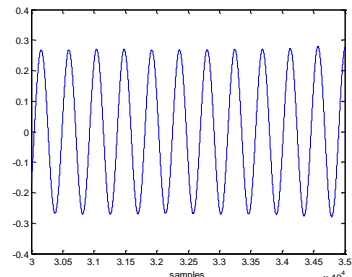
a) Señal captada muestra 1



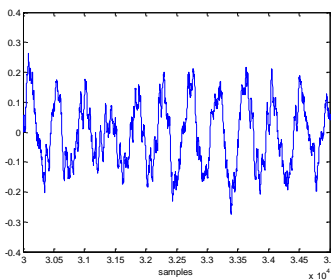
a) Señal filtrada muestra 1



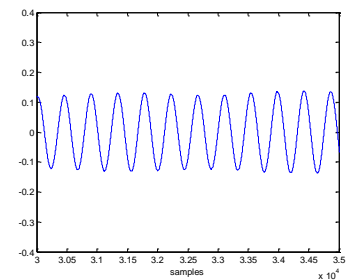
a) Señal captada muestra 2



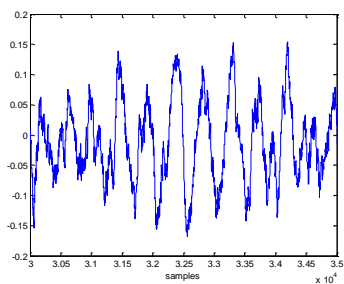
b) Señal filtrada muestra 2



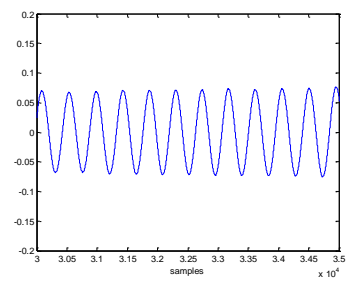
c) Señal captada muestra 3



d) Señal filtrada muestra 3



e) Señal captada muestra 4



f) Señal filtrada muestra 4

7. Resultados experimentales

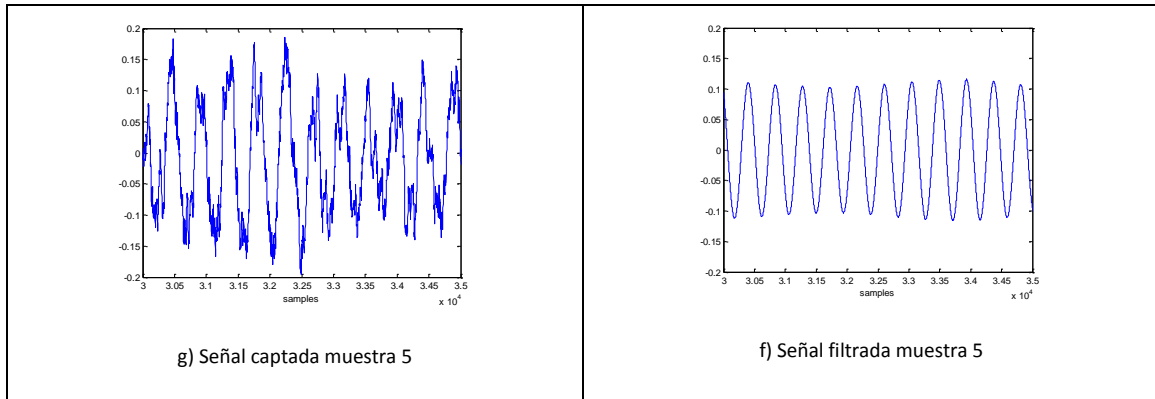


Fig. 7.16. Señales captadas (izquierda) y señales filtradas (derecha) de la cámara climática.

Los modos a considerar dentro de este margen de frecuencias serán los indicados en la tabla 7.4:

n_x	n_y	n_z	f_n
4	0	2	101,55
4	2	1	101,83
0	3	0	101,88
1	3	0	103,17
6	1	0	103,37
0	2	2	103,39
1	2	2	104,67
6	0	1	105,12
5	2	0	105,98
2	3	0	106,95
4	1	2	107,08
2	2	2	108,39
0	3	1	109,08
1	3	1	110,29
6	1	1	110,47
5	0	2	112,68
5	2	1	112,92
3	3	0	112,97
2	3	1	113,83
7	0	0	113,90
3	2	2	114,34

Tabla 7.4. Modos considerados para la cámara climática.

7.5. Modelo teórico de función de transferencia.

En los apartados siguientes expondremos el estudio experimental realizado del sistema de localización para ambas fuentes de sonido en base al modelo teórico.

7.5.1. Fuente de sonido: insoladora PCB.

7.5.1.1. Cálculo del factor de ganancia de los modos.

A continuación realizaremos el cálculo teórico del factor de ganancia medio \overline{K}_n de los modos con las expresiones (4.40), (4.41) y (4.42), considerando las coordenadas de las muestras y el valor de la ganancia teórica media calculada con la expresión (7.5). Esto nos permitirá calcular el módulo de la ganancia teórica en las posiciones de las muestras para cada modo dado por la expresión (4.36), y lo compararemos con los valores experimentales de la ganancia obtenidos en dichas posiciones, con objeto de seleccionar el modo principal que definirá nuestro modelo.

En primer lugar, indicaremos en la tabla 7.5, para cada modo seleccionado en el proceso de filtrado, el factor de ganancia medio teórico y el módulo de la ganancia teórica calculados con nuestro modelo en las distintas posiciones de las muestras:

n_x	n_y	n_z	f_n	\overline{K}_n	$G(M1)$	$G(M2)$	$G(M3)$	$G(M4)$	$G(M5)$
1	1	2	86,57	601,1515	2,6850	0,5876	0,2501	0,0089	0,0363
5	1	0	88,16	158,0804	1,9598	0,8996	0,6735	0,024	0,011
5	0	1	90,21	59,7845	0,9197	0,9325	0,6982	0,6982	0,3193
2	1	2	91,05	339,2645	0,6372	1,2401	1,6217	0,0579	0,011
3	0	2	91,98	85,4740	0,5647	1,012	0,5093	0,5093	0,9725
3	2	1	92,28	62,7249	0,5919	0,7702	0,3876	0,6249	1,1932
4	2	0	94,07	46,3662	0,9322	0,0406	0,5793	0,9339	1,0817
5	1	1	96,39	139,0081	1,9598	0,8996	0,6735	0,024	0,011
6	0	0	97,63	87,0788	0,6177	0,8160	0,7387	0,7387	0,6568
3	1	2	98,05	439,7771	1,5773	1,2797	0,6441	0,0230	0,0439

Tabla 7.5. Cálculo teórico del factor de ganancia medio

Con objeto de identificar el modo principal en las distintas posiciones de las muestras, calcularemos el error relativo y el error cuadrático medio (MSE) para cada modo.

El error relativo, lo calcularemos mediante la expresión:

$$\varepsilon(\%) = \frac{G_T^i - G_R^i}{G_R^i} \quad (7.9)$$

Donde G_T^i es el valor de ganancia teórica calculado con nuestro modelo en la muestra i , y G_R^i es el valor de ganancia obtenido experimentalmente en el recinto en la muestra i .

7. Resultados experimentales

Los valores de la ganancia experimental obtenidos en las muestras etiquetadas del recinto para esta fuente de sonido son los indicados en la tabla 7.6:

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5
Ganancia	0,6519	0,6541	0,8252	0,9277	0,6004

Tabla 7.6. Valores de la ganancia experimental en las posiciones de las muestras.

A partir de estos valores experimentales, en la tabla 7.7 se indica el error relativo a la ganancia experimental para cada posición de las muestras, y el error cuadrático medio (MSE) calculado para los diferentes modos, destacando los errores relativos mínimos obtenidos en las diferentes posiciones:

n_x	n_y	n_z	ε (M1)	ε (M2)	ε (M3)	ε (M4)	ε (M5)	MSE
1	1	2	3,12	-0,10	-0,70	-0,99	-0,94	1,06
5	1	0	2,01	0,38	-0,18	-0,97	-0,98	0,77
5	0	1	0,41	0,43	-0,15	-0,25	-0,47	0,24
2	1	2	-0,02	0,90	0,97	-0,94	-0,98	0,65
3	0	2	-0,13	0,55	-0,38	-0,45	0,62	0,33
3	2	1	-0,09	0,18	-0,53	-0,33	0,99	0,36
4	2	0	0,43	-0,94	-0,30	0,01	0,80	0,39
5	1	1	2,01	0,38	-0,18	-0,97	-0,98	0,77
6	0	0	-0,05	0,25	-0,10	-0,20	0,09	0,12
3	1	2	1,42	0,96	-0,22	-0,98	-0,93	0,69

Tabla 7.7. Errores en el módulo de la ganancia de los modos en las posiciones de las muestras.

Como vemos en la tabla 7.7, podemos confirmar la hipótesis realizada referente a la existencia de un modo principal que aproxima mejor la respuesta acústica de la zona del recinto por la que se desplazará el robot, que es el modo (6,0,0) que presenta un MSE de un 12 %. Por otro lado observamos que para cada posición de las muestras existe como mínimo un modo significativo local que aproxima de forma apreciable la ganancia teórica a la ganancia experimental.

La respuesta de la zona del recinto modelizada vendría definida por la siguiente función de transferencia de presión, al ser un modo de tipo axial con n_y nulo :

$$H(s, x_m) = \frac{P_m(s, x_m)}{P_s(s)} = 87,0788 \frac{\cos\left(\frac{6\pi}{1054}\right)x_m s}{s^2 + 38,5055s + 3,7629 \cdot 10^5} \quad (7.10)$$

Donde la coordenada x_m y la longitud del recinto vienen expresadas en cm.

Siendo los parámetros del modelo para este modo los indicados en la tabla 7.8:

(n_x, n_y, n_z)	(6,0,0)
ω_n	613,4274
\overline{K}_n	87,0788
$\zeta_n(\omega_n)$	0,0314

Tabla 7.8. Parámetros del modelo del modo principal (6,0,0).

En la figura 7.17 se representa la distribución del módulo de la ganancia teórica normalizada respecto al máximo valor de la ganancia, que denominaremos $|G|$, si supusiéramos un comportamiento acústico de la totalidad del recinto similar al de la zona modelizada por las muestras etiquetadas,

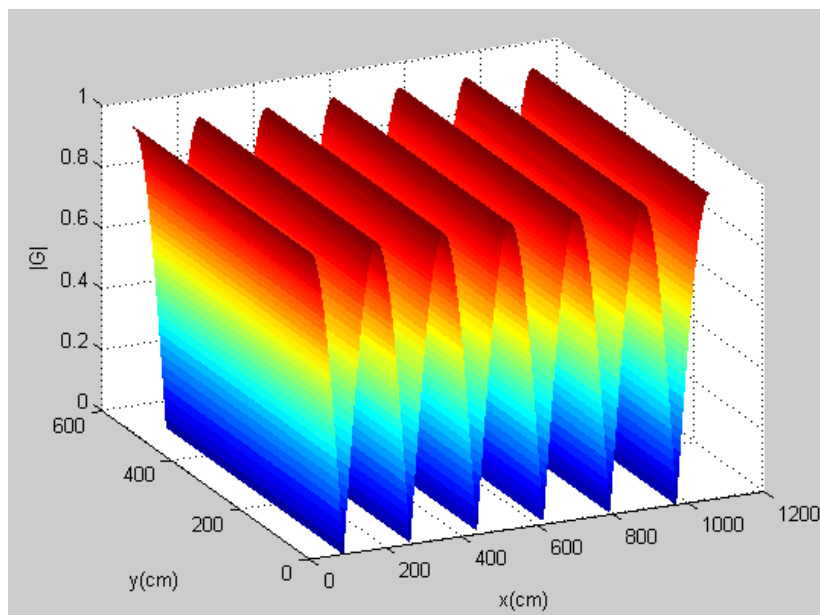


Figura 7.17. Módulo de la ganancia normalizada del modo (6,0,0).

7.5.1.2. Función del factor de ganancia.

La función del factor de ganancia para este modo principal seleccionado vendría dada por la expresión (7.11), que al ser un modo axial con n_y igual a cero, quedaría reducida a:

$$K_n(x_m) = \widehat{K}_n \left[\cos \left(\frac{n_x \pi x_m}{L_x} \pm \phi_x \right) \right] \quad (7.11)$$

El valor teórico máximo \widehat{K}_n vendría dado por la expresión (7.12) ya presentada anteriormente, y se calcularía a partir del valor ya conocido del factor de ganancia medio:

$$\overline{K}_n = \frac{\widehat{K}_n}{2} \quad (7.12)$$

$$\widehat{K}_n = 174,1576$$

7. Resultados experimentales

La función de ganancia teórica en función de la coordenada x_m del micrófono y de la longitud del recinto expresadas en centímetros, quedará finalmente como:

$$K_n(x_m) = 174,1576 \left[\cos \left(\frac{6\pi x_m}{1054} \pm \phi_x \right) \right] \quad (7.13)$$

Para la determinación del ángulo de desfase del modo nos ayudaremos de las medidas experimentales realizadas en las posiciones de las muestras en el recinto, que nos permiten calcular el valor del factor de ganancia experimental que anula el error de nuestro modo principal en dichas posiciones, y que se recoge en la tabla siguiente:

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5
$K(x,y)$	91,8990	69,7984	97,2818	109,3654	79,5975

Tabla 7.9. Valores experimentales del factor de ganancia en las posiciones de las muestras.

Si graficamos estos valores junto con nuestra función del factor de ganancia considerando un desfase nulo, obtenemos la siguiente figura en la que se puede apreciar que el desfase que presenta nuestra función respecto a los valores experimentales no es muy elevado

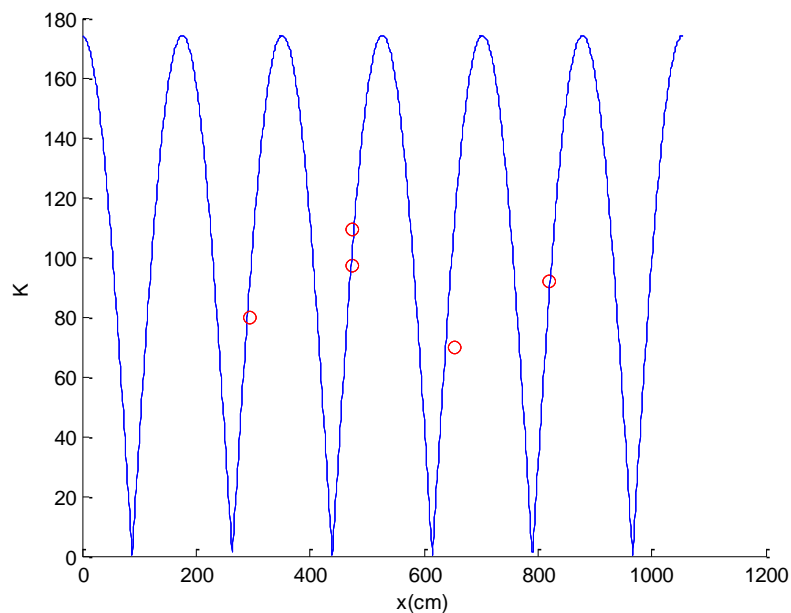


Figura 7.18. Función teórica del factor de ganancia y valores experimentales.

Si expresamos el ángulo de desfase que modeliza la función del factor de ganancia en función del parámetro x_d , que cuantifica el desfase de la función respecto a la coordenada x expresado en centímetros, obtenemos la siguiente expresión:

$$K_n(x_m) = 174,1576 \left[\cos \left(\frac{6\pi x_m}{1054} \pm \frac{6\pi x_d}{1054} \right) \right] \quad (7.14)$$

Es interesante destacar que la función teórica nominal del factor de ganancia, sin considerar desfases, provoca que nuestro modelo presente una distribución del módulo de la ganancia teórica normalizada respecto a su valor máximo, que si suponemos aplicable a la totalidad del recinto, presenta un aspecto ligeramente diferente al representado en la figura 7.17, sin que se produzcan discontinuidades acusadas en los valores mínimos de ganancia, como se observa en la figura 7.19.

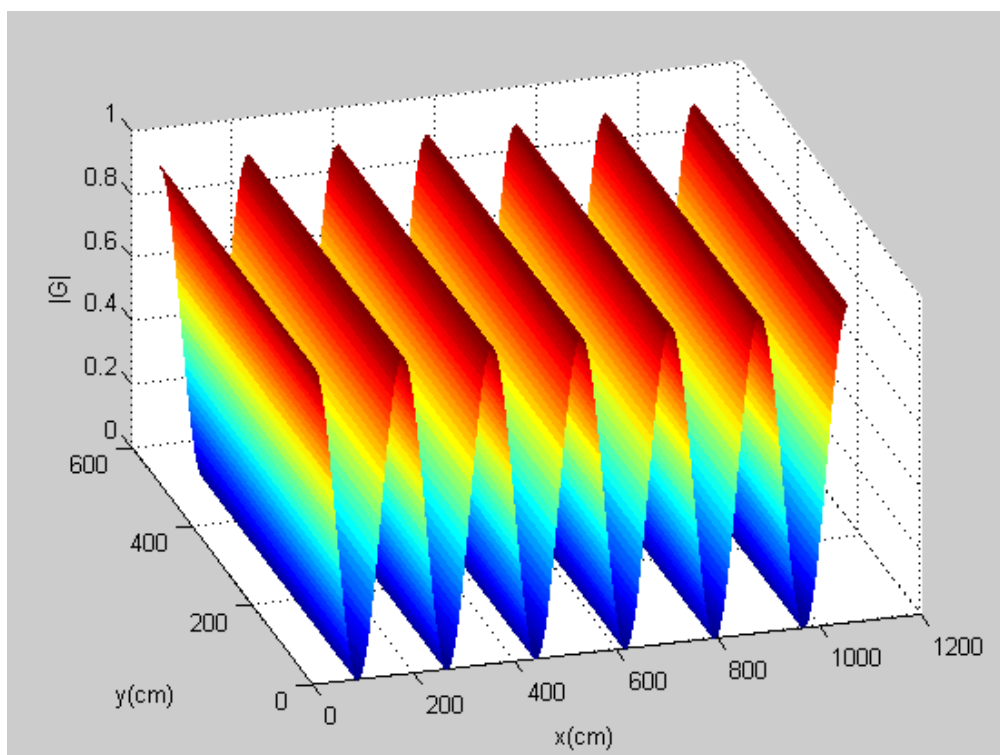


Figura 7.19. Respuesta acústica normalizada con la función del factor de ganancia.

Los valores de x_d que anulan el error entre los valores teóricos y los valores experimentales en las distintas posiciones de las muestras son los siguientes:

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5
Desfase (cm)	2,58	-16,1	-1,7	3,1	4,0

Tabla 7.10. Valores de x_d de la función teórica del factor de ganancia que anulan el error.

Los diferentes valores del desfase que se producen en las posiciones de las muestras dependen entre otros factores de la distribución irregular de las superficies absorbentes en el recinto, y son debidos a las variaciones que presenta la parte imaginaria de la impedancia de las distintas superficies de las paredes y de los obstáculos que reflejan las ondas incidentes de presión.

Estos valores también dependen de la existencia de la sala interna de manipulación de productos químicos ubicada en el interior del recinto, que alejan la forma del recinto de la forma rectangular ideal adoptada para establecer las soluciones proporcionadas por el modelo

ondulatorio. Siendo esta la causa más probable si consideramos la ubicación de la muestra M2 que se sitúa en las proximidades de dicha sala.

El criterio que adoptaremos para modelizar la incertidumbre de este parámetro será el de suponer una distribución de probabilidad uniforme, como hemos señalado anteriormente, considerando como valor máximo de incertidumbre el que se produce en el caso extremo, es decir, en la posición de la muestra 2, y si admitimos que los desfases de los modos pueden presentar signos contrarios al reflejarse las ondas de presión en las paredes opuestas, tal como hemos señalado en apartados anteriores, la función del factor de ganancia presentará una incertidumbre máxima de $\pm 16,1$ cm, a la que añadiremos la incertidumbre en la determinación de la posición de las muestras por el robot, de $\pm 17,1$ cm.

Por tanto, la semianchura máxima de la distribución de probabilidad será de 33,2 cm con una desviación típica de 19,2 cm.

Finalmente nuestro modelo quedará definido por la expresión:

$$H(s, x_m) = \frac{P_m(s, x_m)}{P_s(s)} = 174,1576 \left[\cos \left(\frac{6\pi x_m}{1054} \pm \phi_x \right) \right] \frac{\cos \left(\frac{6\pi}{1054} \right) x_m s}{s^2 + 38,5055s + 3,7629 \cdot 10^5} \quad (7.15)$$

Siendo ϕ_x :

$$\phi_x = \frac{199,2\pi}{1054} \quad (7.16)$$

Expresando la coordenada x_m del robot en centímetros.

7.5.1.3. Determinación de las posiciones del robot.

Para realizar este primer estudio que tiene como objeto efectuar una primera aproximación al estudio de la viabilidad del sistema de localización propuesto, hemos adoptado algunas importantes condiciones simplificativas:

- Para calcular mediante nuestro sistema de localización la posición actual del robot, no hemos considerado el error acumulado que se produciría al considerar el error cometido en el cálculo de las posiciones anteriores del robot, situando directamente el robot en las coordenadas correspondientes a la posición a analizar.
- Cuando el robot se detiene con objeto de determinar su posición actual, hemos situado la posición real del robot en la posición correspondiente al centro del intervalo de posiciones posibles obtenidas al considerar su velocidad de desplazamiento y el intervalo de tiempo de cálculo máximo transcurrido desde su última posición.

Es de esperar que si el sistema de localización presenta un buen comportamiento, los errores obtenidos en el cálculo de las distintas posiciones se mantengan en valores muy reducidos.

7. Resultados experimentales

Los valores de la ganancia experimental obtenidos a partir de la señal captada por el robot en su recorrido por el recinto en las distintas posiciones analizadas son los indicados en la tabla 7.11 siguiente:

Posición	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Ganancia	0,3866	0,2159	1,0941	0,6993	0,3363	0,7457	0,3654

Tabla 7.11. Ganancia experimental obtenida en las posiciones del robot.

En la figura siguiente se grafican los valores experimentales del factor de ganancia en las posiciones del robot y la función del factor de ganancia, con la incertidumbre adoptada correspondiente al desfase del modo:

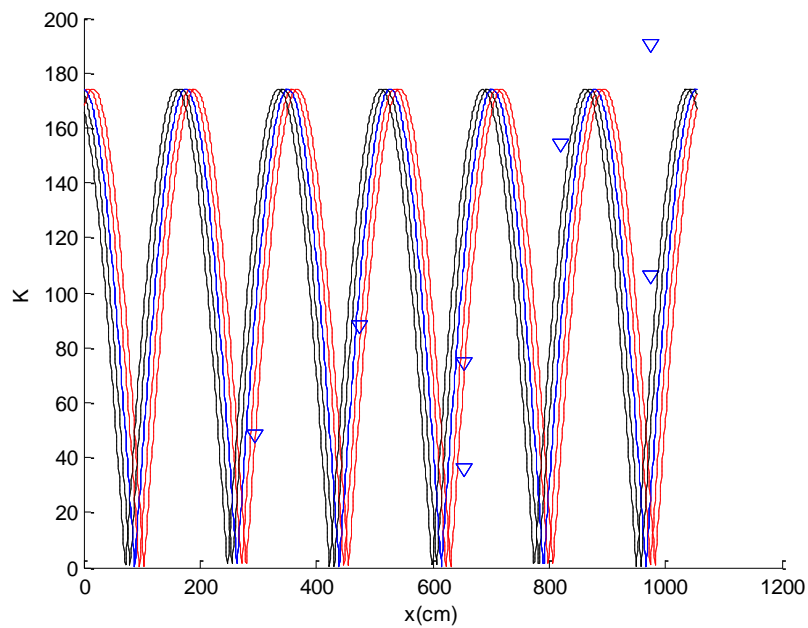


Figura 7.20. Función teórica del factor de ganancia y valores experimentales.

Pasaremos a comprobar a continuación que la función del factor de ganancia con la incertidumbre adoptada englobe a los valores del factor de ganancia que anulan el error producido entre los valores teóricos y los valores experimentales en las posiciones del robot.

Para ello consideramos todas las fuentes de incertidumbre que afectan a nuestro modelo, las producidas en la determinación experimental de las coordenadas de las posiciones de las muestras por el robot y las producidas en el desfase del modo. Los valores experimentales de la función de ganancia que anulan el error de nuestra función en las posiciones del robot y los valores extremos de la función de ganancia teórica obtenidos al considerar la incertidumbre se indican en la tabla 7.12 siguiente:

Posición	K experimental	K mínima	K máxima
R1	190,4329	0	116,6601
R2	106,3849	0	116,6601
R3	154,2364	0	155,4998
R4	74,6216	18,5176	167,5461
R5	35,8863	18,5176	167,5461
R6	87,9096	5,0553	163,3635
R7	48,4426	0	158,2002

Tabla 7.12. Valores experimentales y valores extremos teóricos de la función de ganancia.

Como vemos, la única posición del robot que sale fuera de los límites de incertidumbre establecidos para nuestro modelo es la posición del robot R1. Entre las hipótesis que podemos establecer para justificar este hecho para esta posición en concreto, se encuentran los factores ya comentados que pueden afectar localmente al desfase del modo considerado, como la distribución no uniforme de los materiales absorbentes y la posible influencia en la respuesta acústica de la sala interna de manipulación de productos químicos que no ha sido modelizada en nuestra función.

Por otro lado, un muestreo previo del recinto más exhaustivo en esa zona podría haber evitado que se produjera esta situación, por lo que una de las primeras conclusiones que podemos extraer de nuestro trabajo es la conveniencia de efectuar un muestreo más detallado en las zonas del recinto que puedan presentar una respuesta acústica más compleja.

Para el cálculo de la ganancia teórica proporcionada por nuestro modelo en función de la distancia al origen en una posición concreta del robot en el recinto, nos es necesario conocer el ángulo formado entre esa posición del robot y el origen de coordenadas respecto al eje de abscisas que hemos adoptado, para ello utilizamos una baliza luminosa ubicada en la esquina del recinto donde se sitúa el origen de coordenadas y una cámara hemisférica ubicada en el propio robot, como hemos señalado anteriormente.

El robot, a partir de la imagen obtenida con la cámara y mediante una brújula electrónica instalada en el propio robot determinará el ángulo que forma su posición respecto al origen de coordenadas y el eje de abscisas adoptado en nuestro modelo, con una incertidumbre máxima de $\pm 0.367^\circ$, como hemos comentado anteriormente.

La metodología utilizada para la determinación de la ganancia experimental y el cálculo de la posición del robot mediante los algoritmos de localización es la de detener al robot en las posiciones indicadas y efectuar la captación de la señal cuando la plataforma se encuentra orientada hacia la máxima intensidad del sonido procedente de la fuente de sonido.

Debido a que la expresión de la ganancia teórica de nuestro modelo para un ángulo θ determinado corresponde a una función periódica, tendremos más de una solución posible a la hora de determinar la distancia r del robot al origen de coordenadas al determinar el punto de corte de esta función con el valor de la ganancia experimental calculada a partir de la señal captada, como hemos comentado también anteriormente.

Considerando que el periodo de la función nominal de la ganancia proporcionado por nuestro modelo, sin considerar la incertidumbre, tiene un valor de:

$$T = \frac{L_x}{n_x} = \frac{1054}{6} = 175,7 \text{ cm} \quad (7.17)$$

Buscaremos acotar el número de soluciones posibles considerando que el máximo desplazamiento que pueda efectuar el robot entre dos posiciones contiguas en las que determina sus coordenadas no sea mayor que ese valor, y considerando que la incertidumbre de nuestro modelo es de $\pm 33,2$ cm, tomaremos una distancia lo suficientemente grande como para dotar a nuestro sistema de localización de una resolución suficiente frente al intervalo considerado.

Por tanto buscaremos una solución de compromiso, en la que considerando que la velocidad de desplazamiento del robot es de 15 cm/s, el robot deberá calcular su posición con un intervalo de tiempo máximo de 11 segundos, por lo que habrá podido recorrer entre posiciones una distancia máxima de 165 cm, algo menor que el periodo de la función de ganancia.

Como hemos señalado al explicar el sistema de localización, otorgaremos la máxima probabilidad al conjunto de soluciones ofrecidas por el intervalo de incertidumbre que englobe a la distancia recorrida desde la última posición estimada del robot que indicaría el sistema odométrico auxiliar instalado en el robot.

Finalmente señalar que el algoritmo de determinación de la posición del robot en nuestra aplicación calculará las funciones de ganancia extremas obtenidas con la incertidumbre máxima producida por el desfase del modo principal, de $\pm 16,1$ cm, a la que sumaremos la incertidumbre máxima producida en la determinación de la posición de las muestras por el robot, de $\pm 17,1$ cm, recogidas en la función del factor de ganancia.

La consideración del máximo error generado por el sistema de la cámara y la brújula electrónica en la determinación del ángulo que forma el robot respecto al origen de coordenadas, se realizará específicamente para cada posición en la que el robot tiene que calcular sus coordenadas, considerando el ángulo medido θ en esa posición y el error máximo de $\pm 0.367^\circ$, para obtener las funciones de ganancia.

En la figura 7.21 se muestran las funciones de ganancia para la posición del robot R3 graficadas respecto a la distancia r al origen de coordenadas expresada en cm, obtenidas con los valores extremos del error generado por el sistema de la cámara y la brújula electrónica en la determinación del ángulo, y la evolución de la función de ganancia nominal hasta el límite de los intervalos de incertidumbre máximos considerados. En la figuras también se indica el valor de la ganancia experimental y los límites del intervalo de soluciones posibles considerando la velocidad de avance del robot y su última posición.

En dicha figura 7.21 también podemos observar que un efecto que se produce en la función de ganancia teórica de nuestro modelo al aplicar la incertidumbre a la función del factor de ganancia, es una disminución de su valor medio. Por tanto la incertidumbre generada

por el desfase del modo también refleja una incertidumbre en la determinación del valor medio o del valor máximo del modo principal.

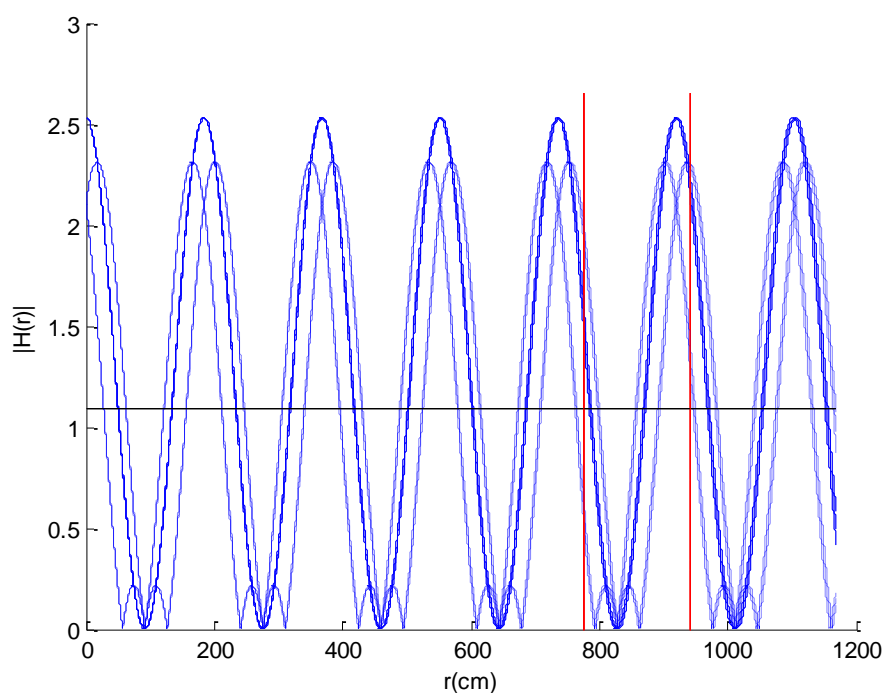


Figura 7.21. Ganancias teóricas y experimental en la posición del robot R3.

El algoritmo de localización tomará como solución para calcular la posición del robot la obtenida al promediar las soluciones extremas del intervalo de soluciones posibles generado por las incertidumbres adoptadas

En la tabla 7.13 se indican los resultados del cálculo de la posición del robot y los errores absolutos y relativos en cada posición del robot analizada, salvo para la posición del robot R1, ya que hemos comprobado anteriormente que se sale de los límites de incertidumbre adoptados para el modelo y por tanto el modelo proporcionará resultados erróneos para esta posición.

Como vemos en la tabla, y dada la definición de nuestro modo principal, la incertidumbre en el cálculo de la coordenada x se mantiene aproximadamente constante con un valor de $\pm 15,6$ cm, que se corresponde a la mitad del intervalo de incertidumbre considerado para la función del factor de ganancia.

POS	Coordenadas Calculadas (cm)		Error Absoluto (cm)		Error Relativo %		Incertidumbre coordenadas (cm)	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
R1	-	-	-	-	-	-	-	-
R2	990,0	330,4	16,0	5,4	1,64	1,66	±15,6	±12,6
R3	835,4	260,2	16,4	5,1	2,00	2,02	±15,6	±11,1
R4	650,9	253,9	-3,1	-1,1	-0,47	-0,43	±15,6	±11,3
R5	642,1	103,2	-12,0	-1,8	-1,83	-1,71	±15,6	±6,9
R6	476,4	105,6	2,4	0,6	0,50	0,57	±15,6	±6,9
R7	291,5	104,2	-2,5	-0,8	-0,85	-0,76	±15,6	±8,0
Error medio:			4,11	1,24	0,16	0,22		

Tabla 7.13. Resultados obtenidos con la insoladora.

Los valores de la incertidumbre en el cálculo de la coordenada y serán más elevados en las posiciones más alejadas del origen de coordenadas del recinto y para ángulos elevados, debido también a la definición de nuestro modo principal. Respecto a este aspecto hay que señalar la limitación del modelo para trabajar con ángulos próximos a 90 grados respecto al origen de coordenadas, ya que nuestro modelo no encontraría solución en la determinación de las coordenadas del robot.

No obstante, hay que señalar la consideración inicial que realizamos para distribuir las muestras etiquetadas del recinto, que las sitúan alrededor de las zonas de trabajo posibles del robot, y al no repartirse en las zonas del recinto en las que no trabajará el robot, no permiten la modelización de dichas zonas con el modo principal seleccionado.

Si quisiéramos modelizar zonas de trabajo del recinto más amplias, este hecho provocara la selección de un modo principal diferente, seguramente de tipo tangencial u oblicuo, que aumentaría lógicamente la complejidad del modelo.

7.5.2. Fuente de sonido: cámara climática.

7.5.2.1. Cálculo del factor de ganancia de los modos.

A continuación realizaremos el cálculo teórico del factor de ganancia de los modos al igual que hemos realizado con la fuente de sonido anterior, con objeto de seleccionar el modo más significativo principal y los modos más significativos secundarios que definirán nuestro modelo.

En la tabla 7.14 indicaremos el valor de ganancia experimental obtenido en las muestras etiquetadas del recinto:

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5
Ganancia	0,2763	1,1804	0,5831	0,3300	0,4590

Tabla 7.14. Valor de la ganancia en las posiciones de las muestras.

7. Resultados experimentales

En la tabla 7.15, indicaremos para cada modo analizado, el factor de ganancia medio teórico y la ganancia teórica obtenida mediante nuestro modelo en las distintas posiciones de las muestras:

n_x	n_y	n_z	f_n	$\overline{K_n}$	$G(M1)$	$G(M2)$	$G(M3)$	$G(M4)$	$G(M5)$
4	0	2	101,55	74,9520	0,8804	0,0529	0,7535	0,7535	0,8727
4	2	1	101,83	55,3231	0,8657	0,0377	0,5380	0,8673	1,0045
0	3	0	101,88	55,2625	0,8276	1,1860	1,1860	0,0567	0,0567
1	3	0	103,17	173,4132	1,6091	1,1146	0,4745	0,0227	0,0922
6	1	0	103,37	188,1800	1,5225	0,9106	0,8423	0,0294	0,0262
0	2	2	103,39	87,2170	0,6912	0,5019	0,5019	0,8091	0,8091
1	2	2	104,67	247,2431	1,2175	0,4273	0,1819	0,2933	1,1930
6	0	1	105,12	102,7935	0,5736	0,7578	0,6859	0,6859	0,6099
5	2	0	105,98	100,4798	0,9428	0,6808	0,5098	0,8218	0,3579
2	3	0	106,95	180,9160	0,2114	1,3021	1,7028	0,0813	0,0155
4	1	2	107,08	468,3732	2,2936	0,0623	0,8887	0,0317	0,0367
2	2	2	108,39	309,1516	0,2066	0,6449	0,8434	1,3596	0,2586
0	3	1	109,08	174,0220	0,8277	1,1860	1,1860	0,0567	0,0567
1	3	1	110,29	498,7364	1,6091	1,1146	0,4745	0,0227	0,0922
6	1	1	110,47	532,2204	1,5526	0,9107	0,8243	0,0294	0,0262
5	0	2	112,68	294,0740	0,8541	0,8659	0,6483	0,6483	0,2965
5	2	1	112,92	234,1093	0,9248	0,6808	0,5098	0,8218	0,3759
3	3	0	112,97	339,7435	0,6574	1,6881	0,8496	0,0406	0,0775
2	3	1	113,83	397,5732	0,2114	1,3021	1,7028	0,0813	0,0155
7	0	0	113,9	184,1959	0,1827	0,4550	0,8613	0,8613	0,9529
3	2	2	114,34	464,3542	0,5496	0,7152	0,3600	0,5803	1,1080

Tabla 7.15. Cálculo teórico del factor de ganancia medio y del módulo de la ganancia.

Al igual que lo realizado con la otra fuente de sonido y con objeto de identificar el modo o modos excitados más significativos en cada posición, calcularemos el error relativo y el error cuadrático medio (MSE) para cada modo en las posiciones de las muestras. Los resultados se indican en la tabla 7.16, en la que se destacan también los errores relativos mínimos obtenidos en las distintas posiciones.

Como vemos en la tabla 7.16, el modo principal es el (6,0,1), que modeliza una respuesta acústica de la zona del recinto, si consideramos que la altura del micrófono del robot es constante, idéntica a la respuesta obtenida con el modo (6,0,0) con la anterior fuente de sonido. Las posibilidades de que ocurriera este hecho eran elevadas si consideramos la proximidad de las frecuencias emitidas por las fuentes de sonido seleccionadas en el proceso de filtrado al estar ubicadas en el mismo recinto.

n_x	n_y	n_z	ε (M1)	ε (M2)	ε (M3)	ε (M4)	ε (M5)	MSE
4	0	2	2,19	-0,96	0,29	1,28	0,90	0,6349
4	2	1	2,13	-0,97	-0,08	1,63	1,19	0,6695
0	3	0	2,00	0,00	1,03	-0,83	-0,88	0,4252
1	3	0	4,82	-0,06	-0,19	-0,93	-0,80	0,6358
6	1	0	4,51	-0,23	0,44	-0,91	-0,94	0,6278
0	2	2	1,50	-0,57	-0,14	1,45	0,76	0,4452
1	2	2	3,41	-0,64	-0,69	-0,11	1,60	0,6564
6	0	1	1,08	-0,36	0,18	1,08	0,33	0,2922
5	2	0	2,41	-0,42	-0,13	1,49	-0,22	0,4362
2	3	0	-0,23	0,10	1,92	-0,75	-0,97	0,5534
4	1	2	7,30	-0,95	0,52	-0,90	-0,92	1,0659
2	2	2	-0,25	-0,45	0,45	3,12	-0,44	0,5403
0	3	1	2,00	0,00	1,03	-0,83	-0,88	0,4252
1	3	1	4,82	-0,06	-0,19	-0,93	-0,80	0,6358
6	1	1	4,62	-0,23	0,41	-0,91	-0,94	0,6384
5	0	2	2,09	-0,27	0,11	0,96	-0,35	0,3361
5	2	1	2,35	-0,42	-0,13	1,49	-0,18	0,4300
3	3	0	1,38	0,43	0,46	-0,88	-0,83	0,3751
2	3	1	-0,23	0,10	1,92	-0,75	-0,97	0,5534
7	0	0	-0,34	-0,61	0,48	1,61	1,08	0,4772
3	2	2	0,99	-0,39	-0,38	0,76	1,41	0,4061

Tabla 7.16. Errores en el módulo de la ganancia de los modos en las posiciones de las muestras.

Por otro lado observamos que el error generado por el modelo sin considerar la función del factor de ganancia es mayor para esta fuente de sonido que para la insoladora de PCB estudiada anteriormente. Este hecho se puede justificar si consideramos la ubicación de la cámara climática, que al estar situada en las proximidades de las esquinas del recinto, excitará a muchos más modos que en el caso de la anterior fuente de sonido, afectando de forma mucho más acusada al modo principal.

7.5.2.2. Función del factor de ganancia.

La función del factor de ganancia para este modo principal seleccionado vendría dada por la expresión (7.18), que al ser un modo axial con n_y igual a cero, quedaría reducida a:

$$K_n(x_m) = \widehat{K}_n \left[\cos \left(\frac{n_x \pi x_m}{L_x} \pm \phi_x \right) \right] \quad (7.18)$$

El valor teórico máximo \widehat{K}_n vendría dado por la expresión (7.19), y se calcularía a partir del valor ya conocido del factor de ganancia medio:

$$\overline{K}_n = \frac{\widehat{K}_n}{2} \quad (7.19)$$

$$\widehat{K}_n = 205,5871$$

Quedando finalmente la función del factor de ganancia, como:

$$K_n(x_m) = 205,5871 \left[\cos \left(\frac{6\pi x_m}{1054} \pm \phi_x \right) \right] \quad (7.20)$$

Trabajaremos con esta expresión expresando la coordenada del micrófono y la longitud del recinto en centímetros.

Para la determinación del ángulo de desfase del modo nos ayudaremos de las medidas experimentales realizadas en las posiciones de las muestras en el recinto, que nos permiten calcular el valor del factor de ganancia experimental que anula el error de nuestro modo principal en dichas posiciones, y que se recoge en la tabla siguiente, tal como hemos realizado con la anterior fuente de sonido:

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5
$K(x,y)$	49,5162	160,1280	87,3881	49,4565	77,3585

Tabla 7.17. Valores experimentales del factor de ganancia en las posiciones de las muestras.

Si graficamos estos valores junto con nuestra función del factor de ganancia considerando un desfase nulo, obtenemos la figura 7.22 en la que se puede apreciar, al igual que con la fuente de sonido anterior, que el desfase que presenta nuestra función nominal respecto a los valores experimentales no es muy elevado.

Si expresamos este ángulo de desfase en función del parámetro x_d , que cuantifica el desfase de la función respecto a la coordenada x expresado en centímetros, obtenemos la siguiente expresión:

$$K_n(x_m) = 205,5871 \left[\cos \left(\frac{6\pi x_m}{1054} \pm \frac{6\pi x_d}{1054} \right) \right] \quad (7.21)$$

Los valores de x_d que anulan el error entre los valores teóricos y los valores experimentales en las distintas posiciones de las muestras son los siguientes:

Muestra	M1	M2	M3	M4	M5
Desfase (cm)	-14,9	10,8	-10,3	- 21,2	-9,0

Tabla 7.18. Valores de x_d de la función teórica del factor de ganancia que anulan el error.

Si observamos los máximos valores del desfase producido vemos que se producen en las posiciones de la muestra 1 y de la muestra 4. El producido en la muestra 1 pensamos que es debido, al igual que ocurría con la fuente de sonido anterior, a la presencia de la sala interna de manipulación de productos químicos.

Por contra, el desfase producido en la muestra 4 pensamos que puede producirse por la influencia del campo cercano de la fuente, en el que se puede empezar a hacer patente el efecto del diagrama de directividad de la fuente de sonido.

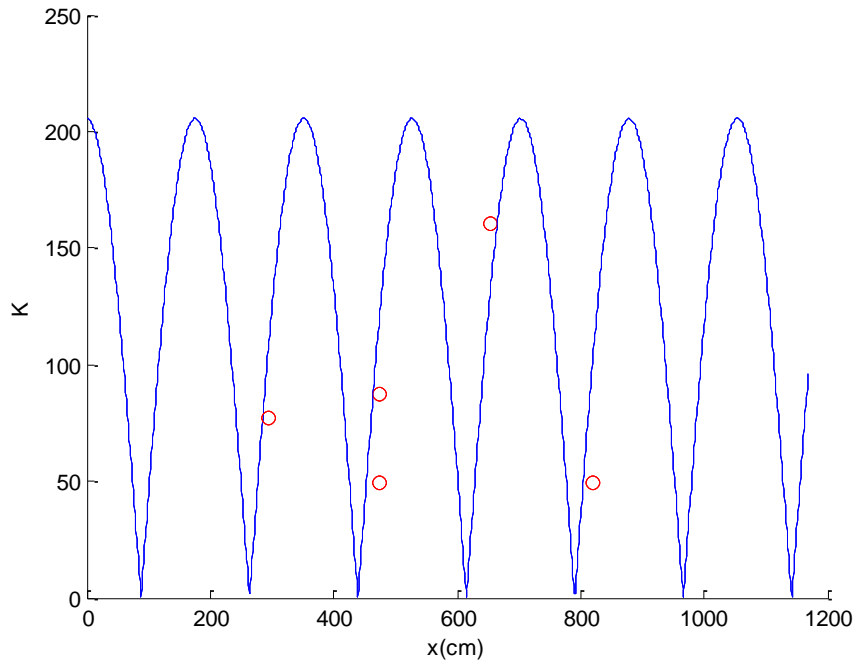


Figura 7.22. Función teórica del factor de ganancia y valores experimentales.

El criterio que adoptaremos para modelizar la incertidumbre de este parámetro será igual que con la fuente de sonido anterior, el de suponer una distribución de probabilidad uniforme, considerando para establecer su valor máximo el que se produce en el peor caso, es decir, en la posición de la muestra 4, por lo que la función del factor de ganancia presentará una incertidumbre máxima de $\pm 21,2$ cm, a la que añadiremos la incertidumbre en la determinación de la posición de las muestras por el robot, de $\pm 17,1$ cm.

Por tanto, la semianchura máxima de la distribución de probabilidad será de 38,3 cm con una desviación típica de 22,1 cm.

Finalmente nuestro modelo que modeliza la RTF de la ganancia en la zona de trabajo del robot quedará definido por la expresión:

$$H(s, x_m) = \frac{P_m(s, x_m)}{P_s(s)} = 205,5871 \left[\cos \left(\frac{6\pi x_m}{1054} \pm \phi_x \right) \right] \frac{\cos \left(\frac{6\pi}{1054} x_m s \right)}{s^2 + 38,5055s + 3,7629 \cdot 10^5} \quad (7.22)$$

Siendo ϕ_x :

$$\phi_x = \frac{229,8\pi}{1054} \quad (7.23)$$

Expresando la coordenada x_m del robot en centímetros.

7.5.2.3. Determinación de las posiciones del robot.

Los valores de la ganancia experimental obtenidos a partir de la señal captada por el robot en su recorrido por el recinto en las distintas posiciones analizadas son los indicados en la tabla 7.19 siguiente:

Posición	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Ganancia	0,0881	0,2664	0,7071	0,6631	0,3172	0,9737	1,1051

Tabla 7.19. Ganancia experimental obtenida en las posiciones del robot.

En la figura siguiente se grafican los valores experimentales del factor de ganancia en las posiciones del robot y la función del factor de ganancia, con la incertidumbre correspondiente al desfase del modo que hemos adoptado:

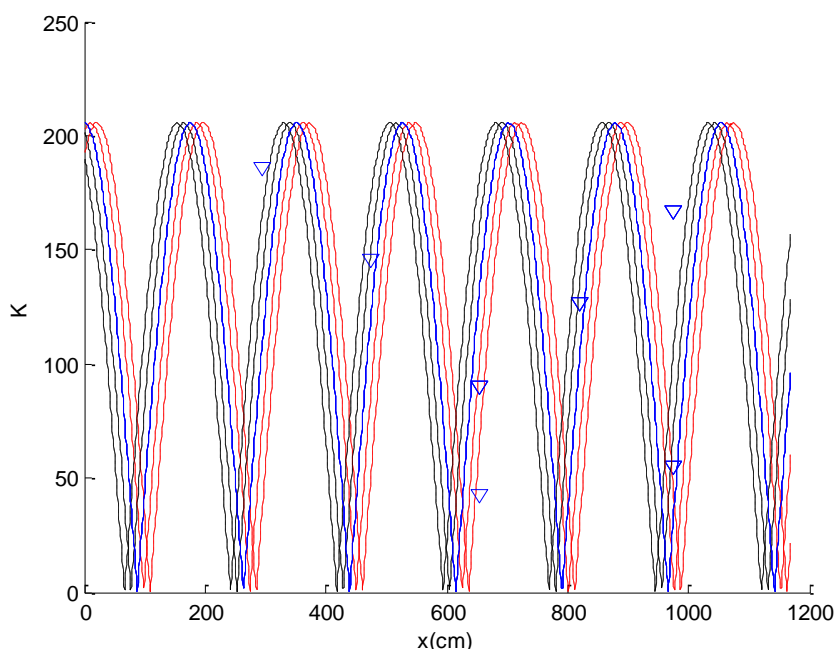


Figura 7.23. Función teórica del factor de ganancia y valores experimentales.

Pasaremos a comprobar a continuación, igual que hemos hecho con la anterior fuente de sonido, que la función del factor de ganancia con la incertidumbre adoptada engloba a los valores del factor de ganancia que anulan el error producido entre los valores teóricos y los valores experimentales en las posiciones del robot.

Para ello consideramos todas las fuentes de incertidumbre que afectan a nuestro modelo, las producidas en la determinación experimental de las coordenadas de las posiciones de las muestras por el robot y las producidas en el desfase del modo, tal como hemos realizado en la fuente anterior. Los valores experimentales de la función de ganancia que anulan el error de nuestra función en las posiciones del robot y los valores extremos de la función de ganancia teórica obtenidos al considerar la incertidumbre se indican en la tabla 7.20 siguiente:

Posición	K experimental	K mínima	K máxima
R1	55,1687	0	151,0191
R2	166,8212	0	151,0191
R3	126,7207	0	191,9131
R4	89,9533	3,1863	202,0639
R5	43,0300	3,1863	202,0639
R6	145,9266	0	198,5235
R7	186,2503	0	193,7914

Tabla 7.20. Valores experimentales y valores extremos de la función de ganancia.

Como vemos en la tabla, la posición del robot que se sale fuera de los límites de incertidumbre establecidos en nuestro modelo es la posición R2. Esta posición se encuentra muy próxima a la posición R1 que salía fuera de los límites de incertidumbre con la anterior fuente de sonido, por lo que podemos deducir que dichas posiciones se encuentran en una zona del recinto de más difícil modelización debido a la posible influencia de la sala interna de manipulación de productos químicos que no ha sido modelizada con detalle en nuestra función, como hemos comentado anteriormente.

Por otro lado hay que considerar que si las ganancias toman valores muy bajos o muy altos el modelo no nos permitirá discernir los dos márgenes de incertidumbre correspondientes a la mínima y máxima distancia recorrida por el robot desde la última posición computada, al solaparse, como casi ocurre en la posición del robot R1, en que podemos ver que nos acercamos al límite inferior señalado, tal como muestra la figura 7.24.

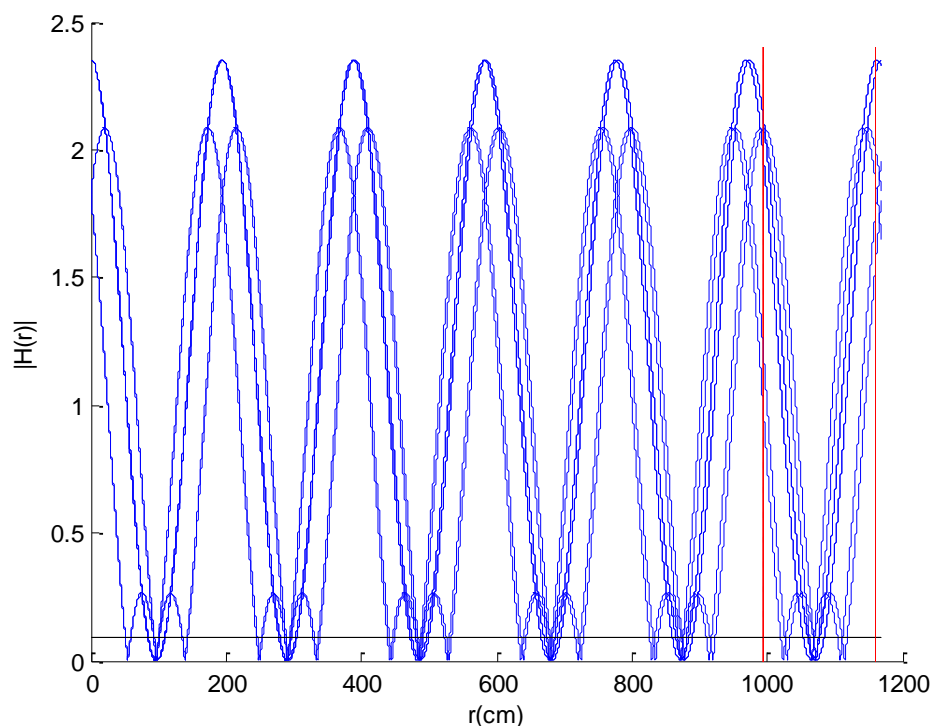


Figura 7.24. Ganancias teórica y experimental en la posición del robot R1.

7. Resultados experimentales

Para finalizar, en la tabla 7.21 se indican los resultados del cálculo de la posición del robot y los errores absolutos y relativos en cada posición del robot analizada.

POS	Coordenadas Calculadas (cm)		Error Absoluto (cm)		Error Relativo %		Incertidumbre Coordenadas (cm)	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
R1	988,5	468,0	14,5	7,0	1,48	1,52	±19,2	±16,8
R2	-	-	-	-	-	-	-	-
R3	829,6	258,4	10,6	3,4	1,29	1,33	±19,2	±11,8
R4	652,8	254,7	-1,2	-0,3	-0,18	-0,12	±19,2	±12,3
R5	644,0	103,5	-10,1	-1,5	-1,54	-1,43	±19,2	±7,3
R6	484,6	107,5	10,6	2,5	2,24	2,38	±19,2	±7,5
R7	312,1	111,6	18,1	6,6	6,14	6,29	±19,2	±9,1
Error medio:			10,02	1,78	1,32	1,41		

Tabla 7.21. Resultados obtenidos con la cámara climática.

Como vemos en la tabla, aunque presentan un valor muy aceptable, los errores se sitúan ligeramente por encima de los valores obtenidos con la insoladora. También podemos observar en la tabla, y debido a la definición de nuestro modo principal, que la incertidumbre en el cálculo de la coordenada x se mantiene aproximadamente constante con un valor de $\pm 19,2$ cm, que se corresponde a la mitad del intervalo de incertidumbre considerado para la función del factor de ganancia.

7.5.3. Comparación de los resultados obtenidos con ambas fuentes.

A modo de resumen, indicamos en las tablas 7.22 y 7.23 siguientes, los valores obtenidos con ambas fuentes de sonido.

POS	Coordenadas Calculadas (cm)		Error Absoluto (cm)		Error Relativo %		Incertidumbre coordenadas (cm)	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
R1	-	-	-	-	-	-	-	-
R2	990,0	330,4	16,0	5,4	1,64	1,66	±15,6	±12,6
R3	835,4	260,2	16,4	5,1	2,00	2,02	±15,6	±11,1
R4	650,9	253,9	-3,1	-1,1	-0,47	-0,43	±15,6	±11,3
R5	642,1	103,2	-12,0	-1,8	-1,83	-1,71	±15,6	±6,9
R6	476,4	105,6	2,4	0,6	0,50	0,57	±15,6	±6,9
R7	291,5	104,2	-2,5	-0,8	-0,85	-0,76	±15,6	±8,0
Error medio:			4,11	1,24	0,16	0,22		

Tabla 7.22. Resultados obtenidos con la insoladora.

POS	Coordenadas Calculadas (cm)		Error Absoluto (cm)		Error Relativo %		Incertidumbre Coordenadas (cm)	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
R1	988,5	468,0	14,5	7,0	1,48	1,52	±19,2	±16,8
R2	-	-	-	-	-	-	-	-
R3	829,6	258,4	10,6	3,4	1,29	1,33	±19,2	±11,8
R4	652,8	254,7	-1,2	-0,3	-0,18	-0,12	±19,2	±12,3
R5	644,0	103,5	-10,1	-1,5	-1,54	-1,43	±19,2	±7,3
R6	484,6	107,5	10,6	2,5	2,24	2,38	±19,2	±7,5
R7	312,1	111,6	18,1	6,6	6,14	6,29	±19,2	±9,1
Error medio:			10,02	1,78	1,32	1,41		

Tabla 7.23. Resultados obtenidos con la cámara climática.

Como vemos al comparar ambas tablas de resultados, los errores medios obtenidos con la cámara climática se sitúan ligeramente por encima de los errores obtenidos con la insoladora., este hecho puede explicarse si consideramos la ubicación de la cámara climática, ya que como ya hemos comentado al estar situada cerca de una de las esquinas del recinto, excita a un número mayor de modos que en el caso de la otra fuente de sonido, generando una respuesta acústica más compleja y de más difícil modelización.

También se ha puesto de manifiesto que las posiciones del robot R1 y R2 se encuentran en una zona del recinto de difícil modelización debido a la posible influencia de la sala interna de manipulación de productos químicos que no ha sido contemplada con detalle en nuestro modelo, como hemos comentado anteriormente.

La incertidumbre presenta unos valores aceptables para ambas fuentes de sonido, presentando un valor máximo absoluto de 38,4 cm en el cálculo de la coordenada x , lo que representa un 3,6 % de la longitud del recinto, y de 33,6 cm en el cálculo de la coordenada y , lo que representa un 6,7 % de la anchura del recinto.

Aunque esta primera aproximación experimental ha sido realizada sin considerar el error acumulado que se produciría al considerar el error cometido en el cálculo de las posiciones anteriores del robot, y situando siempre la posición real analizada del robot en el centro del intervalo de posiciones posibles considerando su velocidad de desplazamiento y el intervalo de tiempo máximo de cálculo entre posiciones contiguas, se considera que los resultados obtenidos muestran la suficiente exactitud como para considerar viable el sistema de localización propuesto en aplicaciones de autolocalización de robots en recintos cerrados.

7.6. Modelos paramétricos.

7.6.1. Introducción.

Los estudios iniciales realizados con los modelos paramétricos se basan en el trabajo realizado por [BOL03] en un recinto de experimentación de 7 por 10 metros utilizando una fuente de sonido no estacionaria, y utilizando un modelo de identificación MAX (Moving

Averaging Exogenous), tal como hemos expuesto en capítulos anteriores. En [BOL08] proponemos una aportación a ese trabajo inicial considerando el ángulo de orientación de la plataforma hacia la fuente de sonido, de forma que reducimos el número de soluciones a considerar por el algoritmo de localización, tal como hemos explicado detalladamente en el capítulo anterior.

Posteriormente a este trabajo inicial, todos los trabajos realizados en [MAN09a], [MAN10], [MAN11], [MAN12] y [MAN14] se han efectuado en el mismo recinto utilizado para el estudio del modelo teórico no paramétrico, es decir, el laboratorio docente de ensayos de componentes y circuitos electrónicos, considerando en el algoritmo de localización el ángulo de orientación de la plataforma y utilizando las mismas fuentes de sonido con objeto de poder comparar los resultados obtenidos con los obtenidos con el modelo teórico.

7.6.2. Fuente de sonido: máquina CNC.

7.6.2.1. Recinto de experimentación y fuente de sonido.

El recinto de experimentación es una sala rectangular de 7 por 10 metros y la fuente de sonido es una máquina herramienta de control numérico (CNC) que se encuentra ubicada en el centro de una de las paredes que forman los límites del recinto. Se trabaja con 9 muestras etiquetadas (S_1, S_2, \dots, S_9), situadas de forma regular alrededor de la zona de trabajo del robot, como podemos observar en la figura 7.25 y el robot entra en el recinto, describe una determinada trayectoria en su interior y sale del recinto, tal como podemos observar en la misma figura.

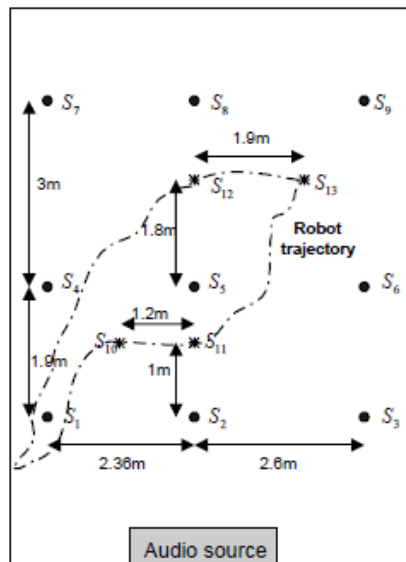


Figura 7.25. Recinto de experimentación y posiciones de las muestras etiquetadas y de las posiciones del robot analizadas.

Se analizan 4 posiciones del robot en el recinto, que denominamos S_{11} , S_{12} , S_{13} y S_{14} . La frecuencia de muestreo es de 8 kHz y se utiliza un micrófono omnidireccional de tipo capacitivo.

7.6.2.2. Función de transformación y resultados.

Tal como hemos explicado anteriormente, cada señal de entrada se descompone en 4 niveles, es decir, si llamamos S_i a la señal de audio, la señal se descompone como $S_i = A4_i + D4_i + D3_i + D2_i + D1_i$, donde $A4_i$ es la aproximación de la señal original S_i y Dj ($j = 1,4$) son las señales de detalle de S_i .

Para obtener los 9 coeficientes de los modelos de las 9 muestras etiquetadas, los modelos se validan con el criterio de error FPE (Function Prediction Error) y MSE (Mean Square Error) usando 5000 muestras para la identificación y 1000 para la validación, por lo que la duración del intervalo de la señal captada tiene es de 0,75 segundos. Como se observa en la figura 7.26 correspondiente a la señal S_2 , después de analizar que componentes de la señal contienen más información, se determina que con la señal de aproximación $A4_2$ y con la señal de detalle $D4_2$ es suficiente para representar la señal original, porque la desviación de las señales de detalle $D3_2$, $D2_2$ y $D1_2$ es de dos órdenes de magnitud inferior a la señal de aproximación $A4_2$ y a la señal de detalle $D4_2$.

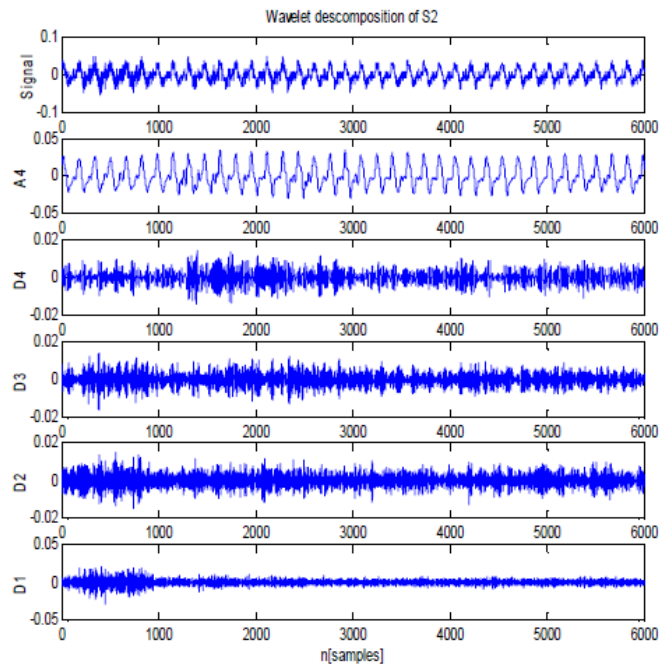


Figura 7.26. Descomposición wavelet multinivel de la señal S_2 con la señal de aproximación y las cuatro señales de detalle.

Se ha seleccionado la wavelet Daubechies 45, que proporciona buenos resultados en identificación de señales [TSA93] y el modelo resultante es de orden 20 (10 por los coeficientes de $A4_i$ y 10 por los coeficientes de $D4_i$).

Tal como se ha explicado en capítulos anteriores, a partir de los coeficientes de los modelos obtenidos en las muestras etiquetadas se obtiene la función de transformación nominal, que se aproxima con el criterio del menor MSE a un polinomio de 4º orden, según la expresión (7.24).

$$d_{fs} = 9,65 \cdot 10^{10} \cdot d_{xy}^4 + 1,61 \cdot 10^5 \cdot d_{xy}^3 - 8,49 \cdot 10^2 \cdot d_{xy}^2 + 144,9 \cdot d_{xy} + 107,84 \quad (7.24)$$

En esta expresión d_{fs} correspondería a la distancia existente entre muestras en el dominio del espacio de medidas y d_{xy} correspondería a la distancia existente en el dominio del espacio físico.

La representación de esta función de transformación viene dada en la figura 7.27.

Para cada posición del robot se obtienen varias soluciones posibles respecto a cada muestra etiquetada, dado que la distancia obtenida en el espacio de características intersecciona varias veces con la función de transformación, de forma similar a lo que se producía con el modelo teórico no paramétrico al trabajar con la función de la ganancia. Para descartar las soluciones incorrectas consideraremos la velocidad del robot de 15 cm/s y el máximo tiempo que el robot podrá desplazarse entre la última posición conocida, que suponemos determinada con precisión, y la nueva posición en la que el robot debe determinar sus coordenadas, será de 3 segundos.

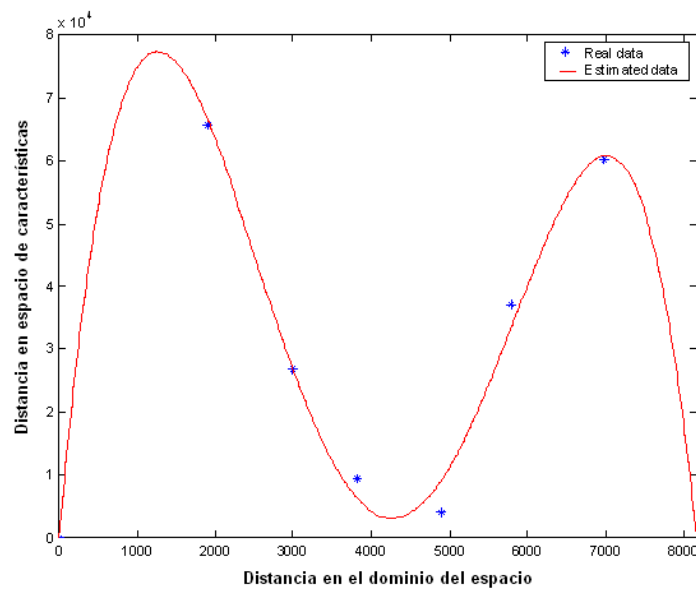


Fig. 7.27. Función de transformación.

En [BOL03] a partir de la determinación de la distancia del robot a tres muestras etiquetadas obtenidas con la función de transformación, se obtienen tres soluciones posibles que se corresponderán con los puntos de intersección de tres circunferencias trazadas con centro en la posición de cada muestra considerada y con radio igual al de la distancia computada entre el robot y la muestra etiquetada proporcionada por la función de transformación, adoptándose como solución final para las coordenadas del robot el centroide obtenido a partir de las tres posiciones consideradas.

En [BOL08] se propone una aportación a la metodología propuesta en [BOL03] a través de la consideración del ángulo de giro de la plataforma cuando esta se encuentra orientada hacia la posición de la fuente de sonido. Esto nos permite trabajar con sólo dos muestras

etiquetadas para obtener la posición del robot, que nos proporcionarán únicamente dos posibles soluciones, y en muchos casos nos permitirá también despreciar una de las dos posibles soluciones si una de ellas presenta un ángulo respecto a la fuente de sonido muy diferente al indicado por la plataforma giratoria, tal como hemos comentado en el capítulo anterior.

En los ensayos realizados se determina que el error máximo en la determinación de las coordenadas del robot es de un 15 % y el mínimo error obtenido en una posición del robot es de un 0,5 %.

7.6.3. Fuente de sonido: cámara climática.

En este apartado y los apartados siguientes nos volvemos a situar en el laboratorio docente de ensayos de componentes y equipos electrónicos.

7.6.3.1. Identificación del modelo.

La selección de la estructura del modelo paramétrico para el estudio de esta fuente de sonido en el laboratorio de ensayos de componentes electrónicos es la del modelo ARX (AutoRegresivo con variables exógenas) que hemos presentado en el capítulo 5 y en [MAN09a], en el que focalizaremos las diferentes posiciones del robot en el recinto en la determinación de los parámetros correspondientes a los polos del modelo.

El modelo viene definido por la siguiente expresión:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t - nk) + e(t) \quad (7.25)$$

El polinomio $A(q^{-1})$ es un polinomio autoregresivo de orden na :

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na} \quad (7.26)$$

La frecuencia de muestreo es de 44,1 kHz y el micrófono utilizado es de tipo cardioide, como hemos señalado anteriormente.

Las señales que se utilizarán para el proceso de identificación son las señales captadas en las posiciones de las muestras indicadas como M1, M2, M3, M4 y M5 en la figura 7.9 referenciadas anteriormente, y después de realizar un estudio experimental con las señales captadas en las posiciones de las muestras con objeto de minimizar el número de muestras de la señal necesario y el orden del modelo, se trabaja con 100000 muestras, 50000 para la identificación del modelo y 50000 para su validación, por lo que la duración del intervalo de las señales captadas es de 2,27 segundos.

Para calibrar estos 5 modelos, se utiliza el criterio de Akaike FPE (Final Prediction Error), este criterio permite seleccionar el orden del modelo que minimiza una función de calidad definida por la expresión:

$$FPE = V \frac{1 + d/N}{1 - d/N} \quad (7.27)$$

Donde d es el número total de parámetros estimados, N es el número de datos estimados y V es la función de pérdidas resultante del ajuste cuadrático de la estructura analizada. Además, para el conjunto estimado de los modelos se analizará la autocorrelación de los residuos y la correlación cruzada entre las entradas y los residuos comprobando que no muestren correlación, lo que indicará la bondad de los modelos.

El modelo de identificación ARX seleccionado tiene un número de polos $na = 10$, un número de ceros $nb = 2$ y un retardo $nk = 4$. En la figura 7.28 podemos observar por ejemplo la señal muestreada y la señal estimada para la posición de la muestra M5.

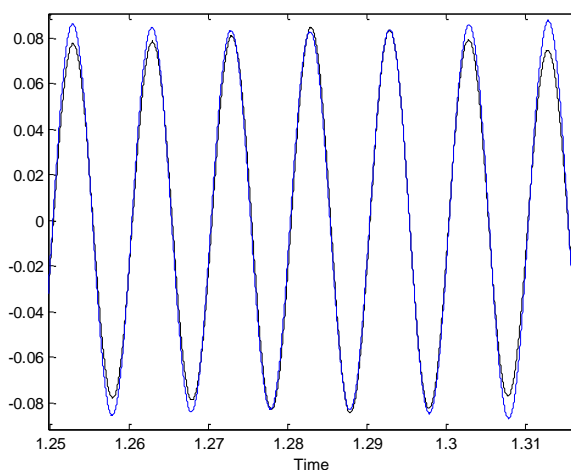


Fig. 7.28. Señal original M5 y su estimación.

Si consideramos, como hemos señalado en capítulos anteriores, que la respuesta del recinto debida a una combinación de N modos puede ser modelizada como un filtro de orden $2N$, podemos considerar que nuestro modelo ARX de 10 polos refleja que para modelizar con precisión la respuesta del recinto en las posiciones de las muestras únicamente es necesario considerar 5 modos de propagación de los 21 modos que teóricamente pueden ser excitados por la fuente de sonido.

La función de pérdidas y el error final de predicción para las 5 posiciones de las muestras analizadas se indica en la tabla 7.24 siguiente:

Muestra	Función de pérdidas	FPE
M1	4.19601e-010	4.19802e-010
M2	4.21587e-010	4.21789e-010
M3	5.50937e-010	5.51201e-010
M4	5.57981e-010	5.58249e-010
M5	6.55211e-010	6.55526e-010

Tabla 7.24. Función de pérdidas y FPE en las posiciones de las muestras.

El diagrama de polos y ceros conjunto de los diferentes modelos obtenidos en las posiciones de las muestras etiquetadas se indica en la figura 7.29, en la que podemos observar

la sensibilidad que muestran los polos respecto a las variaciones de las diferentes posiciones correspondientes a las señales captadas.

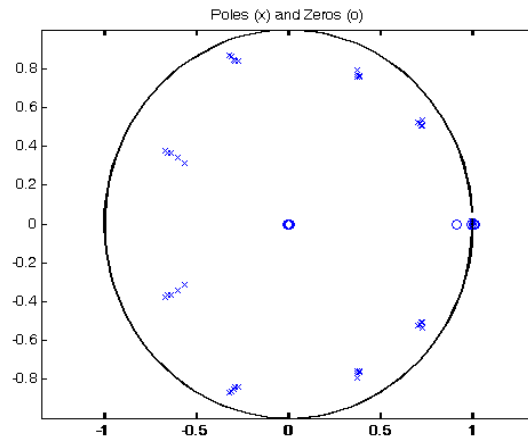


Fig. 7.29. Diagrama de polos y ceros.

7.6.3.2. Función de transformación e incertidumbre.

Para el establecimiento de la función de transformación consideraremos la descripción física del comportamiento del sonido en un recinto, que tal como hemos visto en capítulos anteriores describe una variación de la ganancia de la presión acústica de tipo sinusoidal que deriva de la respuesta de los diferentes modos de propagación excitados por la fuente de sonido que actúan en el recinto. En base a este comportamiento propondremos una estructura de la función de transformación que modelice un patrón de variación de los parámetros de las distintas funciones de transferencia que sea también de tipo sinusoidal.

Por otro lado, y dado que como hemos visto anteriormente, la variación del módulo de la ganancia de las funciones de transferencia del recinto presentaban una variación periódica definida principalmente por el periodo de la función de ganancia del modo principal, esperamos que el periodo de la función de transformación presente un valor muy próximo que al que nos define el modo principal.

Finalmente consideraremos para la definición de la función de transformación, que el valor de la incertidumbre máxima provocada por los diferentes desfases que se producen en los modos debidos a los diferentes coeficientes de absorción que presentan los límites y los distintos objetos del recinto sean del mismo orden que los obtenidos en la función de ganancia.

En los trabajos iniciales realizados en [BOL08] y [MAN09a] y en una primera aproximación a la función de transformación no se consideran las fuentes de incertidumbre que afectan a nuestro sistema de localización. Por ejemplo en [MAN09a] proponemos una función de transformación cuya representación gráfica se indica en la figura 7.30.

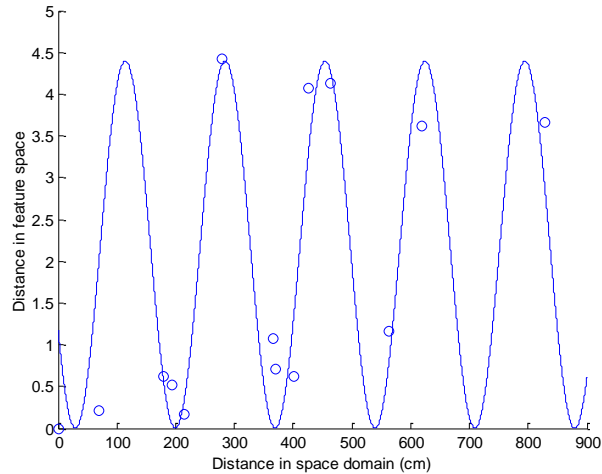


Fig. 7.30. Función de transformación.

En [MAN10] y trabajos posteriores se propone una función de transformación en la que se refleja la incertidumbre del sistema en el parámetro correspondiente al periodo de la función. No obstante, tal como hemos comentado en el capítulo anterior, esta forma de reflejar la incertidumbre en la función de transformación presenta la limitación de que no podemos aplicarla en aquellos casos en que nos proporcione soluciones que se correspondan a distancias relativamente elevadas en el dominio del espacio, ya que la incertidumbre aumenta de forma muy acusada con el valor de la distancia que consideremos en dicho dominio.

Una función de transformación obtenida con el criterio de minimización del error cuadrático medio con los valores proporcionados por las muestras etiquetadas del recinto para esta fuente de sonido y que evita este problema al mantener el valor de la incertidumbre constante e independiente de la distancia que consideremos en el dominio del espacio, viene dado por la expresión (7.28).

$$d_{fs} = 2,3 + 2,3 \sin\left(\frac{2\pi}{172}(d_{xy} \pm d_{inc}) - 2,8459\right) \quad (7.28)$$

En que d_{xy} es la distancia expresada en centímetros en el dominio del espacio y d_{inc} corresponde al valor de la incertidumbre expresado en centímetros del parámetro correspondiente al desfase de la función de transformación. Como vemos el periodo de la función interpolada es de 172 cm, valor muy próximo al del periodo del modo principal del modelo teórico, que tiene un valor de 175,7 cm.

La representación de la función nominal, considerando un valor de la incertidumbre nulo correspondiente a la expresión (7.28) se indica en la figura 7.31.

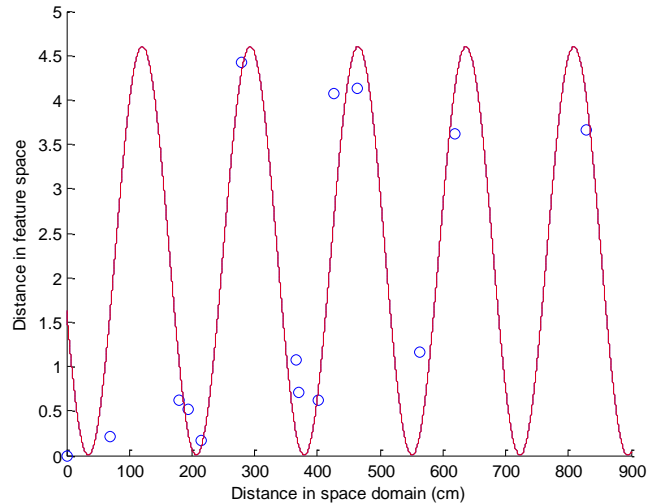


Fig. 7.31. Función de transformación nominal.

Para la determinación del valor del parámetro d_{inc} correspondiente a la incertidumbre en el desfase de la función, adoptaremos el mismo criterio que el que hemos adoptado en el estudio del modelo teórico no paramétrico, considerando el valor máximo de la incertidumbre el que se produce en el peor caso, que presenta un valor de 23 cm. Este valor es similar al que hemos obtenido para la incertidumbre máxima modelizada en la función de ganancia del modelo no paramétrico, que era de 21,2 cm.

La representación de la función de transformación nominal y su evolución hasta los límites del intervalo de incertidumbre adoptado se indica en la figura 7.32.

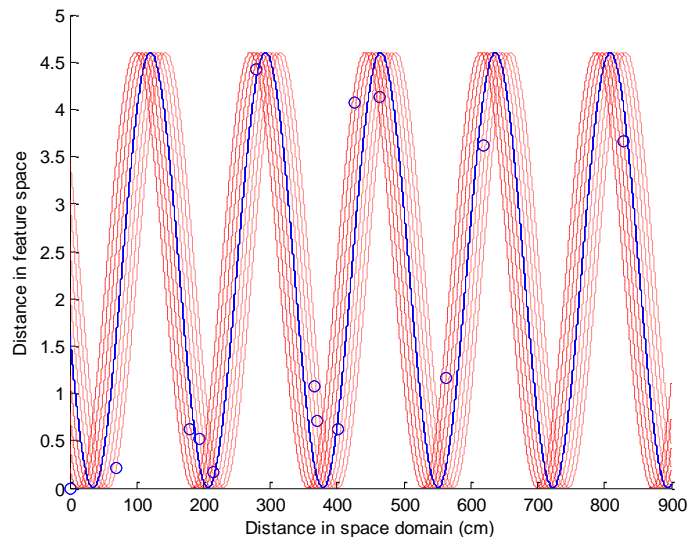


Fig. 7.32. Función de transformación nominal e incertidumbre.

7.6.3.3. Determinación de las posiciones del robot.

Como hemos comentado anteriormente, en la función de transformación para cada posición del robot se obtienen varias soluciones posibles respecto a cada muestra etiquetada considerada, dado que la distancia obtenida en el espacio de características intersecciona

varias veces con la función de transformación. Para descartar las soluciones incorrectas consideraremos la velocidad del robot de 15 cm/s y el máximo tiempo que el robot podrá desplazarse entre la última posición conocida, que suponemos determinada con precisión, y la nueva posición en la que el robot debe determinar sus coordenadas, que será de 11 segundos, al igual que en el modelo teórico no paramétrico.

No obstante, dentro del intervalo considerado de posibles soluciones podemos encontrar varios intervalos de incertidumbre separados, como se indica en la figura 7.33 correspondiente a la determinación de la distancia a la muestra M1 en la posición del robot R6, y a priori desconocemos en que intervalo se encontrará la solución correcta correspondiente a la posición del robot. Para solucionar este problema hemos dotado al robot de un sistema auxiliar de odometría, ya presentado anteriormente, del que únicamente requeriremos que calcule la distancia recorrida por el robot desde la última posición conocida.

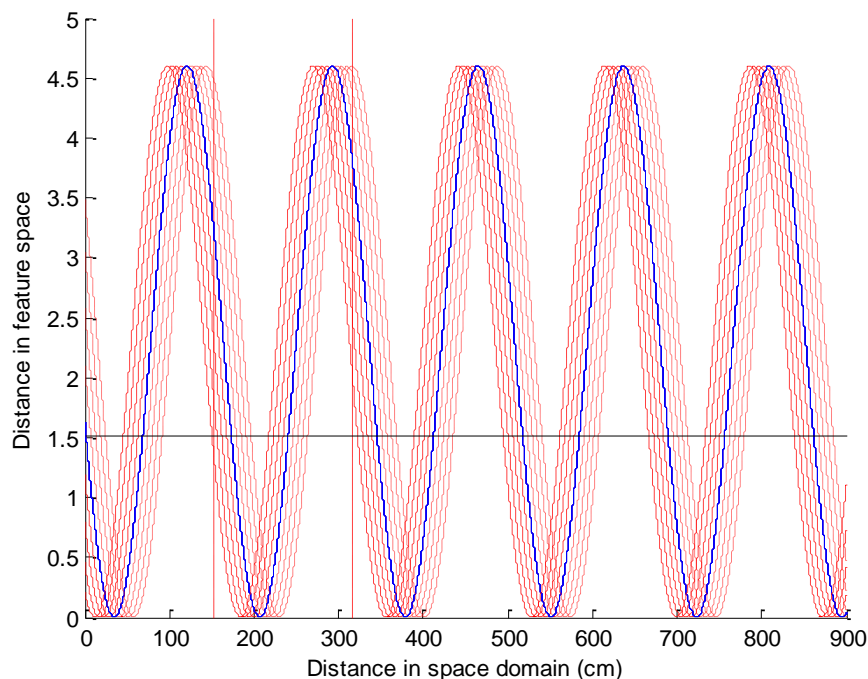


Fig. 7.33. Determinación de la distancia a la muestra M1 en la posición del robot R6.

Una vez determinado el intervalo de incertidumbre en el que se encontrará la posición actual del robot, el algoritmo de localización tomará como solución más probable para determinar la distancia del robot a la muestra considerada la obtenida al promediar las soluciones extremas del intervalo de soluciones posibles.

Finalmente señalar que hay que considerar que si los valores de las distancias en el espacio de características toman valores muy bajos o muy altos, la función de transformación no nos permitirá discernir los márgenes de incertidumbre, debido a que se solapan, como ocurre en el caso de la determinación de la distancia de la posición del robot a la muestra M4, que se indica en la figura 7.34.

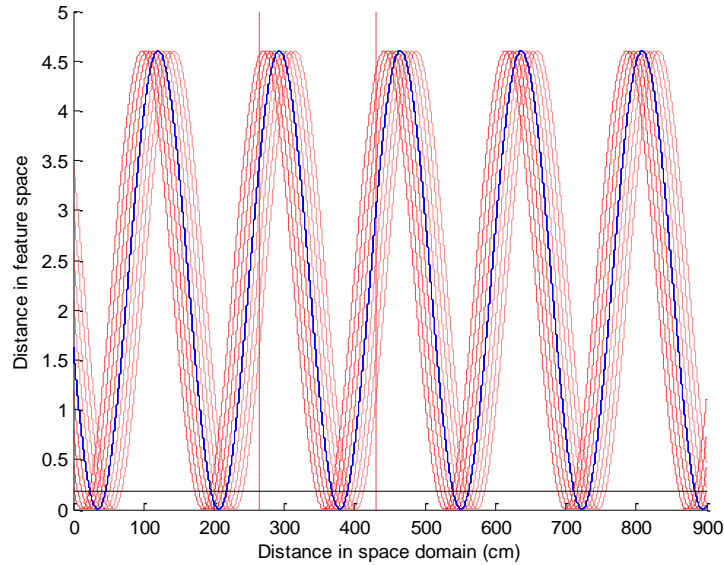


Fig. 7.34. Determinación de la distancia a la muestra M4 en la posición del robot R1.

En estos casos en que los intervalos de incertidumbre se encuentran solapados, el algoritmo de localización tomará como solución para determinar la distancia del robot a la muestra considerada el punto medio de la zona comprendida por los dos intervalos de incertidumbre.

A continuación comprobaremos en las distintas posiciones del robot, que las distancias en el dominio del espacio que nos determina la función de transformación con la incertidumbre adoptada obtenidas a partir de los distintos valores de las distancias del espacio de características, presenten unos valores válidos.

Para ello comprobaremos para cada posición del robot que el intervalo de posibles soluciones teóricas correspondientes a la distancia de la posición del robot a la muestra considerada que nos determina la función de transformación proporciona resultados que engloben al valor de la distancia real existente.

Los resultados extremos obtenidos considerando la incertidumbre, tanto en las posiciones del robot proporcionados por la función de transformación, de ± 23 cm, como en la determinación de las posiciones reales de las muestras por el robot, que presentan un valor de incertidumbre de $\pm 17,1$ cm como hemos indicado anteriormente, se indican en la tabla siguiente 7.25, donde todos los valores están expresados en centímetros:

Distancia	Distancia real (Mínima)	Distancia real (Máxima)	Distancia calculada (Mínima)	Distancia calculada (Máxima)	Incertidumbre teórica
R1 a M1	137,9	172,1	173,2	240,6	±33,7
R1 a M2	330,6	364,8	344,6	413,2	±34,3
R1 a M3	501,1	535,3	504,6	550,6	±23,0
R1 a M4	523,7	557,9	506,1	595,7	±44,8
R1 a M5	693,4	727,6	670,1	716,1	±23,0
R2 a M1	189,1	223,3	171,6	242,2	±35,3
R2 a M2	302,9	337,1	343,8	402,5	±29,4
R2 a M3	482,9	517,1	506,1	582,5	±38,2
R2 a M4	487,8	522,0	508,0	587,4	±39,7
R2 a M5	666,5	700,7	671,6	717,6	±23,0
R3 a M1	188,9	223,1	171,9	241,2	±34,7
R3 a M2	162,1	196,3	171,8	242,0	±35,1
R3 a M3	334,9	369,1	337,1	420,7	±41,8
R3 a M4	327,9	362,1	337,1	420,7	±41,8
R3 a M5	507,9	542,1	501,8	547,8	±23,0
R4 a M1	246,8	281,0	181,4	247,9	±33,3
R4 a M2	52,9	87,1	0	74,9	±37,5
R4 a M3	176,0	210,2	171,3	242,5	±35,6
R4 a M4	162,9	197,1	172,7	241,1	±34,2
R4 a M5	342,9	377,1	334,1	423,7	±44,8
R5 a M1	375,3	409,5	337,9	419,9	±41,0
R5 a M2	202,9	237,1	167,3	246,5	±39,6
R5 a M3	267,2	301,4	201,7	242,5	±20,4
R5 a M4	217,2	251,4	171,6	242,0	±35,2
R5 a M5	372,9	407,1	334,1	423,7	±44,8
R6 a M1	478,6	512,8	482,2	528,2	±23,0
R6 a M2	267,2	301,4	229,3	275,3	±23,0
R6 a M3	202,9	237,1	222,1	268,1	±23,0
R6 a M4	132,9	167,1	145,7	191,7	±23,0
R6 a M5	217,2	251,4	217,3	263,3	±23,0
R7 a M1	617,2	651,4	588,8	634,8	±23,0
R7 a M2	404,8	439,0	470,8	516,8	±23,0
R7 a M3	267,2	301,4	236,6	282,6	±23,0
R7 a M4	217,2	251,4	236,6	282,6	±23,0
R7 a M5	132,9	167,1	136,4	182,4	±23,0

Tabla 7.25. Resultados obtenidos con la función de transformación.

Como vemos en la tabla anterior, la mayoría de los intervalos de las distancias teóricas proporcionadas por la función de transformación comprenden valores de la distancia real existente entre el robot y la muestra considerada, salvo en la distancia de la posición del robot R1 a la muestra M1, la distancia de la posición del robot R2 a la muestra M2, la distancia de la posición del robot R5 a la muestra M3 y la distancia de la posición del robot R7 a la muestra M5.

Dado que las distancias teóricas erróneas calculadas de la posición del robot a las muestras etiquetadas presentarán un valor del ángulo formado desde la posición del robot respecto a la fuente de sonido que se alejará más del ángulo real indicado por la plataforma giratoria, que las del resto de soluciones teóricas, es de esperar que estas soluciones erróneas

queden descartadas en la mayoría de los casos, y podemos esperar resultados aceptables al aplicar el algoritmo de localización.

Una vez determinadas con la función de transformación las distintas distancias existentes entre la posición del robot analizada y las muestras etiquetadas, se obtienen las distintas soluciones correspondientes a los puntos de intersección de las circunferencias trazadas con centro en la muestra considerada, tal como muestra la figura 7.35, correspondiente a la determinación de la posición del robot R1, figura en la que se señala la línea que une la posición actual del robot con la posición de la fuente de sonido.

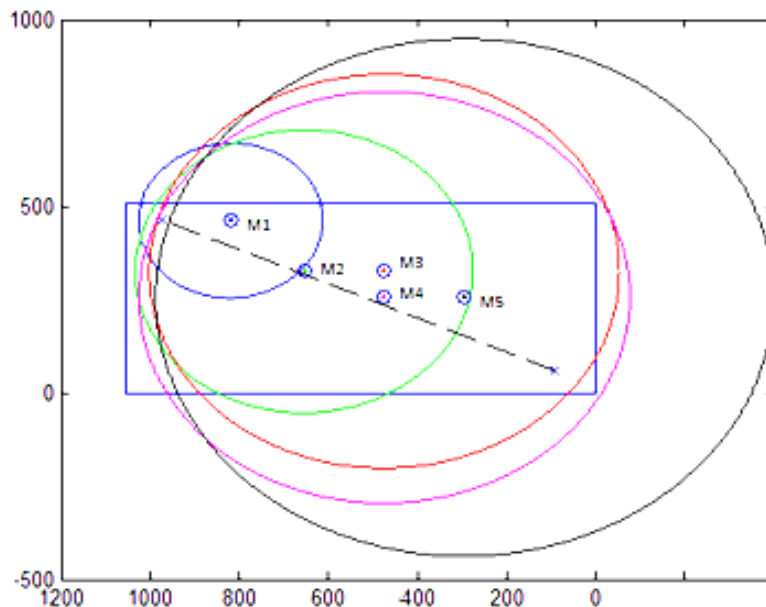
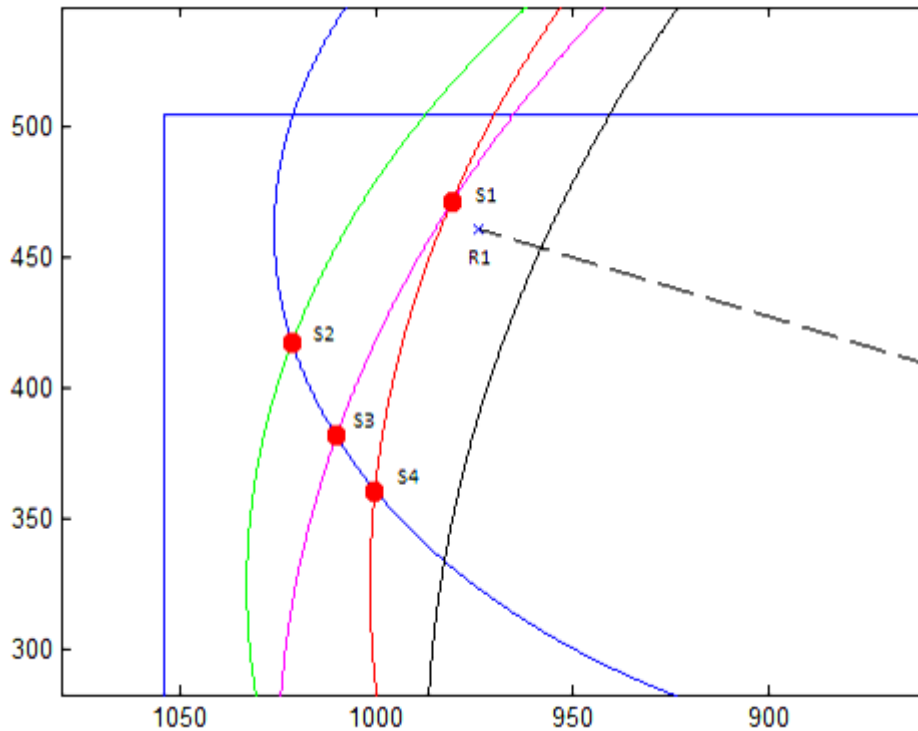


Fig. 7.35. Determinación de la posición del robot R1.

Si representamos para este caso en la figura 7.36 la zona que comprende las posibles soluciones al considerar las que se encuentran dentro de los límites del recinto y teniendo en cuenta la velocidad de desplazamiento del robot, podemos observar en dicha figura que la solución que proporciona un ángulo más próximo al ángulo indicado por la plataforma giratoria es la correspondiente a la posición S1.



Fig, 7.36. Determinación de la posición del robot R1.

En los ensayos realizados en el recinto el error máximo encontrado en el valor del ángulo de orientación de la plataforma respecto a la posición adoptada de la fuente de sonido es de $1,9^\circ$. Este error puede provocar una incertidumbre adicional para la determinación de la solución correcta si las distintas soluciones encontradas se encuentran relativamente alineadas respecto a la posición de la fuente de sonido. En estos casos se tomará como solución para las coordenadas del robot el resultado de promediar las coordenadas proporcionadas por las distintas posibles soluciones, como hemos indicado en el capítulo anterior.

Para finalizar, en la tabla 7.26 se indican los resultados del cálculo de la posición del robot y los errores absolutos y relativos en cada posición del robot analizada.

POS	Coordenadas Calculadas (cm)		Error Absoluto (cm)		Error Relativo %	
	X	Y	X	Y	X	Y
R1	981,3	469,9	-7,3	-8,9	0,75	1,93
R2	983,9	336,0	-9,9	-11,0	1,02	3,38
R3	835,8	260,9	-16,8	-5,9	2,05	2,31
R4	672,7	267,3	-18,7	-12,3	2,86	4,82
R5	641,8	122,0	12,2	-17,0	-1,87	16,19
R6	472,1	93,7	1,9	11,3	-0,40	-10,76
R7	267,4	97,8	26,6	7,2	-9,05	-6,86
Error medio:			-1,71	-5,23	-0,66	1,57

Tabla 7.26. Resultados obtenidos con la cámara climática.

Como vemos en la tabla, los errores medios se mantienen en valores muy pequeños, siendo superiores en el cálculo de la coordenada y y que en el cálculo de la coordenada x , y las únicas posiciones del robot en que el algoritmo ha proporcionado más de una solución posible considerando la incertidumbre en el ángulo de giro de la plataforma han sido las posiciones R3 y R5, en las que las coordenadas finalmente adoptadas para la posición asignada del robot han sido el resultado de promediar las distintas soluciones, tal como hemos comentado anteriormente.

La incertidumbre máxima que presentan las soluciones aportadas por el sistema de localización es de $\pm 40,1$ cm tanto para la determinación de la coordenada x como para la determinación de la coordenada y .

7.6.4. Fuente de sonido: insoladora.

7.6.4.1. Identificación del modelo.

Al igual que con la anterior fuente de sonido, las señales que se utilizarán para el proceso de identificación son las señales captadas en las posiciones de las muestras referenciadas como M1, M2, M3, M4 y M5. En esta segunda fuente de sonido intentaremos reducir el número de muestras de las distintas señales captadas necesarias para identificar los modelos correctamente, con objeto de minimizar el tiempo requerido por el robot para efectuar su autolocalización en el recinto.

Finalmente se obtiene un valor de 10000 muestras, 5000 se usan para efectuar la identificación del modelo y 5000 para su validación, por lo que la duración del intervalo de las distintas señales captadas es de 0,22 segundos.

Dado que trabajamos en el mismo recinto, en las mismas posiciones de las muestras y en un margen de frecuencias muy parecido al seleccionado con la anterior fuente de sonido, trabajaremos con un orden del modelo idéntico al obtenido con la anterior fuente de sonido. El modelo de identificación ARX seleccionado tiene, al igual que el adoptado con la anterior fuente de sonido, un número de polos $na = 10$, un número de ceros $nb = 2$ y un retardo $nk = 4$, y proporciona unos buenos resultados como veremos a continuación. En la figura 7.37 podemos observar por ejemplo la señal muestreada y la señal estimada para la posición de la muestra M5.

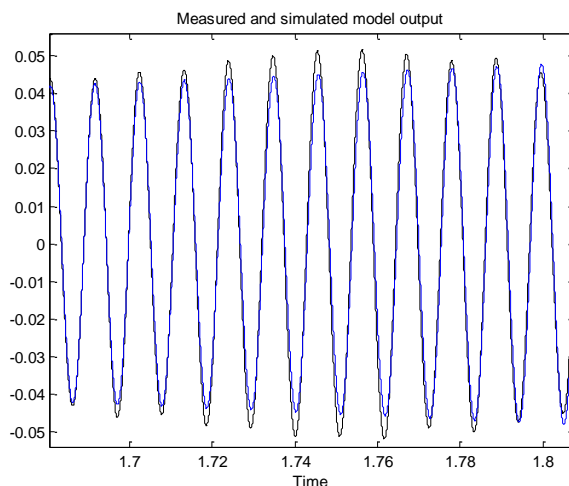


Fig. 7.37. Señal original M5 y su estimación.

La función de pérdidas y el error final de predicción para las 5 posiciones de las muestras analizadas se indica en la tabla 7.27 siguiente:

Muestra	Función de pérdidas	FPE
M1	1.42847e-015	1.43535e-015
M2	2.40451e-015	2.41607e-015
M3	2.16656e-015	2.17698e-015
M4	3.52182e-015	3.53876e-015
M5	1.35633e-015	1.36286e-015

Tabla 7.27. Función de pérdidas y FPE en las posiciones de las muestras.

La función de pérdidas y el error final de predicción son mucho menores que para el caso de utilizar como fuente de sonido la cámara climática, que presentaban un orden de alrededor de $10e-10$, posiblemente debido al hecho de que la posición de la cámara climática provoca que se exciten muchos más modos de propagación que los que excita esta fuente de sonido, aumentando la complejidad de la señal estacionaria captada.

El diagrama de polos y ceros conjunto de los diferentes modelos obtenidos en las posiciones de las muestras etiquetadas se indica en la figura 7.38, en la que podemos observar la sensibilidad que muestran los polos respecto a las variaciones de las diferentes posiciones correspondientes a las señales captadas.

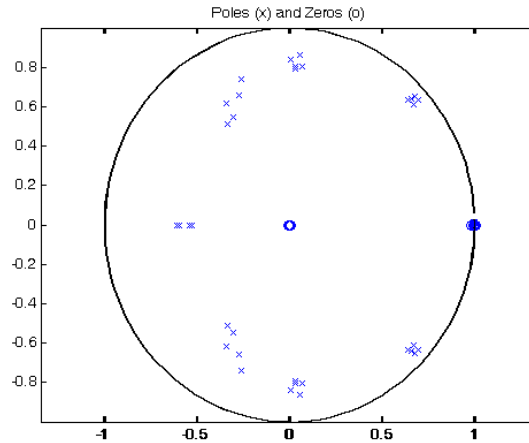


Fig. 7.38. Diagrama de polos y ceros.

La respuesta obtenida con esta segunda fuente de sonido refuerza la conclusión que hemos obtenido con el estudio realizado con la cámara climática, en cuanto a que podemos considerar que si con nuestro modelo ARX de 10 polos podemos reflejar con la suficiente precisión la respuesta del recinto en las posiciones de las muestras, sólo será necesario considerar 5 modos de propagación de los 10 modos que teóricamente podrían ser excitados también para este caso.

7.6.4.2. Función de transformación e incertidumbre.

Para la definición de la función de transformación, partiremos con la hipótesis de que la función será muy similar a la que hemos obtenido con la anterior fuente de sonido, al trabajar en el mismo recinto, con las mismas posiciones de las muestras y en un margen de frecuencias muy similar.

No obstante, las ganancias de las distintas RTF, y por tanto el valor de sus parámetros, pueden ser distintos dada la diferente ubicación de la distancia a las fuentes de sonido de las señales captadas que tomamos como entrada al sistema, y por tanto, el valor máximo de la función de transformación se espera que sea diferente.

En cuanto al periodo y al desfase de la función de transformación, se espera que sean muy similares, así como el valor de la incertidumbre máxima provocada por los diferentes desfases que se producen en los modos debidos a los diferentes coeficientes de absorción que presentan los límites y los distintos objetos en el recinto.

Por ejemplo en [MAN10] proponemos una función de transformación muy similar a la obtenida con la anterior fuente de sonido, y cuya representación gráfica se indica en la figura 7.39.

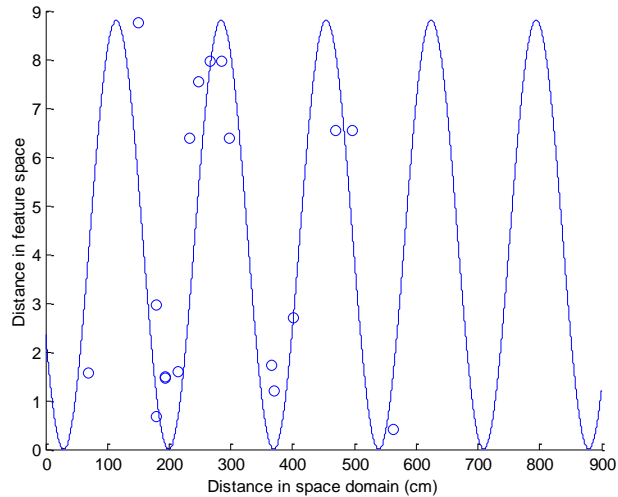


Fig. 7.39. Función de transformación.

En [MAN10] y trabajos posteriores también se propone una función de transformación en la que se refleja la incertidumbre del sistema en el parámetro correspondiente al periodo de la función, y que presenta por tanto la limitación ya comentada de que no podemos aplicarla en aquellos casos en que nos proporcione soluciones que se correspondan a distancias relativamente elevadas en el dominio del espacio, ya que la incertidumbre aumenta de forma muy acusada con el valor de la distancia que consideremos en dicho dominio.

Una función de transformación obtenida al procesar los valores proporcionados por las muestras etiquetadas del recinto para esta fuente de sonido y que evita este problema al presentar la estructura genérica que hemos propuesto en (6.21), viene dada por la expresión (7.29).

$$d_{fs} = 4,8 + 4,8 \sin\left(\frac{2\pi}{170}(d_{xy} \pm d_{inc}) - 2,6611\right) \quad (7.29)$$

Como vemos el periodo de la función es de 170 cm, valor muy próximo al del periodo del modo principal seleccionado en el modelo teórico, que tiene un valor de 175,7 cm, y al de la anterior función de transformación, que tiene un valor de 172 cm. La dispersión en estos valores puede ser debida al conjunto de las diferentes fuentes de incertidumbre que afectan a nuestro sistema.

La representación de la función nominal, considerando un valor de la incertidumbre nulo, correspondiente a la expresión (7.29) se indica en la figura 7.40.

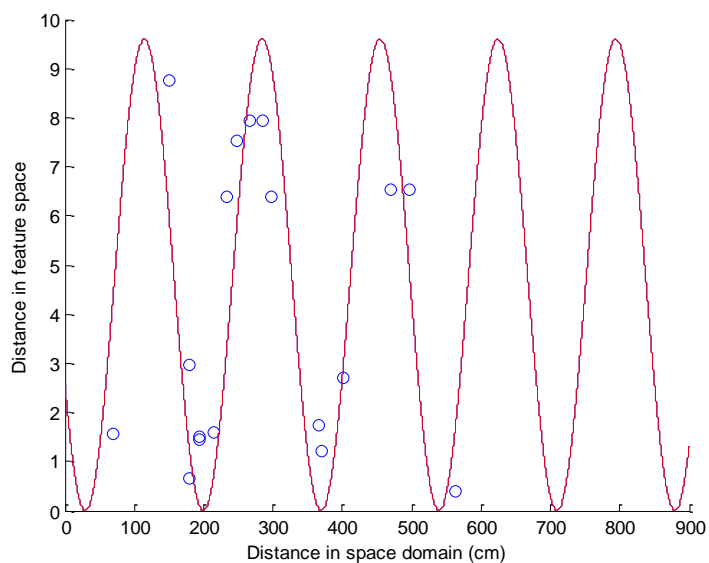


Fig. 7.40. Función de transformación nominal.

Para la determinación del valor del parámetro d_{inc} correspondiente a la incertidumbre en el desfase de la función, adoptaremos el criterio más conservador, al igual que el que hemos adoptado en el estudio del modelo teórico no paramétrico, considerando el valor máximo de la incertidumbre el que se produce en el peor caso, que presenta un valor de 23 cm. Este valor es igual al obtenido con la fuente de sonido anterior, y relativamente próximo al que hemos obtenido para la incertidumbre máxima modelizada por la función del factor de ganancia del modelo teórico, que era de 16,1 cm.

La representación de la función de transformación nominal y su evolución hasta los límites del intervalo de incertidumbre adoptado se indica en la figura 7.41.

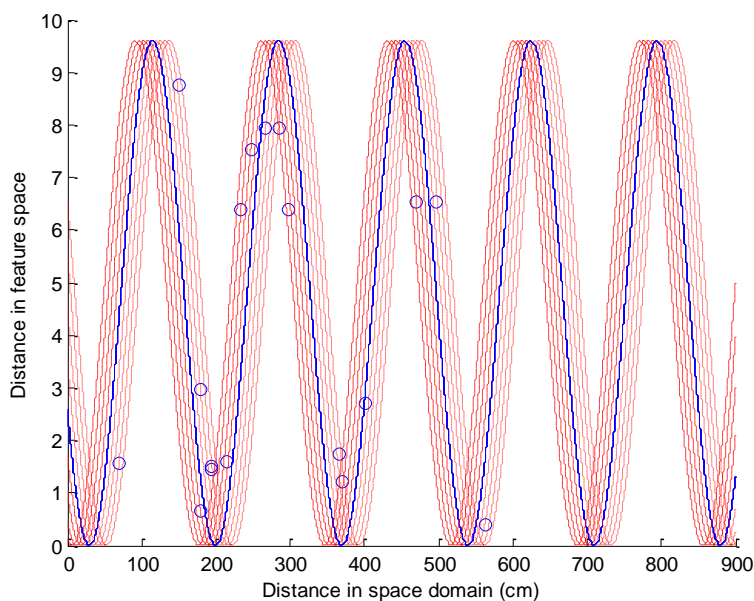


Fig. 7.41. Función de transformación nominal e incertidumbre.

7.6.4.3. Determinación de las posiciones del robot.

Para descartar las soluciones incorrectas suministradas por la función de transformación, consideraremos la velocidad del robot de 15 cm/s y que el máximo tiempo que el robot podrá desplazarse entre la última posición conocida y la nueva posición en la que el robot debe determinar sus coordenadas, será de 11 segundos, al igual que en el caso de la anterior fuente de sonido y que en los casos estudiados con el modelo teórico.

A continuación comprobaremos para cada posición del robot, al igual que hemos realizado también con la anterior fuente de sonido, que el intervalo de posibles soluciones teóricas correspondientes a la distancia de la posición del robot a la muestra considerada que nos determina la función de transformación, proporciona resultados que coincidan con la distancia real existente considerando la incertidumbre en su determinación.

Los resultados extremos obtenidos considerando la incertidumbre, tanto en las posiciones del robot proporcionados por la función de transformación, como en la determinación de las posiciones reales de las muestras, se indican en la tabla siguiente 7.28, donde todos los valores están expresados en centímetros.

Como vemos en la tabla, la mayoría de los intervalos de las distancias teóricas proporcionadas por la función de transformación engloban a valores de la distancia real existente entre el robot y la muestra considerada, salvo en la distancia de la posición del robot R3 a la muestra M5, la distancia de la posición del robot R5 a la muestra M3, la distancia de la posición del robot R6 a la muestra M2 y las distancias de la posición del robot R7 a las muestras M1 y M3, por lo que podemos esperar resultados aceptables al aplicar el algoritmo de localización.

Distancia	Distancia real (Mínima)	Distancia real (Máxima)	Distancia calculada (Mínima)	Distancia calculada (Máxima)	Incertidumbre teórica
R1 a M1	137,9	172,1	164,7	234,3	±34,8
R1 a M2	330,6	364,8	323,0	369,0	±23,0
R1 a M3	501,1	535,3	494,7	584,3	±44,8
R1 a M4	523,7	557,9	548,4	594,4	±23,0
R1 a M5	693,4	727,6	681,0	738,0	±28,5
R2 a M1	189,1	223,3	160,7	238,3	±38,8
R2 a M2	302,9	337,1	329,9	402,5	±36,3
R2 a M3	482,9	517,1	500,5	578,5	±39,0
R2 a M4	487,8	522,0	489,4	535,4	±23,0
R2 a M5	666,5	700,7	669,5	749,5	±40,0
R3 a M1	188,9	223,1	157,0	242,0	±42,5
R3 a M2	162,1	196,3	146,9	192,9	±23,0
R3 a M3	334,9	369,1	318,8	364,8	±23,0
R3 a M4	327,9	362,1	309,7	355,7	±23,0
R3 a M5	507,9	542,1	553,5	633,5	±40,0
R4 a M1	246,8	281,0	204,2	250,2	±23,0
R4 a M2	52,9	87,1	0	72,2	±36,1
R4 a M3	176,0	210,2	157,5	241,5	±42,0
R4 a M4	162,9	197,1	162,8	236,2	±36,7
R4 a M5	342,9	377,1	317,0	363,0	±23,0
R5 a M1	375,3	409,5	389,0	435,0	±23,0
R5 a M2	202,9	237,1	211,2	257,2	±23,0
R5 a M3	267,2	301,4	212,4	258,4	±23,0
R5 a M4	217,2	251,4	202,8	248,8	±23,0
R5 a M5	372,9	407,1	390,1	436,1	±23,0
R6 a M1	478,6	512,8	471,4	517,4	±23,0
R6 a M2	267,2	301,4	309,0	355,0	±23,0
R6 a M3	202,9	237,1	215,2	261,2	±23,0
R6 a M4	132,9	167,1	146,9	192,9	±23,0
R6 a M5	217,2	251,4	223,0	269,0	±23,0
R7 a M1	617,2	651,4	666,0	716,8	±25,4
R7 a M2	404,8	439,0	339,4	410,0	±35,3
R7 a M3	267,2	301,4	334,0	366,7	±16,4
R7 a M4	217,2	251,4	155,1	243,9	±44,4
R7 a M5	132,9	167,1	153,7	232,5	±39,4

Tabla 7.28. Resultados obtenidos con la función de transformación expresados en centímetros.

Para finalizar, en la tabla 7.29 se indican los resultados del cálculo de la posición del robot y los errores absolutos y relativos en cada posición del robot analizada.

POS	Coordenadas Calculadas (cm)		Error Absoluto (cm)		Error Relativo %	
	X	Y	X	Y	X	Y
R1	974,9	454,3	-0,9	6,7	0,1	-1,5
R2	979,0	341,8	-5,0	-16,8	0,5	5,2
R3	820,0	254,1	-1,0	0,9	0,1	-0,4
R4	670,6	289,0	-16,6	-34,0	2,5	13,3
R5	632,1	93,8	21,9	11,2	-3,3	-10,7
R6	518,0	90,9	-44,0	14,1	9,3	-13,4
R7	362,5	89,6	-68,5	15,4	23,3	-14,7
Error medio:			-16,30	-0,36	4,64	-3,15

Tabla 7.29. Resultados obtenidos con la insoladora.

La única posición del robot en que el algoritmo ha proporcionado más de una solución posible considerando la incertidumbre en el ángulo de giro de la plataforma ha sido la posición R3, en la que las coordenadas finalmente adoptadas para la posición asignada del robot han sido el resultado de promediar las distintas soluciones.

Por otro lado, vemos que las posición del robot R7 es la que ha generado un error relativo mucho mayor en el cálculo de la coordenada x que el resto de posiciones analizadas, este hecho parece indicar que la señal captada en la posición R7 se ve fuertemente influenciada por el diagrama de directividad de la insoladora, cuyo efecto no ha sido modelizado al definir la función de transformación.

La incertidumbre máxima que presentan las soluciones aportadas por el sistema de localización es de $\pm 40,1$ cm tanto para la determinación de la coordenada x como para la determinación de la coordenada y.

7.6.5. Comparación de los resultados obtenidos con ambas fuentes de sonido.

A modo de resumen, indicamos en las tablas 7.30 y 7.31 siguientes, los valores obtenidos con ambas fuentes de sonido.

POS	Coordenadas Calculadas (cm)		Error Absoluto (cm)		Error Relativo %	
	X	Y	X	Y	X	Y
R1	981,3	469,9	-7,3	-8,9	0,75	1,93
R2	983,9	336,0	-9,9	-11,0	1,02	3,38
R3	835,8	260,9	-16,8	-5,9	2,05	2,31
R4	672,7	267,3	-18,7	-12,3	2,86	4,82
R5	641,8	122,0	12,2	-17,0	-1,87	16,19
R6	472,1	93,7	1,9	11,3	-0,40	-10,76
R7	267,4	97,8	26,6	7,2	-9,05	-6,86
Error medio:			-1,71	-5,23	-0,66	1,57

Tabla 7.30. Resultados obtenidos con la cámara climática.

POS	Coordenadas Calculadas (cm)		Error Absoluto (cm)		Error Relativo %	
	X	Y	X	Y	X	Y
R1	974,9	454,3	-0,9	6,7	0,1	-1,5
R2	979,0	341,8	-5,0	-16,8	0,5	5,2
R3	820,0	254,1	-1,0	0,9	0,1	-0,4
R4	670,6	289,0	-16,6	-34,0	2,5	13,3
R5	632,1	93,8	21,9	11,2	-3,3	-10,7
R6	518,0	90,9	-44,0	14,1	9,3	-13,4
R7	362,5	89,6	-68,5	15,4	23,3	-14,7
Error medio:			-16,30	-0,36	4,64	-3,15

Tabla 7.31. Resultados obtenidos con la insoladora.

Como hemos comentado anteriormente, es significativo en el caso de la insoladora el error tan elevado que genera la posición de la muestra R7 en comparación con los obtenidos en el resto de posiciones. Si no consideramos esta posición los resultados para esta fuente de sonido pasan a ser los indicados en la tabla siguiente:

POS	Coordenadas Calculadas (cm)		Error Absoluto (cm)		Error Relativo %	
	X	Y	X	Y	X	Y
R1	974,9	454,3	-0,9	6,7	0,1	-1,5
R2	979,0	341,8	-5,0	-16,8	0,5	5,2
R3	820,0	254,1	-1,0	0,9	0,1	-0,4
R4	670,6	289,0	-16,6	-34,0	2,5	13,3
R5	632,1	93,8	21,9	11,2	-3,3	-10,7
R6	518,0	90,9	-44,0	14,1	9,3	-13,4
R7	-	-	-	-	-	-
Error medio:			-7,60	-2,98	1,53	-1,23

Tabla 7.32. Resultados obtenidos con la insoladora.

Como vemos al comparar esta tabla de resultados con la tabla de resultados obtenidos con la insoladora, los errores medios obtenidos son muy reducidos y del mismo orden de magnitud, y los resultados muestran la suficiente exactitud como para considerar viable el sistema de localización propuesto en futuras aplicaciones de autolocalización de robots en recintos cerrados.

La incertidumbre presenta unos valores aceptables para ambas fuentes de sonido, presentando un valor máximo absoluto de 80,2 cm tanto para la determinación de la coordenada x, como para la determinación de la coordenada y, lo que representa un 7,6 % y un 15,9 % de la longitud y la anchura del recinto respectivamente.

7.7. Comparación de los resultados obtenidos con ambos modelos.

A modo de resumen, indicamos en las tablas siguientes, los valores obtenidos con ambas fuentes de sonido para ambos modelos.

POS	Coordenadas Calculadas (cm)		Error Absoluto (cm)		Error Relativo %	
	X	Y	X	Y	X	Y
R1	-	-	-	-	-	-
R2	990,0	330,4	16,0	5,4	1,64	1,66
R3	835,4	260,2	16,4	5,1	2,00	2,02
R4	650,9	253,9	-3,1	-1,1	-0,47	-0,43
R5	642,1	103,2	-12,0	-1,8	-1,83	-1,71
R6	476,4	105,6	2,4	0,6	0,50	0,57
R7	291,5	104,2	-2,5	-0,8	-0,85	-0,76
Error medio:			4,11	1,24	0,16	0,22

Tabla 7.33. Resultados obtenidos con la insoladora con el modelo teórico.

POS	Coordenadas Calculadas (cm)		Error Absoluto (cm)		Error Relativo %	
	X	Y	X	Y	X	Y
R1	974,9	454,3	-0,9	6,7	0,1	-1,5
R2	979,0	341,8	-5,0	-16,8	0,5	5,2
R3	820,0	254,1	-1,0	0,9	0,1	-0,4
R4	670,6	289,0	-16,6	-34,0	2,5	13,3
R5	632,1	93,8	21,9	11,2	-3,3	-10,7
R6	518,0	90,9	-44,0	14,1	9,3	-13,4
R7	-	-	-	-	-	-
Error medio:			-7,60	-2,98	1,53	-1,23

Tabla 7.34. Resultados obtenidos con la insoladora con el modelo paramétrico.

POS	Coordenadas Calculadas (cm)		Error Absoluto (cm)		Error Relativo %	
	X	Y	X	Y	X	Y
R1	988,5	468,0	14,5	7,0	1,48	1,52
R2	-	-	-	-	-	-
R3	829,6	258,4	10,6	3,4	1,29	1,33
R4	652,8	254,7	-1,2	-0,3	-0,18	-0,12
R5	644,0	103,5	-10,1	-1,5	-1,54	-1,43
R6	484,6	107,5	10,6	2,5	2,24	2,38
R7	312,1	111,6	18,1	6,6	6,14	6,29
Error medio:			10,02	1,78	1,32	1,41

Tabla 7.35. Resultados obtenidos con la cámara climática con el modelo teórico.

POS	Coordenadas Calculadas (cm)		Error Absoluto (cm)		Error Relativo %	
	X	Y	X	Y	X	Y
R1	981,3	469,9	-7,3	-8,9	0,75	1,93
R2	983,9	336,0	-9,9	-11,0	1,02	3,38
R3	835,8	260,9	-16,8	-5,9	2,05	2,31
R4	672,7	267,3	-18,7	-12,3	2,86	4,82
R5	641,8	122,0	12,2	-17,0	-1,87	16,19
R6	472,1	93,7	1,9	11,3	-0,40	-10,76
R7	267,4	97,8	26,6	7,2	-9,05	-6,86
Error medio:			-1,71	-5,23	-0,66	1,57

Tabla 7.36. Resultados obtenidos con la cámara climática con el modelo paramétrico.

Si comparamos los errores absolutos máximos y los errores relativos máximos producidos con ambos modelos en las distintas posiciones, podemos observar que son significativamente menores en el modelo teórico.

Si comparamos los errores medios relativos obtenidos por ambos modelos encontramos para la insoladora un error en el modelo teórico de un 0,16 % en la determinación de la coordenada x y de un 1,53 % en el modelo paramétrico, y de un 0,22 % en el modelo teórico en la coordenada y y de un -1,23 % en el paramétrico, por lo que podemos admitir que aunque los errores medios no son muy elevados, son ligeramente superiores en el modelo paramétrico para esta fuente de sonido.

Si comparamos los errores medios relativos obtenidos por ambos modelos al utilizar la cámara climática como fuente de sonido, encontramos un error en el modelo teórico de un 1,32 % en la determinación de la coordenada x y de un -0,66 % en el modelo paramétrico, y de un 1,41 % en el modelo teórico en la coordenada y y de un 1,57 % en el paramétrico, por lo que podemos admitir que ambos modelos proporcionan una exactitud similar para esta segunda fuente de sonido.

En cuanto a la incertidumbre, el modelo teórico presenta un valor máximo absoluto de 38,4 cm en la determinación de la coordenada x , lo que representa un 3,6 % de la longitud del recinto, y de 33,6 cm en la determinación de la coordenada y , lo que representa un 6,7 % de la anchura del recinto, valores máximos que se producen al utilizar como fuente de sonido la insoladora.

No obstante hay que considerar que estos valores máximos se producen cuando se solapan los intervalos de incertidumbre, y que como hemos visto anteriormente esta situación se genera para valores relativamente bajos o altos de la ganancia. Para las posiciones del robot que no se encuentren en estos casos hemos visto que el valor de la incertidumbre máxima se reduce a la mitad.

La incertidumbre máxima que presenta el modelo paramétrico tiene un valor máximo absoluto de 80,2 cm tanto para la determinación de la coordenada x , como para la determinación de la coordenada y , lo que representa un 7,6 % y un 15,9 % de la longitud y la anchura del recinto respectivamente.

Por tanto vemos que el modelo teórico presenta unos valores máximos de incertidumbre que son aproximadamente la mitad que los que presenta el modelo paramétrico, mostrando por tanto mejores prestaciones en este aspecto.

No obstante, el modelo teórico proporcionaría soluciones erróneas en las posiciones del robot R1 para el caso de utilizar la insoladora como fuente de sonido, y R2 para el caso de utilizar la cámara climática, ya que las soluciones correspondientes a la posición real del robot se salen fuera del margen de incertidumbre que hemos definido, como hemos visto anteriormente, y sería necesario que por ejemplo un sistema odométrico auxiliar nos indicara que las soluciones aportadas por el sistema de localización en estos casos o en casos similares son erróneas.

Por el contrario, en el modelo paramétrico, las soluciones correspondientes a la posición real del robot que se salen fuera del margen de incertidumbre que hemos definido en la función de transformación son despreciadas en su mayoría al comprobar la correspondencia entre el ángulo teórico que les corresponde y el ángulo real que indica la plataforma giratoria, por lo que podemos admitir que el modelo paramétrico presenta una mayor robustez en este aspecto.

No obstante, el modelo paramétrico ha proporcionado una solución con un error muy significativo en la posición de la muestra R7 al utilizar como fuente de sonido la insoladora, como hemos visto anteriormente, por lo que es conveniente también utilizar un sistema de posicionamiento auxiliar, como por ejemplo un sistema odométrico, que nos indicara que nos encontramos en este caso en el que deberíamos despreciar la solución aportada por el sistema de localización

Otra ventaja que presenta el modelo paramétrico respecto al modelo teórico es que para su aplicación no es necesario tener un conocimiento previo del recinto tan detallado como el que requiere el modelo teórico, por lo que le hace mejor candidato para su aplicación en aplicaciones de SLAM en entornos desconocidos.

Como hemos comentado anteriormente, aunque esta primera aproximación experimental ha sido realizada sin considerar el error acumulado que se produciría al considerar para la determinación de la posición actual, el error cometido en el cálculo de las posiciones anteriores del robot, y situando siempre la posición real analizada del robot en el centro del intervalo de posiciones posibles considerando su velocidad de desplazamiento y el intervalo de tiempo máximo de cálculo entre posiciones contiguas, se considera que los resultados obtenidos muestran la suficiente exactitud como para considerar viables los sistemas de localización propuestos para aplicaciones de autolocalización de robots en recintos cerrados.

CAPÍTULO 8: Conclusiones

8.1. Conclusiones generales.

En este apartado realizaremos un resumen de las conclusiones más importantes que hemos presentado en el desarrollo de la tesis, y que se referirán tanto a los modelos como a los sistemas de localización propuestos, entre otros aspectos.

La primera conclusión más importante es que ambos modelos y los sistemas de localización propuestos proporcionan, como hemos comprobado en los ensayos experimentales realizados, unos primeros buenos resultados que muestran su viabilidad para la aplicación en el campo de la autolocalización de robots móviles.

Otra conclusión importante que deriva del estudio teórico y que hemos contrastado en los resultados experimentales, deriva directamente de la elevada directividad que presenta la respuesta de la onda de presión sonora estacionaria en los recintos cerrados, que provoca la necesidad de determinar el ángulo de orientación del robot en el recinto respecto a algún punto de referencia conocido por el robot para poder implementar los sistemas de localización de una forma eficiente.

Por otro lado, se ha comprobado que para la aplicación de los modelos y los sistemas de localización propuestos es suficiente con el estudio de la señal captada en unas pocas muestras etiquetadas del recinto, situadas alrededor de la zona de trabajo del robot, para obtener buenos resultados, y también se ha realizado una primera comprobación experimental de que los sistemas de localización muestran buenos resultados para distintas posiciones de la fuente de sonido en el recinto.

No obstante, como hemos comprobado en los resultados experimentales obtenidos con el modelo teórico, es conveniente situar la posición de alguna de las muestras etiquetadas en la zona o zonas que preveamos que presenten una más difícil caracterización acústica, con objeto de que la incertidumbre que generan sea contemplada por la incertidumbre del modelo.

También es de destacar la comprobación de que el método de filtrado propuesto alrededor de la frecuencia de Schroeder para las distintas señales de audio captadas en el recinto, proporciona buenos resultados, permitiendo una reducción importante de la complejidad u orden de los modelos propuestos, aunque hay que considerar que para su aplicación deberemos conocer previamente las dimensiones del recinto donde trabajará el robot, tanto para su aplicación en el modelo teórico como para los modelos paramétricos propuestos.

El estudio teórico realizado, contrastado por estos primeros resultados experimentales, ha puesto de manifiesto también que la respuesta estacionaria acústica de la presión sonora en los recintos cerrados en función de la posición presenta un comportamiento de tipo periódico. Este comportamiento provoca que tanto la función que modeliza la variación del módulo de la de ganancia en función de la posición, propuesta en el modelo teórico, como la función de transformación propuesta en el modelo paramétrico, sean funciones periódicas que proporcionan varias soluciones posibles para la señal captada en una determinada posición del robot en el recinto.

Debido a este comportamiento nos es necesario para determinar la posición actual del robot con los sistemas de localización propuestos, conocer su posición anterior y considerar su velocidad de desplazamiento y el intervalo de tiempo transcurrido desde el cálculo de su última posición, para poder acotar el conjunto de posibles soluciones aportadas por los sistemas.

En el modelo teórico, al trabajar con los valores medios de la señal emitida por la fuente de sonido y de la señal captada por el robot en las distintas posiciones, a diferencia de los modelos paramétricos que trabajan con los valores instantáneos de las señales captadas muestreadas, los recursos computacionales y el tiempo de cálculo necesarios para la determinación de la posición del robot son más reducidos que en los modelos paramétricos.

Por otro lado, otra conclusión que consideramos muy significativa en el estudio realizado en la tesis es la comprobación de que una función de tipo sinusoidal presenta una buena aproximación a la respuesta estacionaria de la presión sonora acústica en función de la posición en los recintos cerrados. Relacionado con esto es destacable el hecho de que la función que modeliza la variación del módulo de la de ganancia en función de la posición, obtenida con el modelo teórico, con un periodo de un valor de 175,7 cm, y la función de transformación que relaciona la distancia en el espacio de características con la distancia en el espacio físico, obtenida con el modelo paramétrico, con un periodo de un valor de 172 cm, presentan en la práctica periodos con valores muy similares como vemos.

En la tesis se ha puesto también de manifiesto el gran número de fuentes de incertidumbre que encontramos al establecer la definición de los modelos de audio, incertidumbre que presenta un grado de complejidad muy elevado cuando la intentamos cuantificar en escenarios poco ideales como los que presentan por ejemplo las plantas industriales, y ha quedado justificada la necesidad de realizar un muestreo previo del recinto en un cierto número de muestras etiquetadas con objeto de poder realizar su estimación a partir de los valores experimentales extraídos.

Relacionado con este aspecto referente a la incertidumbre, es importante destacar que a la hora de seleccionar el punto del robot que utilizaremos para definir su posición, hay que considerar que si el punto seleccionado para definir su posición no coincide con la posición del sensor, generaremos una incertidumbre añadida en la determinación de la posición del robot. Esta incertidumbre sería debida a las distintas orientaciones que el robot puede presentar al efectuar las diferentes medidas en una misma posición, posición que vendría definida por unas coordenadas que no coincidirían con las coordenadas correspondientes a la posición del sensor.

La complejidad relacionada con este aspecto puede aumentar de forma considerable si trabajamos con varios sensores dedicados a la función de autolocalización del robot, si consideramos que normalmente se encuentran ubicados en distintos puntos del robot.

Los sistemas de localización propuestos en base a las funciones sinusoidales que modelizan de una forma directa o indirecta las variaciones periódicas de la respuesta acústica de los recintos, presentan su mayor grado de sensibilidad respecto a la incertidumbre que se presenta en el parámetro correspondiente a la fase de dichas funciones.

Este hecho facilita que podamos determinar experimentalmente el desfase existente entre los valores proporcionados por la función teórica y los valores que se presentan en las posiciones de las muestras etiquetadas del recinto, y que podamos realizar las medidas necesarias para estimar el valor de la incertidumbre máxima de los sistemas de localización propuestos de una forma relativamente cómoda en el recinto sometido a estudio, en comparación con la complejidad que se nos presentaría para realizar las medidas que serían necesarias para establecer la incertidumbre de otros parámetros de las funciones.

No obstante, dada la posibilidad de que los sistemas de localización proporcionen algún resultado con un error excesivo en algunas posiciones del robot, es conveniente reforzar el sistema con algún sistema auxiliar de autolocalización, como el sistema odométrico propuesto, que nos permitiera descartar las soluciones obtenidas en estas posiciones. Este sistema se podría reinicializar para cada nueva posición del robot calculada, estimando la máxima distancia recorrida por el robot desde la última posición y contrastando el resultado con el suministrado por nuestros sistemas de localización.

En cuanto a las conclusiones específicas que podemos extraer referentes al modelo teórico y a su sistema de localización asociado, podemos destacar los siguientes aspectos:

- Para el cálculo teórico *off-line* de sus parámetros no ha sido necesario tener un conocimiento previo del recinto muy detallado, siendo suficiente conocer sus dimensiones y el tipo de materiales que forman sus límites, así como el de los objetos de grandes dimensiones presentes en el recinto, como por ejemplo las mesas en el recinto analizado, para que el modelo proporcionara buenos resultados en el sistema de localización.
- A partir de los resultados experimentales obtenidos podemos admitir la validez de la hipótesis planteada relativa a la existencia de un grado de convergencia apreciable entre las soluciones aportadas por el modelo estadístico y las soluciones aportadas por el modelo ondulatorio en el margen de frecuencias considerado.
- El modelo requiere de un sistema auxiliar, como por ejemplo el presentado en base al sistema de visión artificial, que le permita determinar la orientación del robot respecto al origen de coordenadas y al eje de coordenadas adoptado en el recinto con una precisión elevada.
- Con objeto de captar la máxima intensidad del sonido en cualquier posición del robot, es conveniente la utilización de una plataforma giratoria que oriente el micrófono en la dirección que proporciona el máximo nivel en la señal captada.
- Según los resultados experimentales obtenidos, el número de posiciones que salen fuera del intervalo de incertidumbre contemplado por el modelo, se sitúa en un 14,3 % de las posiciones analizadas.
- La definición del modelo y de sus parámetros nos ha permitido proponer un modelo LPV que deriva directamente del modelo LTI presentado.

En cuanto a las conclusiones específicas que podemos extraer referentes a los modelos paramétricos y al sistema de localización asociado a los mismos, podemos destacar los siguientes aspectos:

- Aunque también es necesario tener un conocimiento previo del recinto, como las dimensiones del recinto y la ubicación de la fuente de sonido, no es necesario tener un conocimiento tan detallado como en el modelo teórico. Este aspecto lo hace a priori un candidato más adecuado para investigar su posible aplicación en técnicas de SLAM, como hemos comentado anteriormente.
- No obstante, la necesidad de trabajar simultáneamente con la señal emitida por la fuente de sonido y la señal captada en la posición del robot, provoca que tengamos que utilizar un sistema de radiofrecuencia encargado de la transmisión de la señal emitida por la fuente de sonido hacia el robot, lo que significa una complejidad añadida del hardware necesario que juega en contra de su aplicación en técnicas de SLAM.
- Otra ventaja que presentan los sistemas de localización propuestos en base a modelos paramétricos es que presentan una mayor robustez que el modelo teórico, ya que el número de posiciones que presentan un error excesivo no superan el 7,1 % de las posiciones analizadas.

8.2. Aportaciones realizadas.

Las aportaciones de la tesis que consideramos más significativas son las siguientes:

- Se han propuesto nuevos modelos acústicos para su uso en sistemas de autolocalización de robots móviles en recintos cerrados a partir del procesado de señales de audio, que es un campo poco explorado y que puede reportar importantes ventajas.
- Se han propuesto modelos que requieren para su aplicación el trabajar con un número reducido de muestras del recinto.
- Se han definido unas funciones, la función de la variación de la ganancia en el modelo teórico, y la función de transformación en el modelo paramétrico, en base al estudio del proceso físico de propagación del sonido en un recinto cerrado, que permiten obtener a partir del tratamiento de la señal captada por el robot, su posición en el recinto, proporcionando unos buenos resultados en los ensayos experimentales realizados.
- Se ha propuesto un filtrado de las distintas señales de audio captadas alrededor de la frecuencia de Schroeder, que reduce los modos de propagación del recinto a considerar, y que permite una reducción importante de la complejidad de los modelos de audio, proporcionando su aplicación buenos resultados.
- Se ha propuesto un nuevo modelo teórico de la función de transferencia acústica de un recinto en base al modelo ondulatorio, en el que la mayoría de sus parámetros se pueden calcular mediante expresiones teóricas obtenidas a partir de la descripción del comportamiento físico de la propagación del sonido en un recinto cerrado, y sin la necesidad

de tener un conocimiento previo del recinto tan detallado como el que exigen otros modelos ya existentes para otras aplicaciones.

- Para la definición de este modelo teórico se ha comprobado, en una primera aproximación experimental, la validez de la hipótesis planteada relativa a la existencia de un grado de convergencia elevado entre las soluciones aportadas por el modelo estadístico y las soluciones aportadas por el modelo ondulatorio en el margen de frecuencias considerado.

- También para este modelo, se ha propuesto una función, que hemos denominado función del factor de ganancia, que permite obtener un valor medio teórico de la ganancia del recinto constante y que permite su aplicación en la descripción acústica proporcionada por el modelo ondulatorio.

- Se ha propuesto una nueva forma de expresar el modelo estadístico de Sabine, que proporciona la ganancia media de la función de transferencia de un recinto.

- La determinación experimental de esta *ganancia media* nos permite tener, de forma indirecta, una nueva forma de determinar experimentalmente el tiempo de reverberación de un recinto, y podría servir para contrastar sus resultados con los obtenidos con las medidas típicas experimentales que se realizan actualmente para determinar el tiempo de reverberación y que requieren de fuentes de sonido de tipo impulsional.

8.3. Publicaciones derivadas del desarrollo de la tesis.

A continuación, pasaremos a detallar las diferentes publicaciones que se han derivado del desarrollo de la presente tesis.

1. A. Grau, Y. Bolea, M. Manzanares (2007): "Robust Industrial Machine Sounds Identification Based on Frequency Spectrum Analysis", 12th Iberoamerican Congress on Pattern Recognition, CIARP 2007, Lectures Notes in Computer Science, LNCS 4756, pp. 71-77, Santiago de Chile, 14-17 Noviembre. ISSN: 0302-9743.

2. Y. Bolea, M. Manzanares, A. Grau (2008): "Robust robot localization using non-speech sound in industrial environments", 2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2008, Cambridge, Reino Unido, 30 junio a 2 de julio de 2008. ISBN: 978-1-4244-1666-0.

3. M. Manzanares, Y. Bolea, A. Grau (2009), "Técnica de Localización de Móviles en Plantas Industriales basada en el Estudio de Señales de Audio Estacionarias", XXX Jornadas de Automàtica, Valladolid, España, 2-4 Septiembre 2009, ISBN: 13-978-84-692-2387-1.

4. M. Manzanares, E. Guerra, Y. Bolea, A. Grau (2009), "Robot Localization Method by Acoustical Signal Identification", 14th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA'09, Palma de Mallorca, 23-25 Septiembre 2009. ISBN: 978-1-4244-2728-4. ISSN: 1946-0759.

5. M. Manzanares, Y. Bolea, A. Grau (2010), "An Identified LPV Model for Mobile Robots Navigation with Audio Features", 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON2010, pp. 1064-1069, 7-10 Noviembre 2010, Glendale, Arizona, USA. ISBN: 978-1-4244-5226-2. DOI: 10.1109/IECON.2010.5675517.

6. M. Manzanares, Y. Bolea, A. Grau (2011): "Robust Audio Localization for Mobile Robots in Industrial Environments", Chapter 8 in Advances in Sound Localization, pp. 118-140, Pawel Strumillo (Ed.), ISBN: 978-953-307-224-1, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/robust-audio-localization-for-mobile-robots-in-industrial-environments>

7. M. Manzanares, Y. Bolea, A. Grau (2012), "A Simplified LPV Model for Mobile Robots Navigation with audio Features", Proceedings of the IX International Conference "System Identification and Control Problems" SICPRO'12, pp. 439-452, 30 Enero-2 Febrero, Moscú, Rusia. ISBN: 978-5-91450-098-3.

8. M. Manzanares, Y. Bolea, A. Grau, (2014), "Complexity Reduction in an Audio Identification Model for Mobile Robots Navigation-. IEEE Workshop on Complexity in Engineering. COMPENG 2014. Barcelona, 16- 17 Junio 2014. ISBN: 978-1-4799-4080-6.

9. M. Manzanares, Y. Bolea, A. Grau (2015), "Autolocalization system for autonomous robots based in a simplified theoretic acoustic model", submitted to Sensors Journal.

8.4. Líneas futuras de investigación.

Dado que la tesis se ha centrado en la definición de nuevos modelos y la propuesta de sistemas de localización en base a estos modelos con el tratamiento de señales de audio, y que en esta primera fase se ha realizado una primera aproximación experimental de su aplicación, se nos presenta un amplio campo de trabajo experimental a realizar en otros recintos y con diferentes fuentes de sonido, con objeto de poder profundizar en el estudio de un conjunto mayor de resultados.

Relacionado con este aspecto, el estudio de la incertidumbre de los parámetros de los modelos, en concreto del parámetro correspondiente al desfase de las funciones de ganancia y de transformación, en base a un más amplio abanico de resultados experimentales abre un campo de investigación que consideramos también muy importante.

En la tesis, se ha analizado de forma experimental el efecto del filtrado en la reducción del orden del modelo necesario para describir la respuesta acústica de un recinto con la precisión necesaria para los sistemas de autolocalización robótica propuestos. La realización de nuevos ensayos experimentales en otros recintos puede ser muy útil para profundizar en este aspecto.

La aplicación de estos sistemas de localización propuestos no tiene porque quedar restringida al campo de la robótica móvil, pudiéndose investigar en profundidad su aplicación para el caso de autolocalización y guiado de personas en este tipo de recintos, sobre todo en condiciones de iluminación deficientes o extremas, provocadas por ejemplo por la presencia de humo o de agentes accidentales similares en el recinto.

La integración de la información suministrada por nuestros sistemas de localización con la información suministrada por otros sensores, en sistemas de posicionamiento más complejos que realicen una fusión sensorial para determinar la posición de robots móviles en recintos cerrados, con la aplicación por ejemplo de un filtro de Kalman o de filtros de

partículas, permitiría comprobar con mayor profundidad la aportación de nuestros sistemas de localización en este campo de investigación.

Finalmente señalar que otro campo de investigación interesante que consideramos que podemos plantear es el de la consideración de la utilización de una fuente de sonido estructurada que emitiera una señal monofrecuencial en el recinto, en lugar de las señales más complejas emitidas por las máquinas industriales, si consideramos para su aplicación la ausencia de operarios en el recinto. Esto permitiría ubicarnos en la zona del espectro que más nos interese para poder aproximar con un mayor grado de precisión las soluciones proporcionadas por el modelo estadístico y las proporcionadas por el modelo ondulatorio, además de permitirnos simplificar el proceso de filtrado propuesto.

BIBLIOGRAFÍA

[ALL79] Allen, J., Berkley, D., Image Method for Efficiently Simulating Small Room Acoustics, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 65, Nº 4, 1979, pp.943-950.

[ANT88] Carrion, A. Diseño acústico de espacios arquitectónicos. Ed. UPC, 1988. ISBN:9788483012529.

[ARA88] Arau-Puchades H. An improved reverberation formula. *Acustica* 1988; 65(4):163–79

[BEG06] Begum, M.; Mann, G.K.I. & Gosine, R. (2006). A Fuzzy-Evolutionary Algorithm for Simultaneous Localization and Mapping of Mobile Robots, IEEE Congress on Evolutionary Computation, Canada, July, 2006.

[BEL05] Belforte, G., Dabbene, F., Gay, P. LPV approximation of distributed parameter systems in environmental modelling // *Environmental Modelling and Software*.2005, vol.20, pp.1063-1070.

[BIA97] Biannic, J.-M., Apkarian, P., Garrard, W.L. Parameter Varying Control of a High Performance Aircraft // *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1997, vol.20, pp. 225-231, 1997.

[BOL03] Bolea, Y.; Grau, A. & Sanfeliu, A. (2003). Non-speech Sound Feature Extraction based on Model Identification for Robot Navigation, 8th Iberoamerican Congress on Pattern Recognition, CIARP 2003, Lectures Notes in Computer Science, LNCS 2905, pp. 221-228, Havana, Cuba, November 2003.

[BOL08] Bolea, Y.; Manzanares, M. & Grau, A. (2008). Robust robot localization using non-speech sound in industrial environments, IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2008, Cambridge, United Kingdom, 30 June- 2 July 2008.

[BRAN97] Brandstein, M.S. & Silverman, H. (1997). A practical methodology for speech source localization with microphone arrays, *Computer Speech and Language*, vol. 11, no. 2, pp. 91-126, 1997.

[BRE84] Brebbia CA, Telles JCF, Wrobel LC. Boundary element techniques. New York: Springer, 1984

[BRUN05] Brunskill, M. & Roy, N. (2005). SLAM using Incremental Probabilistic PCA and Dimensionality Reduction, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Spain, April, 2005.

[CAR00] Caruso, M. (2000). Applications of magnetic sensors for low cost compass systems, IEEE Position Location and Navigation Symposium, pp. 177–184, San Diego, CA, USA, March 2000.

[CHR09] Christo, C.; Carvalho, E.; Silva, M.P. & Cardeira, C. (2009). Autonomous Mobile Robots Localization with Multiples iGPS Web Services, 14th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Palma de Mallorca, September, 2009.

[CSY03] Csyzewski, A. (2003). Automatic identification of sound source position employing neural networks and rough sets, *Pattern Recognition Letters*, vol. 24, pp. 921-933, 2003.

[DIM00] Di Marco, M.; Garulli, A.; Lacroix, S. & Vicino, A. (2000). A Set Theoretic Approach to the Simultaneous Localization and Map Building Problem, *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*, Sydney, Australia, December, 2000.

[DON99] Donoho, D.-L. (1999). De-noising by soft-thresholding, *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 33, no. 7, pp. 2183-2191, 1999.

[DON07] O'Donovan, Adam; Duraiswami, Ramani; Neumann, Jan; "Microphone Arrays as Generalized Cameras for Integrated Audio Visual Processing" , *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2007. CVPR'07.17-22 June 2007 Page(s):1 - 8.

[DUC03] J. Ducourneau, V. Planeau . The average absorption coefficient for enclosed spaces with non uniformly distributed absorption. *Elsevier Applied Acoustics* 64 (2003) 845–862, 26 March 2003.

[EAS95] Easwaran V., Craggs A. On futher validation and use of the finite element method to room acoustics. *J Sound Vib* 1995,187(2):195-212.

[EYR30] Eyring CF. Reverberation time in "dead" rooms. *Journal of Acoustical Society of America* 1930; 1:217–41.

[FIT59] Fitzroy D. Reverberation formulae which seems to be more accurate with non-uniform distribution of absorption. *Journal of Acoustical Society of America* 1959; 31:893–7

[FUR91] S. Furui and M. M. Sondhi, *Advances in Speech Signal Processing*. New York: Marcel Dekker, 1991.

[GRA07] Grau, A.; Bolea, Y. & Manzanares, M. (2007). Robust Industrial Machine Sounds Identification based on Frequency Spectrum Analysis, *12th Iberoamerican Congress on Pattern Recognition, CIARP 2007, Lecture notes in Computer Science, LNCS 4756*, pp. 71-77, Valparaiso, Chile, November 2007.

[GUI06] Guiarré, L., Bauso, D., Falugi, P., Bamieh, B. LPV model identification for gain scheduling control: An application to rotating stall and surge control problem // *Control Engineering Practice*. 2006, vol. 14(4), pp. 351-361.

[GUS00] Gustaffson, T.; Pota, H.R.; Vance, J.; Rao, B.D. & Trivedi, M.M. (2000). Estimation of Acoustical Room Transfer Functions, *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control*, Sydney, Australia, December 2000.

[HAN92] Haneda, Y.; Makino, S. & Kaneda, Y. (1992). Modeling of a Room Transfer Function Using Common Acoustical Poles, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP-92*, vol.2, pp. 213–216, 1992.

[HAN94] Y. Haneda, S. Makino, Y. Kaneda, and N. Koizumi, "ARMA modeling of a room transfer function at low frequencies," *J. Acoust. Soc. Jpn. E*, vol. 15, pp. 353–355, Sept. 1994.

[HAN99] Haneda, Y.; Kaneda, Y. & Kitawaki, N. (1999). Common-Acoustical-Pole and Residue Model and Its Application to Spatial Interpolation and Extrapolation of a Room Transfer Function, *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing*, vol. 7, no. 6, Nov. 1999.

[ISO09] ISO 3382-1, *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters* (2009).

[KHE12] Kherzy, S. & Shalkouhi, P. (2012). The Schroeder Frequency of Furnished and Unfurnished Spaces. *Romanian Journal of Acoustics & Vibration*;2012, Vol. 9 Issue 2, p113.

[KAR02a] M. Karjalainen; P. Antsalo; A. Makivirta, T. Peltonen & V. Valimaki. Estimation of Modal Decay Parameters from Noisy Response Measurements., *J. Audio Eng. Soc.*,Vol. 50, Nº 11, 2002 November, pp 867-877.

[KAR02b] M. Karjalainen; P. A. A. Esquef; P. Antsalo; A. Makivirta & V. Valimaki. Frequency-Zooming ARMA Modeling of Resonant and Reverberant Systems, *J. Audio Eng. Soc.*,Vol. 50, Nº 12, 2002 December.

[KIM06] Kim, H.-D.; Kim, D.-W. & Sim, K.B. (2006). Simultaneous Localization and Map Building using Vision Camera and Electrical Compass, *SICE-ICASE International Joint Conference*, Korea, October, 2006.

[KIM07] Kim, H.-D.; Seo, S.-W.; Jang, I.-H. & Sim, K.B. (2007). SLAM of Mobile Robot in the indoor Environment with Digital Magnetic Compass and Ultrasonic Sensors, *International Conference on Control, Automation and Systems*, Oct. 17-20, 2007, Seoul, Korea.

[KIM09a] Kim, Y.-E.; Su, D.-H.; Chung, G.-J.; Huang, X. & Lee, C.-D. (2009). Efficient Sound Source Localization Method Using Region Selection, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2009*, Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea July 5-8, 2009.

[KIM09b] Kim, H.S. & Choi, J. (2009). Binaural Sound Localization based on Sparse Coding and SOM, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 11-15, 2009, St. Louis, USA.

[KIN95] Kinsler, L.; Frey, A.; Coppens, A. & Sanders, J. (1995). *Fundamentals of Acoustics*, Limusa Ed., Barcelona, 1995.

[KNA76] Knapp, C.H. & Carter, G.C. (1976). The generalized correlation method for estimation of time delay, *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, vol. Assp-24, no. 4, 1976.

[KRO68] A. Krokstad, S. Strom, S. Sorsdal, "Calculating the acoustical room response by the use of a ray tracing technique," *J. Sound Vibration*, 8(1): 118-125, 1968.

[KUT09] Kuttruff, H. *Room Acoustics*, Taylor & Francis Group, New York, 2009

[LIN01] Lin, J., *Feature Extraction of Machine Sound using Wavelet and its Application in Fault Diagnosis*, *NTD&E International*, vol.34, pp.25-30, 2001.

[LJU87] Ljung, L. (1987). *System identification: Theory for the user*. *Prentice-Hall*, 1987.

[LUO02] Luo, R.C.; Yih, C.-C. & Su, K.L. (2002). Multisensor Fusion and Integration: Approaches, Applications and Future Research Directions, IEEE Sensors Journal, Vol. 2, no. 2, April 2002.

[MAK93] S. Makino, Y. Kaneda, and N. Koizumi, "Exponentially weighted stepsize NLMS adaptive filter based on the statistics of a room impulse response," IEEE Trans. Speech Audio Processing, vol. 1, pp. 101–108, Jan. 1993.

[MAL93] Mallat, S. & Zhang, Z. (1993). Matching pursuits with time-frequency dictionaries, IEEE Trans. on Signal Processing, vol.45, no.12, pp. 3397-3415, 1993.

[MAN09a] M. Manzanares, E. Guerra, Y. Bolea, A. Grau (2009), "Robot Localization Method by Acoustical Signal Identification", 14th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA'09, Palma de Mallorca, 23-25 Septiembre 2009. ISBN: 978-1-4244-2728-4. ISSN: 1946-0759.

[MAN09b] M. Manzanares, Y. Bolea, A. Grau (2009), "Técnica de Localización de Móviles en Plantas Industriales basada en el Estudio de Señales de Audio Estacionarias", XXX Jornadas de Automàtica, Valladolid, España, 2-4 Septiembre 2009, ISBN: 13-978-84-692-2387-1.

[MAN10] M. Manzanares, Y. Bolea, A. Grau (2010), "An Identified LPV Model for Mobile Robots Navigation with Audio Features", 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON2010, pp. 1064-1069, 7-10 Noviembre 2010, Glendale, Arizona, USA. ISBN: 978-1-4244-5226-2. DOI: 10.1109/IECON.2010.5675517.

[MAN11] Manzanares, M; Bolea, Y. & Grau, A. (2011). "Robust Audio Localization for Mobile Robots in Industrial Environments", Chapter 8 in *Advances in Sound Localization*, pp 118-140, Pawel Strumillo (Ed.), ISBN:978-953-307-224-1, Intech Available from: <http://www.intechopen.com/article/show/title/robust-audio-localization-for-mobile-robots-in-industrial-environments>.

[MAN12] M. Manzanares, Y. Bolea, A. Grau (2012), "A Simplified LPV Model for Mobile Robots Navigation with audio Features", Proceedings of the IX International Conference "System Identification and Control Problems" SICPRO'12, pp. 439-452, 30 Enero-2 Febrero, Moscú, Rusia. ISBN: 978-5-91450-098-3.

[MAN14] Manzanares, M,; Bolea, Y. & Grau, A. Complexity Reduction in an Audio Identification Model for Mobile Robots Navigation. Workshop on Complexity in Engineering. COMPENG 2014. Barcelona, June 2014.

[MAS12] D. Mašovi, M. Ögüç . Low Frequency Measurements in Building Acoustics – Analysis of Reverberation Time Field Measurement Results. 20th Telecommunications forum TELFOR 2012, Serbia, Belgrade, November 20-22, 2012.

[MIL32] Millington G. A modified formula for reverberation. Journal of Acoustical Society of America 1932; 4:69–82.

[MIY88] M. Miyoshi and Y. Kaneda, "Inverse filtering of room acoustics," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. 36, pp. 145–152, Feb.1988.

[MOR96] Mori, K.; Kasashima, N.; Yoshioha, T. & Ueno, Y. (1996). Prediction of Spalling on a Ball Bearing by Applying the Discrete Wavelet Transform to Vibration Signals, *Wear*, vol. 195, no. 1-2, pp. 162-168, 1996.

[MOU91] J. Mourjopoulos and M. Paraskevas, "Pole and zero modeling of room transfer functions," *J Sound Vibr.*, vol. 146, pp. 281–302, Apr. 1991.

[MUM03] Mumolo, E.; Nolich, M. & Vercelli, G. (2003). Algorithms for acoustic localization based on microphone array in service robotics, *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 42, pp. 69-88, 2003.

[NAV09] Navarro, D. & Benet, G. (2009). Magnetic Map Building for Mobile Robot Localization Purpose, 14th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Palma de Mallorca, September, 2009.

[NAY92] G.M. Naylor, "Treatment of Early and Late Reflections in a Hybrid Computer Model for Room Acoustics" 124th ASA Meeting, New Orleans (1992) Paper 3aAA2.

[NAY93] G.M. Naylor, "ODEON - Another Hybrid Room Acoustical Model" *Applied Acoustics* 38, 131-143 (1993).

[PRI00] Priyantha, N.B. The Cricket location-support system, *Proc. of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp. 32-43, 2000.

[ROB01] Roberts, S. & Everson, R. (2001). *Independent Component Analysis: Principles and Practice*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 2001.

[ROD09] Rodemann, T.; Joublin, F. & Goerick, C. (2009). Audio Proto Objects for Improved Sound Localization, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, October 11-15, 2009, St. Louis, USA

[SAB64] Sabine WC. *Collected papers on acoustics*. New York: Dover Pub; 1964.

[SAS06] Sasaki, Y.; Kagami S. & Mizoguchi, H. (2006). Multiple sound source mapping for a mobile robot by selfmotion triangulation, *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, 2006.

[SAY05] Sayed, A.H.; Tarighat, A. & Khajehnouri, N. Network-Based Wireless Location: Challenges faced in developing techniques for accurate wireless location information, *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 22, no. 4, July 2005.

[SCH96] Schroeder M., The Schroeder frequency revisited. *Journal Acoustical Society of America*, 99 (5) pp. 3240, 1996.

[SMI90] Smith, R.; Self, M. & Cheeseman, P. (1990). Estimating uncertain spatial relationships in robotics, *Autonomous Robot Vehicles*, vol. 8, pp. 167–193, 1990.

[THR01] Thrun, S. (2001). A probabilistic online mapping algorithm for teams of mobile robots, *Journal of Robotics Research*, vol. 20, no. 5, pp. 335-363, 2001.

[TSA93] Tsatsanis, M.K. & Giannakis, G.B. (1993). Time-varying system identification and model validation using wavelets, *IEEE Trans. Signal Process*, vol. 41, no. 12, pp. 3512-3523.

[VOR89] M. Vorländer, "Simulation of the transient and steadystate sound propagation in rooms using a new combined ray-tracing/image-source algorithm" *J. Acoust. Soc. Am.* 86, 172-178 (1989).

[WID85] B. Widrow and S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1985.

[YAN07] Yang, P.; Sun, H. & Zu, L. (2007). An Acoustic Localization System Using Microphone Array for Mobile Robot, *International Journal of Intelligent Engineering & Systems*, 2007.

[YIH10] Yi, H. & Chu-na, W. (2010). A New Moving Sound Source Localization Method Based on the Time Difference of Arrival, *Proc. of the International Conference on Image Analysis and Signal Processing*, pp. 118-122, 9-11 April, 2010, Zhejiang, China.

[YIN07] Ying, J. & Runze, Y. (2007). Research Status and Prospect of the Acoustic Localization Techniques, *Audio Engineering*, vol. 31, no. 2, pp. 4-8, 2007.

