



# **TESIS DOCTORAL**

**Descriptores Geométricos y de Forma:  
Aplicación a la caracterización  
ultrasónica de materiales.**

**Director: Dr. Ramón Miralles Ricós  
y Dra. Valery Naranjo Ornedo**

**Autor: Soledad Gómez García**



# Resumen

Entre otras aplicaciones, el Grupo de Tratamiento de Señal (GTS) de la Universidad Politécnica de Valencia ha trabajado tradicionalmente en el campo de los ensayos no destructivos por ultrasonidos. El GTS ha desarrollado sofisticados algoritmos de procesado de señal para la detección y caracterización en materiales dispersivos.

El procedimiento de inspección ultrasónica de materiales implica la obtención de un registro o señal mediante un equipo emisor-receptor de ultrasonidos. Este registro será posteriormente procesado para obtener información del material. La extracción de características puede realizarse calculando parámetros temporales y/o frecuenciales de los registros en cuestión. Estos parámetros contienen información que está relacionada con propiedades físicas de los materiales y que podrán ser empleados en definitiva para clasificar y caracterizar el material.

El objetivo de la tesis es el de ampliar el conjunto de parámetros que se han venido usando de manera tradicional en el grupo. Los nuevos parámetros proponen un cambio de perspectiva mediante el uso de técnicas basadas en el tratamiento digital de imagen. Se presenta una colección de descriptores geométricos y de forma que serán aplicados a las imágenes obtenidas a partir de los diagramas tiempo-frecuencia. Los citados parámetros se aplicarán junto con los parámetros que componen el modelo tradicional, o versiones modificadas de éstos, a la caracterización ultrasónica de materiales dispersivos blandos.

En la tesis se presenta un modelo matemático afín a los tipos de materiales que han sido evaluados en este trabajo. Se define así un esquema que modela en el dominio de la frecuencia el registro de señal procedente de la inspección ultrasónica del material. Se proponen y estudian además diferentes métodos con el objetivo de llevar a cabo el análisis espectral de la señal ultrasónica y se discuten diferentes alternativas para la obtención y mejora de los diagramas tiempo-frecuencia.

Se ha realizado un estudio de los estimadores más usados convencionalmente en el grupo para la extracción de características en el dominio frecuencial y se han llevado a cabo modificaciones de éstos desde el punto de vista del tratamiento digital de imagen. Se ha desarrollado un simulador acorde al modelo matemático presentado. El objetivo del simulador es el de realizar una comparativa de los estimadores convencionales y sus correspondientes modificados y el de contrastar la validez de las mejoras propuestas.

Finalmente se realiza un estudio de los descriptores geométricos y de forma propuestos en esta tesis y se valida su utilidad mediante aplicación a la caracterización de diferentes tipos de materiales dispersivos blandos. Se ha demostrado la utilidad del conjunto de parámetros propuestos para la tarea de caracterización de este tipo de materiales.



# Resum

Entre altres aplicacions, el Grupo de Tratamiento de Señal (GTS) de la Universitat Politècnica de València ha treballat tradicionalment en el camp dels assajos no destructius per ultrasons. El GTS ha desenrotllat sofisticats algorismes de processat de senyal per a la detecció i caracterització en materials dispersius.

El procediment d'inspecció ultrasònica de materials implica l'obtenció d'un registre o senyal mitjançant un equip emissor-receptor d'ultrasons. Aquest registre serà posteriorment processat per a obtenir informació del material. L'extracció de característiques pot realitzar-se calculant paràmetres temporals i/o freqüencials dels registres en qüestió. Aquests paràmetres contenen informació que està relacionada amb propietats físiques dels materials i que podran ser usats en definitiva per a classificar i caracteritzar el material.

L'objectiu de la present tesi és el d'ampliar el conjunt de paràmetres que s'han usat de manera tradicional en el grup. Els nous paràmetres proposen un canvi de perspectiva a través de l'ús de tècniques basades en el tractament digital d'imatge. Aquesta tesi presenta una col·lecció de descriptors geomètrics i de forma que seran aplicats a les imatges obtingudes a partir dels diagrames temps-freqüència. Els esmentats paràmetres s'aplicaran junt amb els paràmetres que componen el model tradicional, o versions modificades d'aquests, a la caracterització ultrasònica de materials dispersius blans.

En la tesi es presenta un model matemàtic afí als tipus de materials que han estat avaluats en aquest treball. Es defineix així un esquema que modela en el domini de la freqüència el registre de senyal procedent de la inspecció ultrasònica del material. S'hi proposen i estudien a més diferents mètodes amb l'objectiu de dur a terme l'anàlisi espectral del senyal ultrasònica i es discuteixen diferents alternatives per a l'obtenció i millora dels diagrames temps-freqüència.

S'ha realitzat un estudi dels estimadors més usats convencionalment en el grup per a l'extracció de característiques en el domini freqüencial i s'han dut a terme modificacions d'aquests des del punt de vista del tractament digital d'imatge. S'ha desenrotllat un simulador d'acord amb el model matemàtic presentat. L'objectiu del simulador és el de realitzar una comparativa dels estimadors convencionals i els seus corresponents modificats i el de contrastar la validesa de les millores proposades.

Finalment es realitza un estudi dels descriptors geomètrics i de forma proposats en aquesta tesi i es valida la seua utilitat per mitjà d'aplicació a la caracterització de diferents tipus de materials dispersius blans. S'ha demostrat la utilitat del conjunt de paràmetres proposats per a la tasca de caracterització d'aquest tipus de materials.



# Abstract

Among other applications, the Grupo de Tratamiento de Señal (GTS) of the Universidad Politécnica de Valencia has traditionally researched in the field of non-destructive testing using ultrasounds. The GTS has developed sophisticated algorithms about processing signals for further detection and characterization in scattering materials.

The ultrasonic inspection process implies getting a register or signal using an ultrasound pulser-receiver equipment. This register is further processed in order to get information about the material. The compilation of characteristics can be done by computing temporary parameters and/or of frequency about the obtained registers. These parameters contain information related to physics properties of the materials and that will be finally susceptible of being used to classify and characterize the material.

The aim of this PhD thesis is to expand the set of parameters that this group has been using in a traditional way. The new parameters propose a change of perspective by using techniques based on a digital image processing. The thesis shows a collection of shape and geometric descriptors that will be applied to the images got from the time-frequency diagrams. These parameters will be applied with the parameters that were part of the traditional model, or modified versions of these ones, to the ultrasonic characterization of soft scattering materials.

The PhD thesis presents a common mathematical model for the materials that have been evaluated in this research. The ultrasonic register obtained from the ultrasonic inspection is then modeled in the frequency domain. With the purpose of carrying the spectral analysis of the ultrasonic signal, different methods are considered and studied, besides, different alternatives for the computation and improvement of the time-frequency diagrams are discussed.

A study about the frequently used parameter estimators in the frequency domain has been done. Moreover, we have proposed some modifications of these estimators from the digital image processing point of view. Besides, a suitable simulator for the mathematical model presented has been developed. The objective of the simulator is to perform a comparative between the conventional estimators and their corresponding modified and the checking of the effectiveness of the improvement proposals.

Finally, a study of shape and geometric descriptors proposed in this PhD thesis is realized and its utility to the characterization of different kinds of soft scattering materials is validated. It has been also proved the utility of the new set of proposed parameters so as to characterize these types of materials.





*A mis padres*



# Agradecimientos

A mis padres. Gracias por apoyarme y creer en mi en todo momento. Porque sois unos buenos padres y mejores personas, porque los intereses de vuestros hijos siempre han estado por encima de los vuestros propios, porque gracias a vuestro trabajo y esfuerzo incondicional hoy tengo lo que tengo. Gracias a vuestra forma de ser y pensar hoy sigo luchando, mirando hacia delante, sin volver la cabeza hacia atrás.

A mis directores de tesis, Ramón y Valery. Gracias por hacer posible este trabajo, por estar ahí cuando lo he necesitado, por sus consejos siempre acertados y bajo ningún caso impuestos, por su dedicación y esfuerzo.

A Valery, mi gran amiga. Porque derrochas calidad humana, porque ni te inmutaste el día que improvisé un mercadito artesanal en el intermedio de una de tus clases, porque este proyecto comenzó gracias a ti y pese a todo escalón hoy termina con tu necesaria ayuda, porque no ha sido necesario decirte nada y con sólo mirarme a los ojos sabías exactamente lo que necesitaba, porque hemos vivido situaciones parecidas y a las dos nos ha respondido el destino de la misma manera. Gracias por ayudarme, apoyarme, escucharme y confiar en mi, y en mi trabajo, siempre de manera incondicional. Gracias por dejarme escucharte, es en este sentido bidireccional donde empieza y toma sentido nuestra amistad.

A Mimi, porque conoce y ha vivido de cerca todo lo que conlleva la realización de un proyecto tan largo. Por su apoyo y ayuda durante todo este tiempo. Gracias por quererme tanto.

A Pere, porque es una gran suerte tenerte como amigo. Gracias por estar siempre cerca, gracias por acompañarme en tantos momentos de risas, gracias por acompañarme y sentir de la misma manera que yo aquellos momentos de llanto.

A todos mis colegas de Cartagena y Valencia y por supuesto a todos mis amigos, aquellos que han estado siempre e incondicionalmente cerca y no hablo de distancia. Por todos los buenos momentos vividos, por las risas, por las noches eternas y por supuesto gracias a todos aquellos que se han alegrado cuando yo me he alegrado, los que han entristecido cuando yo he entristecido y los que se han prestado cuando lo he necesitado. Gracias por ser mis amigos y quererme como yo soy, gracias por dejarme quereros como vosotros sois, es también en este sentido bidireccional donde empieza y toma sentido nuestra amistad.

A los chicos y chicas del laboratorio de al lado. Por esos momentos de risas, por todos los momentos. Por estar ahí, siempre al lado, a mi lado.

A todos mis compañeros de grupo. A todos los que se han prestado, por sus consejos y ayuda cuando la he solicitado. A todos los que me han dado la mano y dedicado una sonrisa sin esperar nada a cambio. A todos los demás también gracias, porque gracias a ellos hoy tengo lo que tengo, porque hoy ya no guardo nada dentro, hoy soy mejor persona, hoy soy más fuerte.

# Índice general

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introducción</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Contextualización de la tesis . . . . .   | 1         |
| 1.2. Ensayos no destructivos por ultrasonidos . . . . .  | 1         |
| 1.2.1. Procesado de señal para la caracterización de materiales dispersivos . . . . .                              | 3         |
| 1.2.2. Antecedentes al trabajo propuesto . . . . .   | 7         |
| 1.2.3. Firma ultrasónica . . . . .   | 8         |
| 1.3. Guía de la tesis . . . . .  | 11        |
| 1.3.1. Objetivos y metodología de la tesis . . . . .   | 11        |
| 1.3.2. Estructura de la tesis . . . . .  | 12        |
| <b>2. Modelado en frecuencia de la señal a caracterizar</b>  | <b>15</b> |
| 2.1. Presentación . . . . .  | 15        |
| 2.2. Implementación del modelo de señal . . . . .  | 15        |
| 2.2.1. Presentación . . . . .  | 15        |
| 2.2.2. Modelado de la señal en el dominio de la frecuencia . . . . .   | 16        |
| 2.2.3. Conclusiones . . . . .  | 23        |
| 2.3. Análisis espectral no estacionario de la señal a caracterizar . . . . .                                       | 25        |
| 2.3.1. Presentación . . . . .  | 25        |
| 2.3.2. El espectrograma (SP) . . . . .   | 26        |
| 2.3.3. La distribución Wigner Ville (WVD) . . . . .  | 28        |
| 2.3.4. Estructura de las interferencias del espectrograma vs distribución de Wigner Ville . . . . .                | 29        |
| 2.3.5. La distribución Pseudo Wigner Ville (PWVD) . . . . .  | 31        |
| 2.3.6. Conclusiones . . . . .  | 34        |
| <b>3. Extracción de características de diagramas tiempo-frecuencia</b>   | <b>37</b> |
| 3.1. Presentación . . . . .  | 37        |
| 3.2. Estado de la técnica . . . . .  | 39        |
| 3.3. Método alternativo para la caracterización ultrasónica de materiales  | 40        |
| 3.3.1. Presentación . . . . .  | 40        |
| 3.3.2. Preprocesado del diagrama tiempo-frecuencia: proceso de binarización . . . . .                              | 41        |
| 3.3.3. Extracción de características a partir de la imagen correspondiente al diagrama tiempo-frecuencia . . . . . | 45        |
| 3.4. Conclusiones . . . . .  | 53        |

|  |            |
|--|------------|
| <b>4. Aplicación de descriptores convencionales y modificados a señales simuladas</b>                              | <b>55</b>  |
| 4.1. Presentación . . . . .  | 55         |
| 4.2. Descripción del simulador . . . . .   | 56         |
| 4.3. Simulación de materiales con tamaño de dispersor variable y atenuación del fondo fija . . . . .               | 57         |
| 4.4. Simulación de materiales con tamaño de dispersor fijo y atenuación del fondo variable . . . . .               | 68         |
| 4.5. Error y varianza de estimadores convencionales versus modificados   | 69         |
| 4.6. Conclusiones . . . . .  | 82         |
| <b>5. Aplicación a materiales dispersivos blandos con tamaño de dispersor variable y atenuación del fondo fija</b> | <b>85</b>  |
| 5.1. Presentación . . . . .  | 85         |
| 5.2. Equipamiento de medida, preparación y medición de probetas . .  | 86         |
| 5.2.1. Selección del diámetro medio de dispersor adecuado . . . .  | 87         |
| 5.2.2. Proceso detallado para la preparación de las probetas . . .   | 90         |
| 5.2.3. Equipamiento y proceso de medida . . . . .  | 96         |
| 5.3. Resultados obtenidos . . . . .  | 96         |
| 5.4. Conclusiones . . . . .  | 104        |
| <b>6. Aplicación a materiales dispersivos blandos con tamaño de dispersor fijo y atenuación del fondo variable</b> | <b>107</b> |
| 6.1. Presentación . . . . .  | 107        |
| 6.2. Equipamiento de medida . . . . .  | 108        |
| 6.3. Aplicación a matrices heterogéneas de agar-agar . . . . .   | 108        |
| 6.3.1. Preparación de las probetas . . . . .   | 109        |
| 6.3.2. Resultados obtenidos . . . . .  | 109        |
| 6.4. Aplicación a matrices heterogéneas de gelatina . . . . .  | 114        |
| 6.4.1. Preparación de las probetas . . . . .   | 115        |
| 6.4.2. Resultados obtenidos . . . . .  | 116        |
| 6.5. Conclusiones . . . . .  | 119        |
| <b>7. Conclusiones y líneas futuras</b>  | <b>121</b> |
| 7.1. Presentación . . . . .  | 121        |
| 7.2. Conclusiones . . . . .  | 122        |
| 7.3. Líneas futuras . . . . .  | 126        |
| <b>8. Publicaciones</b>  | <b>127</b> |
| 8.1. Publicaciones más relevantes para el desarrollo de la tesis . . . . .   | 127        |
| 8.1.1. Revistas . . . . .  | 127        |
| 8.1.2. Congresos internacionales . . . . .   | 128        |
| 8.2. Otras publicaciones . . . . .   | 128        |
| 8.2.1. Revistas . . . . .  | 128        |
| 8.2.2. Congresos . . . . .   | 128        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>A. Reducción de artefactos en diagramas tiempo-frecuencia usando morfología matemática</b>   | <b>131</b> |
| A.1. Presentación   | 131        |
| A.2. Estado de la técnica   | 132        |
| A.3. Operadores morfológicos  | 133        |
| A.3.1. Operadores morfológicos básicos  | 133        |
| A.3.2. La reconstrucción morfológica por dilatación geodésica   | 135        |
| A.3.3. La reconstrucción morfológica por $\lambda$ -dilatación geodésica  | 136        |
| A.4. Aplicación de operadores morfológicos a la reducción de artefactos en diagramas tiempo-frecuencia  | 140        |
| A.4.1. Aplicación de la reconstrucción por dilatación geodésica para eliminación de componentes interferentes de la transformada Wigner Ville           | 140        |
| A.4.2. Aplicación de la reconstrucción por $\lambda$ -dilatación para la eliminación de componentes interferentes de diferentes tipos de transformadas. | 144        |
| A.5. Conclusiones   | 153        |
| <b>Bibliografía</b>   | <b>167</b> |





# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Contextualización de la tesis

La presente tesis se engloba dentro de una de las líneas de investigación que se desarrolla en el Grupo de Tratamiento de Señal (GTS) de la Universidad Politécnica de Valencia; concretamente en el área de ensayos no destructivos por ultrasonidos, y su aplicación a la evaluación y caracterización de materiales dispersivos.

El Grupo de Tratamiento de Señal ha trabajado en diversas aplicaciones donde se han incorporado avanzadas técnicas de procesado de señal para el análisis de registros ultrasónicos. De todas estas aplicaciones podemos destacar: estimación de porosidad en derivados del cemento [1], clasificación de grandes piezas de mármol [2], restauración de edificios del patrimonio histórico [3], la caracterización de piezas arqueológicas [4], o la detección de cuerpos extraños en salsas alimenticias [5].

En la presente tesis, se pretende dar un paso más allá en las tradicionales técnicas de procesado de señal con las que se ha estado trabajando en el GTS de cara a la caracterización de materiales dispersivos. La presente tesis introduce nuevas herramientas con el objetivo de ampliar y/o complementar los algoritmos con los se viene trabajando hasta la actualidad en el campo de la caracterización ultrasónica de este tipo de materiales.

### 1.2. Ensayos no destructivos por ultrasonidos

Los ensayos no destructivos por ultrasonidos, del inglés *Non Destructive Ultrasonic Testing* (NDUT), constituyen un procedimiento de inspección que permite extraer propiedades de cierto material evaluado que estarán relacionadas con variaciones en la impedancia acústica y en definitiva con cambios en la estructura

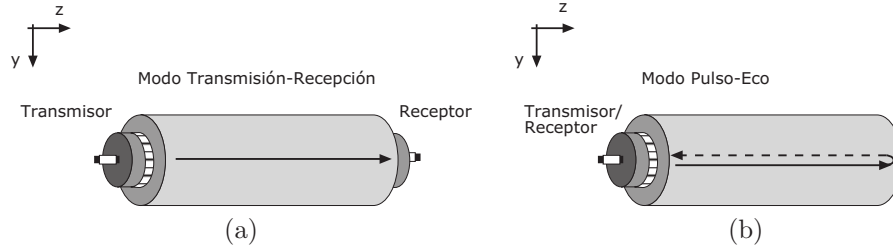


Figura 1.1: Esquema de medida ultrasónico. (a) Transmisión-Recepción; (b) Pulso-Eco.

interna del material.

Los ultrasonidos son ondas acústicas cuyo rango de frecuencias se encuentra por encima de la zona perceptible por el oído humano, abarcando un rango frecuencial que va desde los  $20\text{ KHz}$  hasta órdenes de  $\text{GHz}$ . La historia de la inspección por ultrasonidos como disciplina científica pertenece al siglo XX. En 1924, el Dr. Sokolov desarrolló las primeras técnicas de inspección empleando ondas ultrasónicas. Los experimentos iniciales se basaron en la medición de la pérdida de la intensidad de la energía acústica al propagarse a lo largo de un material. En la actualidad, los ultrasonidos cuenta con numerosas aplicaciones que abarcan desde aplicaciones industriales (medición de distancias, caracterización interna de materiales mediante ensayos no destructivos, y otros), hasta aplicaciones en el campo de la medicina (ecografías, fisioterapia, ultrasonoterapia).

Si nos centramos en el campo de los ensayos no destructivos por ultrasonidos para la caracterización de materiales, una inspección ultrasónica consiste en interrogar a un material cuyas características queremos conocer. De esta manera, se le inyecta un pulso ultrasónico, usando el transductor adecuado, y se estudia la respuesta ultrasónica, bien en el mismo transductor (modo pulso-eco) o bien en otro(s) transductor(es) (modo transmisión-recepción). En la figura 1.1 podemos ver un esquema de medida para cada uno de los modos citados anteriormente. Para el primer caso, figura 1.1.a, se puede observar como el transductor (emisor) emite un pulso ultrasónico y la respuesta ultrasónica es recibida por otro transductor (receptor); en el segundo caso, figura 1.1.b, se puede observar cómo el transductor que emite y recibe el pulso ultrasónico es el mismo.

A partir de la señal recibida, fruto de la inspección ultrasónica, será posible obtener cierto tipo de parámetros que de alguna manera estén correlados con alguna de las propiedades físicas del material bajo estudio, podemos citar a modo de ejemplo la porosidad de éste o la presencia de grietas, capas, sustratos o defectos cuya impedancia acústica será diferente a la del material.

La figura 1.2 muestra un diagrama de un sistema de inspección por ultrasonidos en modo pulso-eco. El diagrama representa el esquema básico del sistema de inspección ultrasónica. En él se representa además el aspecto que tendrá la señal recibida (gráfica azul) cuando se inspecciona un material que posee una pequeña grieta, en la citada gráfica se observa con mayor nivel, y para valores de  $t$  cercanos

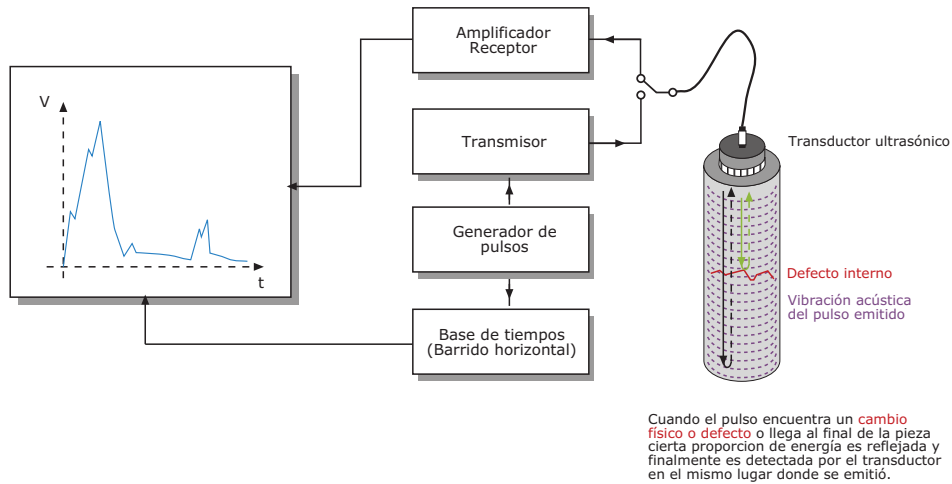


Figura 1.2: Esquema de medida ultrasónica en modo pulso-eco. Ejemplo de inspección de un material con una grieta interna.

a 0, el pulso emitido y varios instantes más tarde se puede observar el eco (señal reflejada) debido a la grieta interna del material. Este tipo de representación de la señal registrada recibe el nombre de A-scan. Un A-scan es un método de representación para registros ultrasónicos el cual representa la tensión captada por el transductor en función del tiempo de llegada. Todos los resultados presentados en esta tesis se han realizado con esquemas de medición en modo pulso-eco. Por esta razón el A-scan siempre tendrá un pulso inicial de mayor amplitud (en valores de tiempo cercanos al origen) y a partir de cierta muestra diferente información en función de la estructura interna del material inspeccionado.

Se definirá a continuación un modelo de señal para la caracterización, bajo un marco común, de todos los tipos de problemas susceptibles de ser tratados.

### 1.2.1. Procesado de señal para la caracterización de materiales dispersivos

En este apartado se procede a describir, a grandes rasgos, el modelo de señal usado para modelar, bajo un marco común, los diferentes tipos de materiales dispersivos que se pretende caracterizar.

Podemos aproximar un material dispersivo como un material homogéneo en el que se encuentran inmersos una serie de elementos aleatoriamente distribuidos y que reciben el nombre de dispersores, los cuales presentan una impedancia acústica diferente a la de la matriz homogénea. Dichos elementos se comportan como dispersores de sección cruzada, variable en función de su tamaño, forma y posición [6, 7, 8, 9].

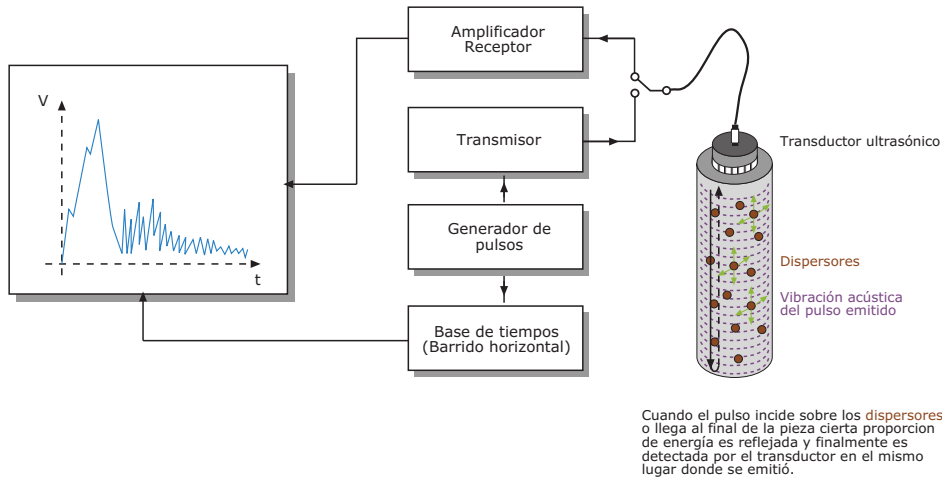


Figura 1.3: Esquema de medida ultrasónica en modo pulso-eco. Ejemplo de inspección de un material con pequeños dispersores internos.

Cuando se lleva a cabo una inspección ultrasónica de un material dispersivo en modo pulso-eco, ver a modo de ejemplo la figura 1.3, el pulso ultrasónico emitido por el transductor viaja longitudinalmente por el material excitando a los dispersores que se encuentran a su paso. Los dispersores, que presentan una impedancia acústica diferente a la del medio, reflejarán parte de la energía incidente. Las contribuciones de cada dispersor, los ecos, serán captados en el transductor en un instante de tiempo posterior (que dependerá de la velocidad de propagación del pulso a lo largo del material y de la posición y forma del dispersor) y su nivel de energía será inferior al nivel de energía del pulso inicial ya que la señal se atenúa conforme se propaga por el medio y además la señal reflejada por un dispersor sólo contiene una proporción de la energía que en él incide. Lo anteriormente comentado queda representado mediante la gráfica azul (A-scan) de la figura 1.3, ésta muestra el aspecto de la señal recibida fruto de la inspección ultrasónica de un material dispersivo, en ésta se observan numerosos picos de menor nivel de energía, en comparación con el pulso inicial (localizado en valores de  $t$  cercanos a 0), y que son debidos a las contribuciones de los diferentes elementos dispersivos que forman la estructura del material evaluado.

Todos los materiales a los que hace alusión la presente tesis son considerados materiales de tipo dispersivo, de ahora en adelante aunque en ciertos momentos no se especifique de manera explícita esta condición, cuando se cite la palabra material se entenderá que nos referimos a materiales dispersivos.

Cuando se lleva a cabo una inspección ultrasónica sobre un material de tipo dispersivo, la señal registrada se podría modelar como el resultado de convolucionar la reflectividad del material con un sistema lineal y variante en el tiempo (LTV) [10, 6] (ver figura 1.4). La respuesta al impulso del sistema LTV es el propio

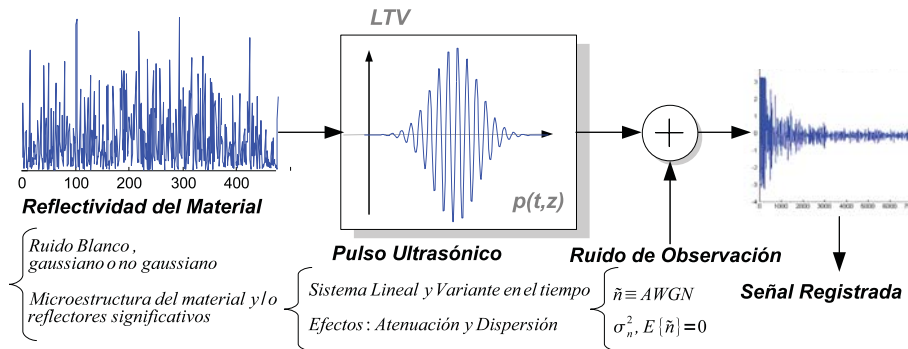


Figura 1.4: Modelo lineal variante en el tiempo (LTV).

pulso ultrasónico que se propaga a lo largo del material y que sufrirá el efecto conjunto de atenuación y dispersión tal cual se aprecia en la figura 1.5. Dichos efectos, afectarán tanto a su amplitud como a su contenido frecuencial [6, 11, 12]. La señal registrada será pues una señal no estacionaria cuyo contenido frecuencial variará con el tiempo. Será en el próximo capítulo donde se aborde el tema de cómo realizar el análisis espectral de ésta, ya que para la caracterización completa del registro ultrasónico no sólo es importante conocer su contenido frecuencial sino que también es importante saber en qué instante de tiempo se localiza cada frecuencia.

Para estudiar este tipo de materiales se emplea un modelo estocástico como el que se ve en la figura 1.4. La señal de entrada al sistema, la reflectividad del material, se modela como un ruido blanco gaussiano o no gaussiano (en nuestro caso, como veremos más adelante, se ha modelado como un ruido blanco tipo K). El modelo para la señal registrada debe tener en cuenta la contribución de tres componentes principales:

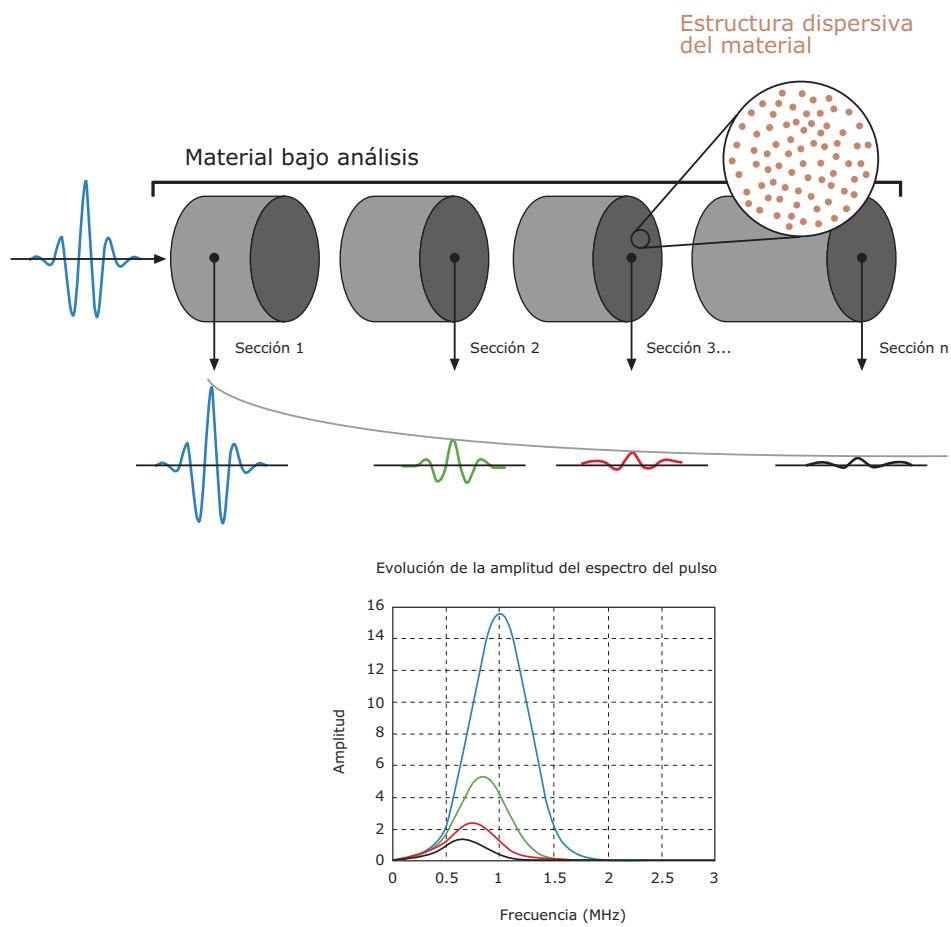


Figura 1.5: *Diferentes secciones de un mismo material. Efecto conjunto de atenuación y dispersión al viajar el pulso a lo largo de un material.*

- **Componente de ruido de grano:** esta componente es debida al efecto de dispersión de la microestructura del material. Como consecuencia de este efecto dispersivo, la superposición de diferentes ecos pequeños genera un ruido adaptado al pulso enviado el cual es posible modelar como un ruido no estacionario y coloreado, que puede ser gaussiano o no [8]. La importancia de esta componente dependerá de la relación entre la frecuencia de operación del pulso ultrasónico y el diámetro medio del grano: cuanto mayor sea la frecuencia de operación mayor ruido de grano obtendremos.
- **Componente debida a la presencia de reflectores internos:** esta componente es debida a la presencia de ecos generados como consecuencia de la existencia de reflectores significativos. La forma de onda de dichos ecos dependerá del pulso incidente en el material, de la trayectoria entre emisor y receptor y de la propia respuesta del reflector.
- **Ruido de observación:** el ruido de observación se puede caracterizar como blanco y gaussiano.

El modelo lineal y variante en el tiempo descrito en este apartado se generaliza como válido para todos los problemas susceptibles de ser tratados. En la presente tesis, solamente las componentes de ruido de grano y ruido de observación serán tenidas en cuenta ya que el objetivo es estudiar la microestructura interna de un material dispersivo en el que no existirán reflectores significativos tales como grietas o sustratos.

### 1.2.2. Antecedentes al trabajo propuesto

Los diferentes problemas en los que ha estado trabajando el Grupo de Tratamiento de Señal, en la línea de ensayos no destructivos para la caracterización de materiales dispersivos, pueden ser divididos en dos categorías:

1. **Caracterización de materiales.** A modo de ejemplo podemos citar las aplicaciones siguientes:
  - Cálculo de la porosidad de materiales derivados del cemento, por ejemplo pasta de cemento, mortero, hormigón. El estudio de la porosidad es de gran interés para predecir la durabilidad de ciertos materiales de construcción tanto en el proceso de fabricación como en el mantenimiento de éstos [1, 13, 14].
  - Clasificación de grandes bloques de mármol, mediante el estudio de su calidad global. Ésta será una información fundamental para prevenir problemas a la hora de cortar el bloque de mármol, y será de gran interés para establecer la calidad del mármol de una determinada cantera [10].
  - Determinación de la calidad de consolidación así como otras propiedades de piezas arqueológicas (cerámicas, madera sumergida). Las citadas propiedades serán muy relevantes para una adecuada conservación y restauración [3].

2. **Detección de defectos o estructura/capas internas.** Podemos citar, entre otras, las siguientes aplicaciones:

- Detección de grietas en baldosas cerámicas. Es un análisis crítico para evitar la pérdida de material, y para poder reciclarlo [3, 15].
- Detección de grietas en grandes bloques de mármol. Es de gran utilidad para optimizar la restauración de este tipo de bloques, permitiendo localizar, si fuera necesario, la posición exacta de las grietas [2].
- Trazado de las capas internas en muros o bóvedas de monumentos que pertenecen al patrimonio histórico. Esta información será de interés relevante, antes y después del proceso de restauración [16, 17].
- Detección de cuerpos extraños en salsas y/o alimentos. Si bien es un problema con una baja frecuencia de aparición su impacto en el consumidor es elevado [18, 5].

Para la primera categoría de problemas es necesaria la existencia de niveles significativos de ruido de grano, ya que éste será la fuente de información para la extracción de características del material tras la inspección ultrasónica. El ruido de grano dependerá de la reflectividad (la entrada del sistema LTV) del material y de la manera en que el material afecte a la propagación del pulso (la respuesta del sistema LTV).

Para la segunda categoría es necesario minimizar tanto como nos sea posible la cantidad de ruido de grano, ya que éste enmascarará los ecos de los focos de reflexión que se pretendan detectar. Una forma sencilla para la reducción de ruido de grano, sin emplear técnicas de procesamiento de señal, es la de reducir la frecuencia de trabajo, incrementándose la longitud de onda. Este efecto introducirá un límite para la mínima dimensión del reflector que el sistema será capaz de detectar. De esta manera, en las aplicaciones en las que no sea posible evitar la presencia de ruido de grano el proceso de detección será complejo, debido a que generalmente tanto la señal a detectar como el ruido de grano compartirán gran parte de su banda de frecuencias.

Ambas categorías de problemas, susceptibles de ser tratados, pueden ser unificadas en cuanto al modelo de señal, tal y como se viene justificando anteriormente. De igual manera se puede unificar las dos categorías de problemas usando el concepto de firma ultrasónica, tal y como se pone de manifiesto en el siguiente punto.

### 1.2.3. Firma ultrasónica

Como ya se mencionó en el apartado 1.2.1, las propiedades del material afectan a la reflectividad y a las variaciones de la respuesta impulsional del LTV.

La reflectividad del material se puede obtener a través de un proceso de deconvolución. Sin embargo, la deconvolución se convierte en un problema mal condicionado cuando las señales son paso-banda, y por otra parte los estadísticos de la reflectividad sólo son útiles en el caso de existir no gaussianidad. Otra posibilidad



|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| Velocidad de propagación             | $v_p = \frac{\text{grosor-pieza}}{\text{tiempo-vuelo}}$  |
| Frecuencia principal o central       | $\omega_{max} /  S(\omega_{max}, z)  \geq  S(\omega, z)  \forall \omega$   |
| Amplitud de señal a $\omega_{max}$   | $ S(\omega_{max}, z) $   |
| Valor inicial de curva de atenuación | $\hat{p}(t, z) = A \cdot e^{-t\alpha z}; S_o = 10 \cdot \log(A)$   |
| Reversibilidad temporal              | $\frac{1}{\sigma_3} \langle (\frac{dp(t, z)}{dt})^3 \rangle$   |
| Frecuencia centroide                 | $\omega_c(z) = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega \cdot  S(\omega, z)  d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2}  S(\omega, z)  d\omega}$ |
| Ancho de banda fraccional (%)        | $BW_{\%}(z) = \frac{BW_{-3dB}(z)}{2 \cdot \pi \cdot \omega_c(z)} \cdot 100 \%$   |
| Autocovarianza de tercer orden       | $\langle p(t, z) \cdot p(t-1, z) \cdot p(t-2, z) \rangle$  |

Tabla 1.1: Ejemplo de algunos de los parámetros que pueden componer la firma ultrasónica.

consiste en obtener los estadísticos de la reflectividad a través de la relación directa entre los estadísticos de la señal registrada (salida del LTV) y los estadísticos de la señal de entrada al LTV [10, 19], pero los estadísticos de la reflectividad sólo son útiles en el caso de existir no gaussianidad.

El estudio de la variación temporal de las características de nuestro modelo implica la realización de un análisis no estacionario de la señal recibida, tal cual se desarrollará en el capítulo 2. En la figura 1.6 se muestra un esquema general válido para los dos tipos de problemas descritos en el punto anterior. En primer lugar se realiza un análisis frecuencial a corto plazo de la señal para poder analizar de manera independiente la evolución de las diferentes componentes frecuenciales. Este tipo de análisis se puede implementar mediante un banco de filtros, o bien mediante algún tipo de transformación, lineal o no lineal, de tiempo-frecuencia, que será la alternativa a seguir en el presente proyecto.

Acorde con el esquema de la figura 1.6, a partir del análisis tiempo-frecuencia de la señal, o bien a partir del registro de señal puro o un fragmento de éste, es posible obtener la firma ultrasónica ( $US$ ). La firma ultrasónica se puede definir como el conjunto de parámetros que definen ciertas características de un material o la evolución temporal de éstas (conforme el registro ultrasónico se propaga a lo largo del material) a partir de los cuales es posible identificar de manera unívoca el material.

En los diferentes trabajos que se han realizado en el GTS hasta la actualidad, la firma ultrasónica se obtiene calculando alguno de los parámetros que se citan en la tabla 1.1, donde  $p(t, z)$  se supone la señal bajo estudio para un instante concreto de tiempo y a una profundidad  $z$  y  $S(\omega, z)$  la transformada de Fourier de  $p(t, z)$  a la pulsación  $\omega$  y una profundidad  $z$ . Por ahora no se aporta la formulación detallada de los citados parámetros, será en el capítulo 3 donde se aborde la formulación de los parámetros más relevantes para el desarrollo de esta tesis.

Tal y como se observa en la figura 1.6, una vez obtenida la firma ultrasónica es posible proceder de diferentes formas dependiendo del objetivo que se persiga:

- Es posible utilizar dicha firma ultrasónica como vector de entrada de un

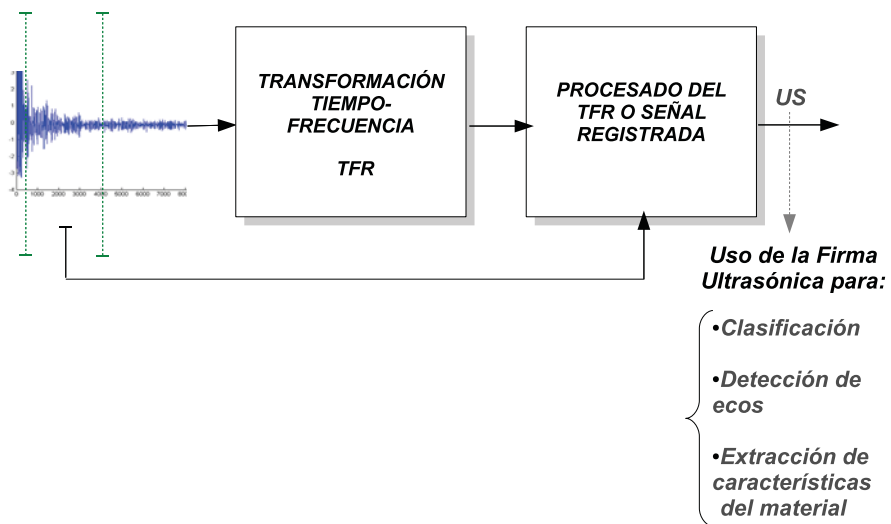


Figura 1.6: Esquema general para la extracción de la firma ultrasónica.

clasificador automático, cuyo objetivo sea clasificar el material en un determinado número de clases [1, 20].

- Otra alternativa sería seguir las variaciones de la firma ultrasónica con el tiempo para así poder detectar la influencia de posibles reflectores internos del material [21].
- También se puede llevar a cabo un estudio más detallado de alguno de los parámetros característicos de la firma ultrasónica. Por ejemplo, se puede calcular la variación instantánea de la frecuencia centroide a partir del estudio de un intervalo de señal, en el cual pasamos de tener como ruido predominante el ruido de grano a tener únicamente ruido de observación. Dicha transición dependerá de la penetrabilidad de la energía ultrasónica en el material y estará relacionada con algunas de las propiedades del material [1, 14].

## 1.3. Guía de la tesis

### 1.3.1. Objetivos y metodología de la tesis

El objetivo de la presente tesis es precisamente ampliar el conjunto de parámetros que componen la firma ultrasónica, pero cambiando la perspectiva de los parámetros tradicionales que se han venido usando en el GTS. Se presentará una colección de parámetros geométricos y descriptores de forma que se aplicarán a las imágenes obtenidas a partir de los diagramas tiempo-frecuencia (TFR). Tales parámetros nos permitirán junto con los parámetros del modelo tradicional, o versiones modificadas de éstos, la caracterización de diferentes tipos de materiales.

Para tal fin, en la presente tesis se ha realizado un modelado matemático del tipo de problema a tratar, en la figura 1.4 de este capítulo se han presentado, a grandes rasgos, las características del modelo con el que vamos a trabajar.

Una vez haya sido descrito el modelo y las ecuaciones que sustentan este modelo teórico y genérico del tipo de materiales que se pretende caracterizar, se establecerá y describirá paso a paso el procedimiento a seguir para llevar a cabo la tarea de caracterización. Este proceso de caracterización abarcará desde la extracción de la señal a medir, la cual contendrá la información útil para clasificar el material bajo test; el procesamiento tiempo-frecuencia de esta señal extraída, y su tratamiento como imagen, para la extracción de parámetros característicos que nos definan/amplien una firma ultrasónica para poder caracterizar el material bajo test.

La utilidad de implementar un modelo teórico controlado queda justificada por la capacidad que nos aporta para generar modelos de material a priori conocidos, para contrastar la utilidad del uso de descriptores geométricos y de forma para la caracterización de materiales afines a dicho modelo.

El proceso completo para la validación de los nuevos parámetros presentados

en esta tesis, como herramienta de trabajo útil en el campo de la caracterización ultrasónica, se realizará como sigue:

- Implementación de un modelo teórico de señal: afín y generalizable al tipo de materiales dispersivos que se pretenden caracterizar a lo largo de la tesis.
- Análisis espectral no estacionario de la señal a caracterizar.
- Preprocesado del diagrama tiempo-frecuencia obtenido para adaptar éste a las características concretas del problema.
- Estudio de los estimadores más usados de manera convencional para la caracterización de registros ultrasónicos y planteamiento de posibles mejoras desde el punto de vista del tratamiento digital de imagen.
- Comparativa de los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados en base a señales simuladas.
- Estudio de descriptores geométricos y de forma para la extracción de ciertos parámetros característicos, que nos permitan complementar el conjunto de parámetros que constituyen la firma ultrasónica hasta hoy utilizada (ver tabla 1.1).
- Aplicación de los resultados presentados a la caracterización de diferentes tipos de materiales.

### 1.3.2. Estructura de la tesis

La tesis se ha estructurado en siete capítulos, en cuyo cómputo se incluye este primero. A continuación se presenta un pequeño resumen acerca del contenido de cada uno de éstos:

- **Capítulo 1: Introducción**

En este capítulo se ha realizado una presentación de la tesis doctoral que se desarrolla en el resto de apartados. En este capítulo se ha contextualizado la tesis, y se han presentados los antecedentes al trabajo propuesto, centrándonos en el área de los ensayos no destructivos por ultrasonidos y más concretamente en la caracterización de materiales dispersivos. Para todos los problemas susceptibles de ser tratados, caracterización de materiales dispersivos o detección de grietas y/o defectos internos en este tipo de materiales, se ha presentado además un esquema común de trabajo basado en un modelo lineal y variante en el tiempo así como en el concepto de la firma ultrasónica.

- **Capítulo 2: Modelado en frecuencia y análisis espectral de la señal a caracterizar**

En este capítulo se detallan y desarrollan las ecuaciones que modelan el sistema lineal y variante en el tiempo que ha sido presentado en el capítulo

1, y que constituirá un modelo teórico afín y generalizable a todos los tipos de materiales que se pretenden estudiar en esta tesis. Para tal fin se presentan las ecuaciones que modelan el pulso ultrasónico en el dominio frecuencial. Dada la no estacionariedad del pulso ultrasónico, en este capítulo se presentan también diferentes alternativas para realizar un análisis espectral de éste.

■ **Capítulo 3: Extracción de características de diagramas tiempo-frecuencia**

Se presenta un método alternativo para la extracción de parámetros con el objetivo de ampliar o complementar la tradicional firma ultrasónica. En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica acerca del actual estado de la técnica en el uso de descriptores geométricos y de forma en diferentes aplicaciones. Seguidamente se detalla el proceso completo para obtener a partir del registro ultrasónico la imagen correspondiente al diagrama tiempo-frecuencia, dicha imagen será el punto de partida para la aplicación de un conjunto de estimadores propuestos. Del conjunto de parámetros que componen la tradicional firma ultrasónica se formulan y describen aquellos más usados y que por sus características son susceptibles de ser mejorados mediante el tratamiento de la imagen correspondiente al diagrama tiempo-frecuencia. Finalmente, se presenta una colección de parámetros geométricos útiles para la caracterización de diagramas tiempo-frecuencia.

■ **Capítulo 4: Aplicación de descriptores convencionales y modificados a señales simuladas**

En este capítulo se presenta el simulador que ha sido programado con la intención de probar un conjunto de estimadores convencionales, derivados de la frecuencia, y comparar su funcionalidad con la de los mismos estimadores pero en versiones modificadas. Estos estimadores habrán sido previamente presentados en el capítulo 3. Variando los parámetros del modelo simulado, se estudiará la aplicación de los citados estimadores a un conjunto de señales que emularán dos tipos de materiales diferentes: el primer tipo serán materiales dispersivos blandos con estructura de dispersores cambiantes y fondo homogéneo; por otro lado el segundo tipo de materiales simulados corresponderá a materiales dispersivos blandos con similar estructura dispersiva y fondo heterogéneo.

■ **Capítulo 5: Aplicación a materiales dispersivos blandos con tamaño de dispersor variable y atenuación del fondo fija**

Se aplicará el conjunto de estimadores propuestos en el capítulo 3 a un conjunto de piezas fabricadas en un entorno de laboratorio y que cumplirán con las características del primer tipo de materiales que fueron simulados en el capítulo 4. Se describirá el proceso completo para la creación de las citadas piezas de test, así como el equipamiento utilizado y el proceso de medida. Seguidamente, la discusión del capítulo se centrará en la aplicación del conjunto de descriptores para la caracterización de materiales dispersivos blandos y la clasificación o distinción de éstos en función del tamaño medio de dispersores que componen su microestructura.

- **Capítulo 6: Aplicación a materiales dispersivos blandos con tamaño de dispersor fijo y atenuación del fondo variable**

Se aplicará, al igual que en el capítulo 5, el conjunto de estimadores propuestos a un conjunto de piezas fabricadas en el laboratorio. Se describirá igualmente el proceso para la creación de las citadas piezas, el equipamiento y proceso de medida. En este capítulo la discusión de resultados se centra en la aplicación del método propuesto en esta tesis a la caracterización de señales reales procedentes de los materiales generados en el entorno de laboratorio cuyas características son acordes al segundo tipo de materiales simulados en el capítulo 4.

- **Capítulo 7: Conclusiones y líneas futuras**

En este capítulo se realiza un resumen a modo de conclusión de los aspectos más relevantes de la tesis. Además se plantean nuevas líneas de trabajo y se abre una nueva puerta a futuras investigaciones que deriven de ésta.

- **Capítulo 8: Publicaciones**

Finalmente, se muestran las publicaciones en revistas y contribuciones en congresos más importante para el desarrollo de la presente tesis además de aquellas que se han realizado durante todo el periodo de investigación que ha llevado a la consecución de este trabajo.

## Capítulo 2

# Modelado en frecuencia de la señal a caracterizar

### 2.1. Presentación

En este capítulo se presenta un modelado matemático del esquema de trabajo que fue descrito en el capítulo anterior. En el capítulo 1 se describieron las principales características del modelo en que se basa la presente tesis. Dando un paso más allá a la presentación del citado modelo, en este capítulo se describirán las ecuaciones que sustentan éste.

En la primera sección se presentan las ecuaciones que modelan en frecuencia un pulso ultrasónico cuando éste se propaga en el interior de un material dispersivo blando. Dada la no estacionariedad del citado pulso, en la segunda sección de este capítulo se describirán las diferentes alternativas para analizar y describir espectralmente el tipo de señales que se pretenden caracterizar.

### 2.2. Implementación del modelo de señal

#### 2.2.1. Presentación

En la presente tesis se trabaja con materiales dispersivos acordes con un modelo cuyo esquema básico fue descrito en el capítulo 1 y se sintetiza en la figura 2.1. El objetivo es modelar el ruido de grano producido cuando un material, con una estructura dispersiva, es excitado con un pulso ultrasónico y múltiples ecos, procedentes de la microestructura del material, son recogidos por el mismo transductor que emitió el pulso. Recordad que la estructura del material es considerada como un fondo uniforme en el que se encuentran inmersos los dispersores, los cuales presentan una impedancia acústica diferente a la del material, comportándose como

dispersores de sección cruzada variable según tamaño, forma y posición [8, 9].

Acorde con el esquema de la figura 2.1, el registro de señal de salida  $y(t)$ , se puede modelar en el tiempo como el resultado de convolucionar la respuesta al impulso del sistema lineal variante (LTV) con la reflectividad del material a la que se le añade un ruido de observación, tal cual se pone de manifiesto en la ecuación (2.1).

$$y(t) = p(t, z) * r(t) + n(t) \quad (2.1)$$

La respuesta al impulso del sistema LTV ( $p(t, z)$ ) es el propio pulso ultrasónico que se propaga en el interior de un material dispersivo ( $z$  representa la profundidad de penetración en el material) y que sufrirá el efecto conjunto de atenuación y dispersión [6]. Dichos efectos, afectarán tanto a su amplitud como a su contenido frecuencial, tal cual se describió en el capítulo anterior (ver figura 1.5).

De esta manera, la señal registrada, el ruido granular  $y(t)$ , se tratará como un proceso aleatorio cuyos parámetros están relacionados con las características del material y no puede suponerse estacionaria puesto que el pulso ultrasónico varía sus características conforme penetra en éste. En cuanto a la reflectividad ( $r(t)$ ) se mantendrá como un proceso estacionario e independiente de la profundidad del material. En cuanto al ruido de observación ( $n(t)$ ), éste es un ruido aditivo, blanco y gaussiano.

En esta tesis nos centraremos en trabajar a partir de la información proporcionada por la señal registrada ( $y(t)$ ) ya que estamos interesados en la caracterización de materiales con estructura dispersiva. No obstante, en otras aplicaciones, el estudio de la reflectividad de manera aislada podría resultar de gran utilidad para abordar la segunda categoría de problemas que se presentaron en el capítulo 1, y que se centra en la detección de defectos o estructura/capas internas en un material. Si bien en este caso la estacionariedad de la reflectividad no podría ser asumida.

### 2.2.2. Modelado de la señal en el dominio de la frecuencia

En general, para modelar la señal ultrasónica ( $y(t)$ ) que proviene de la estructura de un material dispersivo ( $p(t, z)$ ) se utilizan procesos estocásticos que pueden ser estacionarios o no estacionarios. La diferencia entre ambos radica en la caracterización del coeficiente de atenuación ( $\alpha(\omega)$ ). Si el coeficiente de atenuación no varía con la frecuencia,  $\alpha(\omega) = \alpha_0$ , el modelo de la figura 2.1 da lugar a procesos estocásticos estacionarios.

En la presente tesis se ha utilizado un modelo estocástico no estacionario en el que la atenuación del pulso depende de la frecuencia con la que estemos trabajando. Este comportamiento es más fácil de demostrar si analizamos el problema en el dominio de la frecuencia.



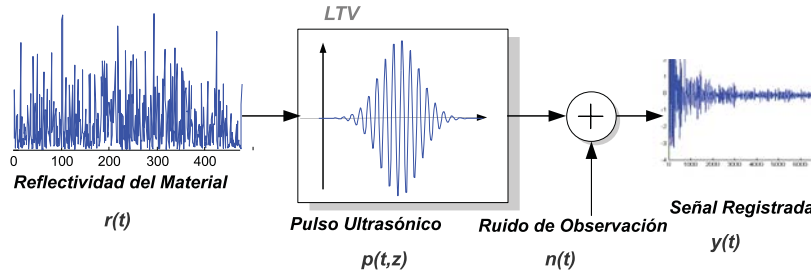


Figura 2.1: Modelo de trabajo en el dominio temporal.

Las ecuaciones que se describen a continuación se puede generalizar como válidas para materiales dispersivos de tipo blando, podemos citar a modo de ejemplo: emulsiones, salsas alimenticias, etc. No podemos pues asegurar la validez de éstas para otro tipo de materiales no blandos, por ejemplo: cerámicas, hormigón o cementos.

Para un material dispersivo blando, la atenuación por absorción de un pulso ultrasónico al propagarse por su interior se puede modelar por una ley de la forma [22]:

$$\alpha_a(\omega) = \alpha_0 \cdot \omega^Y \quad (2.2)$$

donde  $\alpha_0$  e  $Y$  dependen del material. Para el tipo de materiales con los que se ha trabajado en esta tesis, el parámetro  $Y$  suele variar en el siguiente intervalo  $1 \leq Y \leq 2$  [22].

Por otro lado, el espectro del pulso ultrasónico puede ser modelado, para una envolvente gaussiana [22, 23], de la siguiente manera:

$$S(\omega) = A \cdot e^{-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{B^2}} \quad (2.3)$$

Siendo,  $S(\omega)$  la transformada de Fourier del pulso ultrasónico  $p(t)$ ,  $\omega_0$  la pulsación central del pulso ultrasónico,  $B$  un parámetro del que depende el ancho de

banda del pulso ultrasónico y  $A$  un parámetro que está relacionado con la energía del mismo.

Al propagarse el pulso ultrasónico por el interior de un material con pérdidas, una distancia de  $z$  metros, tenemos que el pulso obtenido se puede modelar como:

$$S_r(\omega, z) = A \cdot e^{-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{B^2}} \cdot e^{-\alpha_0 \cdot \omega^Y \cdot z} \quad (2.4)$$

donde se ha supuesto linealidad en el comportamiento del medio de propagación.

Se puede llegar a una serie de relaciones útiles si analizamos el modelo para el mínimo y máximo valor de  $Y$ .

Y=1

$$\begin{aligned} S_r(\omega, z) &= A \cdot e^{-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{B^2}} \cdot e^{-\alpha_0 \cdot \omega \cdot z} = A \cdot e^{-\frac{(\omega^2 - 2\omega\omega_0 + \omega_0^2 + \alpha_0 \omega z B^2)}{B^2}} = \\ &= A \cdot e^{-\frac{-(\omega^2 - 2\omega(\omega_0 - \frac{\alpha_0 z B^2}{2}) + \omega_0^2 - \frac{2\omega_0 \alpha_0 z B^2}{2} + (\frac{\alpha_0 z B^2}{2})^2 + 2\omega_0 \alpha_0 z B^2 - (\frac{\alpha_0 z B^2}{2})^2)}{B^2}} = \\ &= A \cdot e^{-\frac{-(\omega - (\omega_0 - \frac{\alpha_0 z B^2}{2}))^2}{B^2}} \cdot e^{-\frac{-(\frac{2\omega_0 \alpha_0 z B^2}{2} - (\frac{\alpha_0 z B^2}{2})^2)}{B^2}} \end{aligned}$$

Ordenando y agrupando ciertos términos tenemos que:

$$S_r(\omega, z) = A' \cdot e^{-\frac{(\omega-\omega'_0)^2}{B^2}} \quad (2.5)$$

$$\text{Donde, } \begin{cases} A' = A \cdot e^{-\frac{-(\omega_0 \alpha_0 z B^2 - (\frac{\alpha_0 z B^2}{2})^2)}{B^2}} & \Rightarrow A'(z); \\ \omega'_0 = \omega_0 - \frac{\alpha_0 z B^2}{2} & \Rightarrow \omega'_0(z). \end{cases}$$

Y=2

$$\begin{aligned} S_r(\omega, z) &= A \cdot e^{-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{B^2}} \cdot e^{-\alpha_0 \cdot \omega^2 \cdot z} = A \cdot e^{-\frac{(\omega^2 - 2\omega\omega_0 + \omega_0^2 + \alpha_0 \omega^2 z B^2)}{B^2}} = \\ &= A \cdot e^{-\frac{(\frac{-\omega^2(1+\alpha_0 z B^2) - 2\omega\omega_0 + \omega_0^2}{B^2}) \cdot \frac{1}{1+\alpha_0 z B^2}}{1+\alpha_0 z B^2}} = A \cdot e^{-\frac{(\omega^2 - 2\omega\omega'_0 + \omega_0'^2 - \omega_0'^2 + \frac{\omega_0^2}{1+\alpha_0 z B^2})}{B'^2}} = \\ &= A \cdot e^{-\frac{(\omega-\omega'_0)^2}{B'^2}} \cdot e^{-\frac{(-\omega_0'^2 + \frac{\omega_0^2}{1+\alpha_0 z B^2})}{B'^2}} \end{aligned}$$

De manera similar al caso anterior, si ordenamos y agrupamos ciertos términos, resulta que para  $Y = 2$  se cumple la siguiente expresión:

$$S_r(\omega, z) = A' \cdot e^{-\frac{(\omega - \omega'_0)^2}{B'^2}} \quad (2.6)$$

con  $\omega'_0$ ,  $B'$  y  $A'$  las nuevas frecuencia central, ancho de banda y amplitudes teniendo en cuenta los parámetros de atenuación que dependerán del tipo de material, y dadas por las ecuaciones 2.7, 2.8 y 2.9. Ver [22] para un completo desarrollo en la obtención y formulación de estos nuevos parámetros.

$$\omega'_0(z) = \frac{\omega_0}{1 + \alpha_o z B^2} \quad (2.7)$$

$$B'(z) = \frac{B}{\sqrt{1 + \alpha_o z B^2}} \quad (2.8)$$

$$A'(z) = A \cdot e^{-\frac{\omega_0^2}{1 + \alpha_o z B^2} - \frac{\omega_0^2}{(1 + \alpha_o z B^2)^2}} \quad (2.9)$$

Las ecuaciones anteriores sólo son ciertas para  $Y = 1$  ó  $Y = 2$ , según el caso. Para valores intermedios se comete un cierto error al suponer que el pulso gaussiano atenuado con la ley de atenuación definida en la ecuación 2.2 sigue siendo gaussiano. Sin embargo es fácil demostrar que en estos casos el error que se comete es pequeño con lo que la aproximación por gaussianas es válida en todo el rango  $1 \leq Y \leq 2$ .

Sea  $\widehat{S}_r(\omega, z)$  el diagrama tiempo-frecuencia estimado a partir de un A-scan obtenido mediante simulación de la inspección ultrasónica de un material dispersivo con la ley de atenuación dada por la ecuación 2.2. Si para cada profundidad  $z$  ajustamos una gaussiana de parámetros  $A'(z)$ ,  $\omega'_0(z)$  y  $B'(z)$  minimizando el error cuadrático medio mínimo, podemos calcular el error máximo del ajuste (EAG) mediante la ecuación:

$$EAG(Y) = \max_{\omega, z} \left\{ \widehat{S}_r(\omega, z) - A'(z) \cdot e^{-\frac{(\omega - \omega'_0(z))^2}{B'^2(z)}} \right\} \cdot \frac{1}{A(0)} \quad (2.10)$$

Repetiendo este procedimiento para cada valor de  $Y$  ( $1 \leq Y \leq 2$ ) podemos obtener las curvas del error máximo normalizado  $EAG(Y)$  obtenido al aproximar el diagrama tiempo-frecuencia mediante gaussianas para la ley de atenuación de cuerpos blandos. Dicha curva se presenta en la figura 2.2 y muestra el error cometido al modelar el pulso ultrasónico con una envolvente gaussiana para valores de  $Y$  comprendidos entre 1 y 2, en ella podemos apreciar cómo en este intervalo de valores el error cometido en la aproximación gaussiana es prácticamente despreciable.

Contrastada la validez del rango de valores elegido para el parámetro  $Y$ , y tal y como se justificará en secciones posteriores, el desarrollo obtenido utilizando

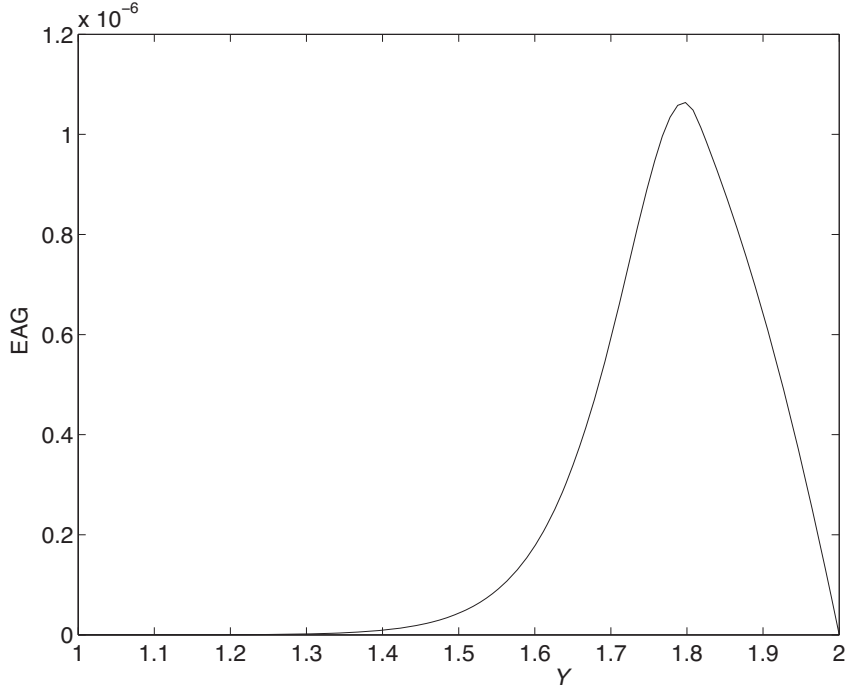


Figura 2.2: Máximo error cometido, normalizado en amplitud, en la aproximación gaussiana en función de  $Y$ .

como parámetro  $Y = 2$ , es el que más se ajusta a nuestro modelo bajo estudio. En esta sección se justifica mediante las figuras 2.3 y 2.4 cuyo contenido se detalla a continuación, y posteriormente se corroborará, mediante simulación y procesamiento de señales reales, que tanto  $A'(z)$ ,  $\omega'_0(z)$  y  $B'(z)$  dependen de la profundidad del material.

Si analizamos las ecuaciones (2.7) y (2.8) podemos observar que ambas predicen una disminución de la frecuencia central del pulso así como una disminución leve del ancho del pulso, conforme éste penetra en el material, debido al efecto de atenuación que se está modelando. De manera similar, y tal y como es predecible, la ecuación (2.9) simboliza una disminución del nivel de la señal con la profundidad. El nivel de señal disminuirá más rápidamente con la profundidad conforme aumente el valor del parámetro  $\alpha_o$ .

La figura 2.3 muestra el aspecto de un diagrama tiempo-frecuencia tal cual se describe en la ecuación (2.6). Esta figura fue simulada para una frecuencia central del pulso ultrasónico de  $f_0=500$  KHz con ancho de banda fraccional inicial de  $B=75\%$  la cual se propaga a lo largo del material acorde con la ley definida en la ecuación (2.6) con una velocidad del pulso  $v_p=1500$  m/s hasta una profundidad de  $z=1.5e-3$  m. Esta simulación se ha generado teniendo en cuenta sólo la atenuación por absorción, con los siguientes valores para el parámetro  $\alpha_o=\{1e-9, 1e-10$  y

0.5e-10}. La figura 2.3 también muestra, superpuestos, los parámetros  $\omega'_0(z)$  (línea punteada) y  $B'(z)$  (línea sólida).

Tal y como se aprecia en la figura 2.3 las variaciones en el valor del parámetro  $\alpha_o$  se ven reflejadas en la forma del diagrama tiempo-frecuencia obtenido del A-scan y este tipo de variaciones pueden ser estudiadas y usadas para diseñar algoritmos que nos permitan clasificar diferentes materiales en función de los diferentes perfiles de amplitud, variación en frecuencia o forma del diagrama tiempo-frecuencia. De esta manera, si la forma del diagrama es correctamente interpretada ésta podrá ser usada para caracterizar o distinguir materiales con diferentes perfiles de atenuación.

Esta misma idea puede hacerse extensiva a la mayoría de los fenómenos de atenuación que sufre un pulso ultrasónico cuando viaja a lo largo de un material (por ejemplo al efecto de dispersión) [7, 24]. Si además tenemos en cuenta que la mayoría de estos fenómenos pueden modelarse como leyes de potencia [25], cada uno de estos efectos individuales puede ser acumulativo y la envolvente final puede ser igualmente modelada con una expresión gaussiana.

Vamos a ilustrar a continuación esta idea introduciendo al modelo anterior la atenuación debida a la dispersión estocástica.

La dispersión estocástica es frecuentemente modelada acorde con la ecuación (2.11) [7],

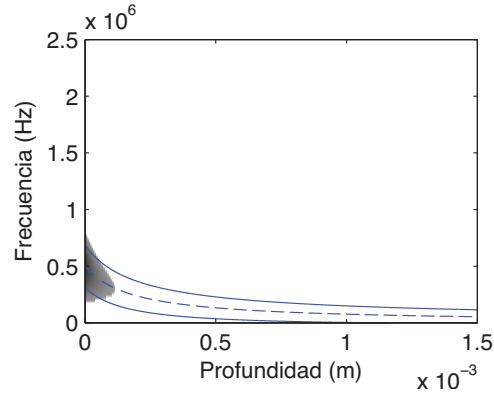
$$\alpha_s(\omega) = e^{-\alpha_{S0} \cdot \bar{D} \cdot \omega^2 \cdot z} \quad (2.11)$$

donde  $\alpha_{S0}$  es la atenuación debida a la dispersión estocástica y  $\bar{D}$  es el diámetro medio de los dispersores que componen la estructura del material. Sin ánimo de generalizar y debido a las relaciones entre la longitud de onda y la velocidad de propagación del material bajo estudio [7], y para no obtener ecuaciones demasiado voluminosas y poco inteligibles, asumiremos que la dispersión estocástica es la única fuente de atenuación representativa del pulso ultrasónico, que se añade como fuente de atenuación al ya mencionado factor  $\alpha_0$  inherente al material. Bajo esta asunción y de manera similar al desarrollo que nos ha llevado a la ecuación (2.6), el efecto de la dispersión estocástica en la respuesta en frecuencia del pulso recibido puede ser modelada usando la citada ecuación para  $Y = 2$ , de la siguiente manera,

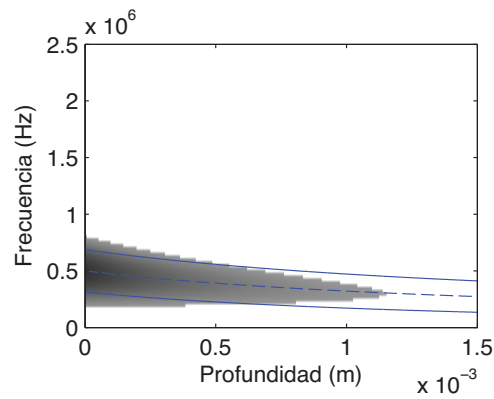
$$S_r(\omega, z) = A'(z) \cdot e^{-\frac{(\omega - \omega'_0(z))^2}{B'^2(z)}} \cdot e^{-\alpha_{S0} \cdot \bar{D} \cdot \omega^2 \cdot z} = A''(z) \cdot e^{-\frac{(\omega - \omega''_0(z))^2}{B''^2(z)}} \quad (2.12)$$

Los nuevos parámetros  $A''(z)$ ,  $\omega''_0(z)$  y  $B''(z)$  que tienen en cuenta la atenuación debida a la dispersión estocástica pueden ser extraídos a partir de las ecuaciones (2.13), (2.14) y (2.15).

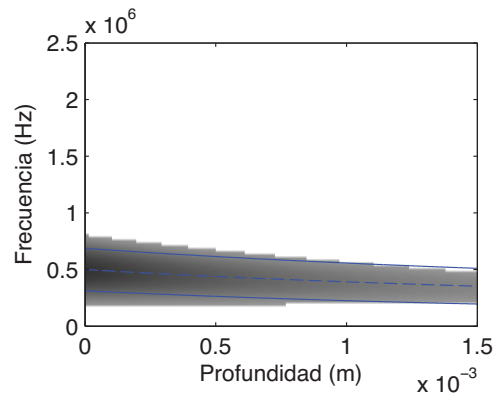
$$\omega''_0(z) = \frac{\omega'_0}{1 + \alpha_{S0} \cdot \bar{D} \cdot z \cdot B'^2} \quad (2.13)$$



(a)



(b)



(c)

Figura 2.3: TFR simulados teniendo en cuenta el efecto de atenuación por absorción. Superpuesto se representa la evolución con la profundidad de la frecuencia central y el ancho de banda del pulso. Los parámetros para la simulación del pulso ultrasónico fueron:  $f_0=500$  KHz,  $B=75\%$  (inicial),  $\bar{D}=1$  mm y  $\alpha_0$  variable. (a)  $\alpha_0=1e-9$ . (b)  $\alpha_0=1e-10$ . (c)  $\alpha_0=0.5e-10$ .

$$B''(z) = \frac{B'}{\sqrt{1 + \alpha_{S0} \cdot \bar{D} \cdot z \cdot B'^2}} \quad (2.14)$$

$$A''(z) = A' \cdot e^{-\frac{\omega_0'^2}{B'^2} \cdot \left( \frac{\alpha_{S0} \cdot \bar{D} \cdot z \cdot B'^2}{1 + \alpha_{S0} \cdot \bar{D} \cdot z \cdot B'^2} \right)} \quad (2.15)$$

Si analizamos las ecuaciones (2.13) y (2.14) ambas predicen, al igual que en el caso anterior, una disminución de la frecuencia central del pulso así como una disminución leve del ancho del pulso, conforme éste penetra en el material, pero ahora debido además al efecto de dispersión que se está estudiando. De manera similar, la ecuación (2.15) predice una disminución del valor de la amplitud de la señal que será mayor (con la profundidad) para aquellos materiales con mayor diámetro medio de dispersor.

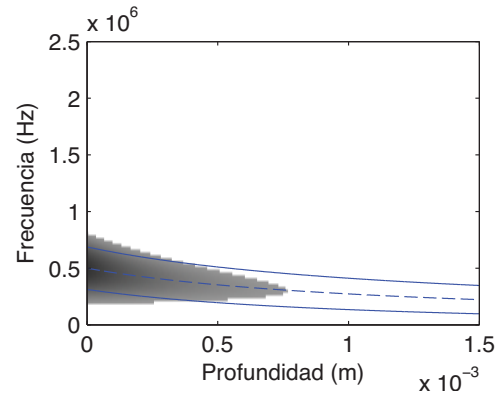
La figura 2.4 muestra el aspecto de un diagrama tiempo-frecuencia tal cual se describe en la ecuación (2.12). Esta figura fue simulada para una frecuencia central del pulso ultrasónico de  $f_0=500$  KHz, con ancho de banda fraccional inicial de  $B=75\%$  la cual se propaga a lo largo del material acorde con la ley definida en la ecuación (2.12) con una velocidad del pulso  $v_p=1500$  m/s hasta una profundidad de  $z=1.5e-3$  m, considerando despreciable el efecto de atenuación por absorción. Esta simulación se ha generado para un valor fijo de atenuación por dispersion,  $\alpha_{S0}=1e-5$ , y tres valores de diámetro medio de dispersor,  $\bar{D}=\{1.5, 1$  y  $0.5\}$  mm. La figura 2.4 también muestra, sobrepuesto, los parámetros  $\omega_0''(z)$  (línea punteada) y  $B''(z)$  (línea sólida).

Si se observa ahora la figura 2.4, se puede constatar también cómo este tipo de variaciones se ven reflejadas en la forma del diagrama tiempo-frecuencia obtenido del registro de señal. Al igual que en el caso anterior, las variaciones en el TFR pueden ser estudiadas y usadas para diseñar algoritmos que nos permitan clasificar diferentes materiales en función de los diferentes perfiles de amplitud, variación en frecuencia o forma del diagrama tiempo-frecuencia. En este caso, la forma del diagrama puede ser usada para estimar el diámetro medio de los dispersores o atenuación debida a la dispersión estocástica.

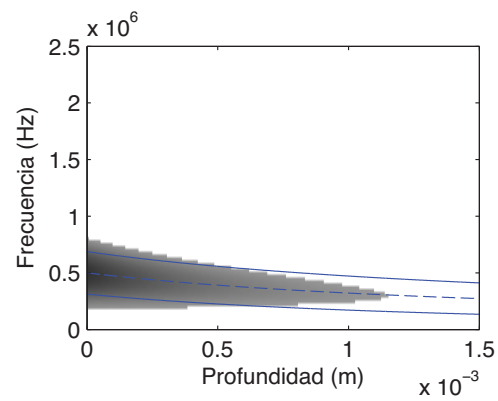
### 2.2.3. Conclusiones

En esta sección se ha desarrollado matemáticamente un modelo de señal afín y generalizable al tipo de materiales que se pretenden caracterizar en la presente tesis. La utilidad de implementar un modelo teórico nos aporta la capacidad de poder generar modelos de material cuyas características (parámetros) son conocidos, así como la flexibilidad de poder variar las citadas características para la generación de señales simuladoras de diferentes tipos de materiales.

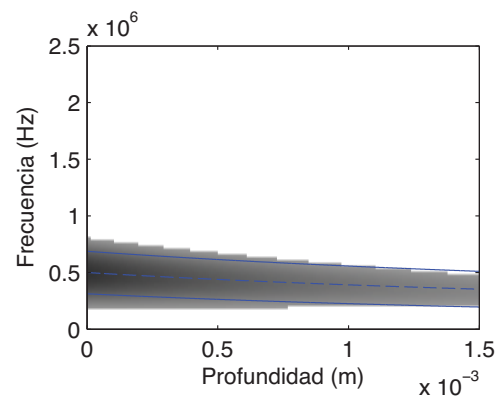
Una vez formulado el modelado de la señal en frecuencia, se procede a realizar una descripción de las diferentes alternativas encontradas para el análisis espectral de la señal bajo estudio para la obtención del diagrama tiempo-frecuencia.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.4: TFR simulados teniendo en cuenta el efecto de atenuación debida a la dispersión estocástica. Superpuesto se representa la evolución con la profundidad de la frecuencia central y el ancho de banda del pulso. Los parámetros para la simulación del pulso ultrasónico fueron:  $f_0=500$  KHz,  $v_p=1500$  m/s,  $B=75\%$  (inicial),  $\alpha_{S0}=1e-5$ ,  $\bar{D}$  variable. (a)  $\bar{D}=1.5$  mm. (b)  $\bar{D}=1$  mm. (c)  $\bar{D}=0.5$  mm.



El TFR será el punto de partida para el cálculo de descriptores de forma y geométricos que complementen la tradicional firma ultrasónica, con el objetivo de llevar a cabo la caracterización del material bajo análisis.

## **2.3. Análisis espectral no estacionario de la señal a caracterizar**

### **2.3.1. Presentación**

En la sección anterior se ha presentado el modelo teórico que nos permite obtener la relación de parámetros de señal (ancho de banda, frecuencia central, etc.) con parámetros físicos del material (atenuación, diámetro medio de los dispersores que conforman la microestructura de éste, etc.).

A continuación se pretende determinar cuál es la mejor forma para obtener la distribución tiempo-frecuencia de la señal registrada, para tal fin se llevará a cabo un análisis espectral no estacionario de ésta.

Lo que hoy conocemos como análisis espectral no estacionario o análisis de señales en tiempo-frecuencia surge ante la necesidad de modelar espectralmente señales cuyo contenido frecuencial varía en función del tiempo. Quizás un representativo ejemplo es el habla humana, donde las frecuencias van cambiando a medida que hablamos y, de hecho, es el cambio de frecuencias y su ordenación temporal el portador del mensaje.

El término “no estacionario” indica la variación temporal de las propiedades básicas de este tipo de señales. Así, el objetivo del análisis de señales en tiempo-frecuencia es describir la variación temporal del contenido espectral de estas señales y ver cómo se relacionan las propiedades espectrales que varían en el tiempo con la fuente física que origina la señal y con el medio de propagación.

La principal diferencia entre el análisis espectral estándar o análisis de Fourier y el análisis de señales en tiempo-frecuencia se puede explicar de una manera muy simple. El análisis de Fourier de una señal, sea estacionaria o no, nos dice qué frecuencias existen mientras dura esa señal. Sin embargo, no nos dice cuándo ocurren o aparecen esas frecuencias, esto es, no nos dice cómo evoluciona en el tiempo el espectro de la señal.

Un método para formalizar el análisis de señales en tiempo-frecuencia consiste en intentar generalizar el análisis de Fourier estándar. La idea básica consiste en extender el concepto de densidad espectral de energía a una función bidimensional que indique la intensidad por unidad de frecuencia y por unidad de tiempo. Tal función describiría entonces cómo el espectro evoluciona en el tiempo y sería llamada distribución, densidad ó representación tiempo-frecuencia (TFR).

Durante los últimos 50 años se han propuesto numerosos métodos que en algún sentido han funcionado muy bien y que coinciden con nuestra idea intuitiva de

cómo un espectro debería variar con el tiempo. En 1946, Gabor [26] cristalizó la necesidad de describir una señal conjuntamente en tiempo y frecuencia. Gabor introdujo un gran número de nuevos conceptos como los de señal analítica, principio de incertidumbre para señales, y diseñó lo que esencialmente es un espectrograma con una ventana gaussiana. En 1932 E.P. Wigner introdujo una distribución [27], que posteriormente fue reintroducida y centrada en el contexto de tratamiento de señal por Ville (1948) [28]; de ahí que esta distribución sea conocida hoy como distribución de Wigner Ville (WVD). En los años posteriores se han formulado numerosas distribuciones y métodos para desarrollarlas. La mayoría de ellas han surgido del uso efectivo de un formalismo general propuesto por L. Cohen [29], en el año 1989 y basado en una integral que depende de una ventana o núcleo (kernel): dependiendo del tipo de ventana elegida, van surgiendo las distintas distribuciones en tiempo-frecuencia.

### 2.3.2. El espectrograma (SP)

Uno de los métodos más originales fue desarrollado a principio de los años cuarenta con el fin específico de comprender la naturaleza del habla humana. El método era simple y potente: dividir la señal en cortos intervalos de tiempo y analizar mediante una transformada de Fourier cada intervalo (método hoy conocido como transformada corta de Fourier, STFT). Entonces, para cada intervalo, se obtiene la densidad de energía espectral que nos indicará las frecuencias existentes en ese intervalo temporal. La colección de todos esos espectros constituye una densidad tiempo-frecuencia comúnmente llamada espectrograma.

La STFT es una de las técnicas más utilizadas para representar señales en el plano tiempo-frecuencia. La señal se divide en intervalos temporales y se realiza la transformada de Fourier de cada intervalo, de la siguiente manera:

$$F_x^h(t, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} x(u)h^*(u-t)e^{-j2\pi\nu u} du \quad (2.16)$$

donde  $x(t)$  es la señal no estacionaria bajo test y  $h(t)$  es la ventana de análisis.

Si consideramos el módulo al cuadrado de la STFT obtenemos el espectrograma, una transformada real y no negativa, que podemos formular de la siguiente manera:

$$S_x^h(t, \nu) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(u)h^*(u-t)e^{-j2\pi\nu u} du \right|^2 \quad (2.17)$$

Las propiedades de este tipo de transformada son las que se enumeran a continuación [30]:

1. Covarianza en tiempo y frecuencia: preserva los desplazamientos en tiempo y frecuencia.

$$\begin{aligned} y(t) = x(t - t_0) &\Rightarrow S_y^h(t, \nu) = S_x^h(t - t_0, \nu) \\ y(t) = x(t)e^{j2\pi\nu_0 t} &\Rightarrow S_y^h(t, \nu) = S_x^h(t, \nu - \nu_0) \end{aligned}$$

2. Resolución tiempo-frecuencia: la resolución temporal de la transformada STFT, y consecuentemente la del espectrograma, es proporcional a la duración efectiva de la ventana de análisis  $h(t)$ . La resolución frecuencial de la STFT está relacionada con el ancho de banda efectivo de la ventana de análisis  $h(t)$ . De lo anteriormente comentado se deduce que existe una solución de compromiso entre las resoluciones temporales y frecuenciales de este tipo de transformada. Si queremos aumentar la resolución temporal tendremos que reducir la anchura temporal de la ventana  $h(t)$  lo que se traducirá en una pérdida de resolución frecuencial. Esta limitación es una consecuencia de la inecuación de Heisenberg-Gabor, propiedad que a su vez es consecuencia directa de la definición de la Transformada de Fourier. Esta propiedad es el principal inconveniente del espectrograma.
3. Preservación de la energía: podemos asumir que  $h(t)$  es una ventana de energía unidad, si integráramos el espectrograma a lo largo de todo el plano tiempo-frecuencia obtendríamos la energía de la señal original. De esta manera el espectrograma puede ser interpretado como una medida de la energía de la señal contenida en el dominio tiempo-frecuencial y centrada en el punto  $(t, \nu)$ .
4. Estructura de las interferencias:

Sea  $x(t) = \sum_{n=1}^N x_n(t)$  una señal multicomponente. Dado que el espectrograma es una representación cuadrática, al realizar el espectrograma sobre una señal multicomponente, y según el principio de superposición cuadrático tenemos que  $S_x(t, \nu) = \sum_{n=1}^N S_{x_n}(t, \nu) + \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{l=m+1}^N 2\Re[S_{x_m x_l}(t, \nu)]$ . De esta manera, siempre que tengamos una señal multicomponente formada por  $N$  señales componente, tendremos  $N$  señales autocomponentes,  $\sum_{n=1}^N S_{x_n}(t, \nu)$ , y  $\binom{M}{2}$  componentes indeseadas o términos interferentes,  $\sum_{m=1}^{N-1} \sum_{l=m+1}^N 2\Re[S_{x_m x_l}(t, \nu)]$ .

Los términos de interferencia del espectrograma son estructuras oscilatorias que están restringidas a regiones del plano tiempo-frecuencia donde se solapan las autocomponentes. Se puede demostrar que si las componentes de la señal,  $x(t)$ , están suficientemente separadas de forma que sus espectrogramas no se solapan significativamente, los términos de interferencia son prácticamente nulos [31] (figura 2.7).

Este tipo de transformada es un ejemplo de la categoría de distribuciones tiempo-frecuencia cuadráticas que son covariantes a translaciones en tiempo y frecuencia y que preservan su energía, pertenecientes a la clase de Cohen [29].

### 2.3.3. La distribución Wigner Ville (WVD)

Otro tipo de distribución tiempo-frecuencia de gran interés es la distribución Wigner Ville (WVD). Es una distribución cuadrática, de alta resolución y ha sido frecuentemente utilizada para detectar transitorios en señales no estacionarias. La WVD se define de la siguiente manera:

$$W_x(t, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right)x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right)e^{-j2\pi\nu\tau} d\tau \quad (2.18)$$

o bien de la siguiente manera:

$$W_x(t, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} X\left(\nu + \frac{\xi}{2}\right)X^*\left(\nu - \frac{\xi}{2}\right)e^{j2\pi\xi t} d\xi \quad (2.19)$$

La WVD es muy selectiva en el dominio tiempo-frecuencia y satisface un gran número de propiedades matemáticas; además de cumplir todas las propiedades que cumple el espectrograma también cumple las propiedades marginales que son propiedades muy deseadas en este tipo de distribuciones. Las principales propiedades de este tipo de transformada se enumeran a continuación [32, 31, 30].

1. Conservación de la energía: si integramos  $W_x(t, \nu)$  a lo largo de todo el plano tiempo-frecuencia obtenemos la energía de  $x(t)$ .
2. Propiedades marginales: la densidad espectral de potencia y la potencia instantánea de  $x(t)$  pueden ser obtenidas como distribuciones marginales de  $W_x(t, \nu)$ .
3. Valores-Reales:  $W_x(t, \nu) \in \mathfrak{R}, \forall t, \nu$ .
4. Covariante a la translación: la TFR es covariante a translaciones en tiempo y frecuencia:

$$\begin{aligned} y(t) = x(t - t_0) &\Rightarrow W_y(t, \nu) = W_x(t - t_0, \nu) \\ y(t) = x(t)e^{j2\pi\nu_0 t} &\Rightarrow W_y(t, \nu) = W_x(t, \nu - \nu_0) \end{aligned}$$

5. Covariante a la dilatación: la WVD también preserva las dilataciones.

$$y(t) = \sqrt{a} \cdot x(at); k > 0 \Rightarrow W_y(t, \nu) = W_x(at, \frac{\nu}{a})$$

6. Compatibilidad con filtrado: esta propiedad expresa que siendo  $y(t)$  una señal resultado de convolucionar  $x(t)$  y  $h(t)$  (la salida de un sistema  $h(t)$  siendo  $x(t)$  la entrada al mismo), la WVD de  $y(t)$  es la convolución temporal entre la WVD de  $h(t)$  y la WVD de  $x(t)$ .

7. Compatibilidad con modulaciones: es la propiedad dual de la anterior. Siendo  $y(t)$  la modulación de  $x(t)$  por una función  $m(t)$ , la WVD de  $y(t)$  es la convolución frecuencial entre la WVD de  $x(t)$  y la WVD de  $m(t)$ .
8. Unitariedad: esta propiedad expresa la conservación del producto escalar del dominio temporal al frecuencial.
9. Frecuencia instantánea: la frecuencia instantánea de una señal  $x$  puede ser recuperada a partir de la WVD de la señal como su momento de primer orden.
10. Retardo de grupo: de forma dual, el retardo de grupo de la señal  $x$  puede ser obtenido como el momento temporal de primer orden de la WVD de  $x(t)$ .
11. Localización perfecta en señales chirp.

$$x(t) = e^{j2\pi\nu_x t}; \nu_x(t) = \nu_0 + 2\beta t \Rightarrow W_x(t, \nu) = \delta(\nu - (\nu_0 + 2\beta t))$$

#### 2.3.4. Estructura de las interferencias del espectrograma vs distribución de Wigner Ville

Al igual que el SP, la WVD es una función bilineal de la señal bajo estudio, por lo tanto la superposición cuadrática le aplica de la misma forma que comentábamos en la propiedad 4 de la lista de propiedades del espectrograma.

Al contrario de lo que ocurre con los términos de interferencia del espectrograma (componentes cruzadas) las interferencias que se producen en el caso de la Wigner Ville no serán nulas, independientemente de la distancia espacio-frecuencial de las componentes de señal. Además, las componentes cruzadas pueden ser bastante problemáticas en los casos donde se solapan con términos de señal ya que dificultan mucho la interpretación de la imagen correspondiente a la distribución Wigner Ville [31, 33]. Para entender la geometría de estas interferencias es interesante el ejemplo ilustrado en las figuras 2.5 y 2.6. En este ejemplo se ha representado el diagrama correspondiente a la transformación tiempo-frecuencia de dos átomos gaussianos, en 2D y 3D, usando la WVD, para clarificar el ejemplo se ha representado también la parte real de la señal temporal y su densidad espectral de potencia, figura 2.5.

Tal y como se puede observar, los términos interferentes se localizan en el punto intermedio entre las dos autocomponentes. Los términos de interferencia oscilan en la dirección perpendicular a la línea que une ambas autocomponentes con una frecuencia de oscilación que es proporcional a la distancia entre éstas.

A modo de hacer una comparativa entre los términos de interferencia que se producen al aplicar la transformada Wigner Ville y el espectrograma, se ha calculado el espectrograma (usando una ventana tipo hamming cuyo número de muestras es cuatro veces inferior al número de muestras de la señal procesada) y la transformada Wigner Ville de dos átomos gaussianos. Ambos átomos se han mantenido en

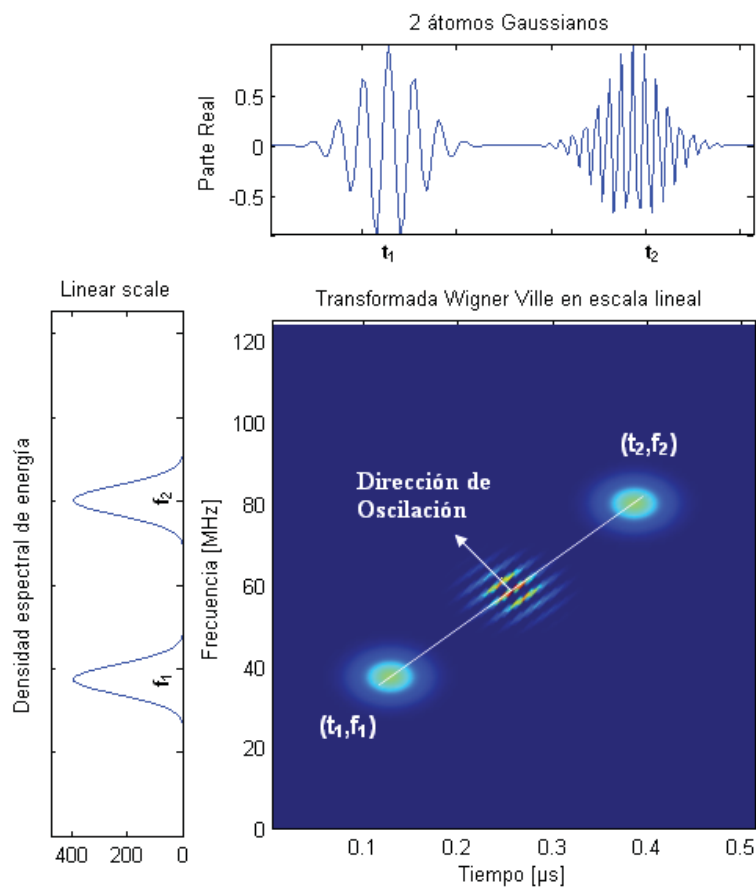


Figura 2.5: Representación 2D: Geometría de las interferencias de la transformada Wigner Ville de una señal compuesta por dos átomos gaussianos.

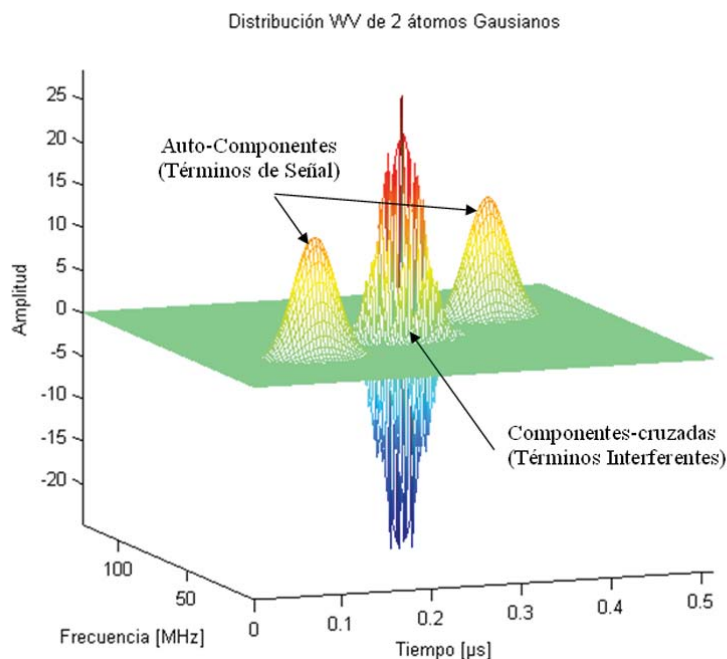
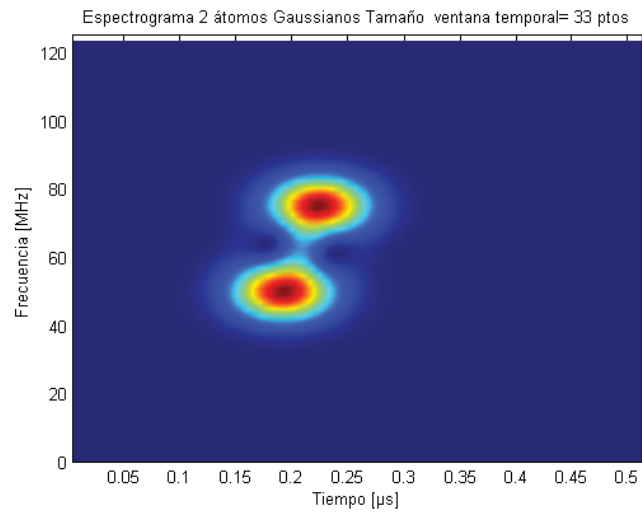


Figura 2.6: Representación 3D: Geometría de las interferencias de la transformada Wigner Ville de una señal compuesta por dos átomos gaussianos.

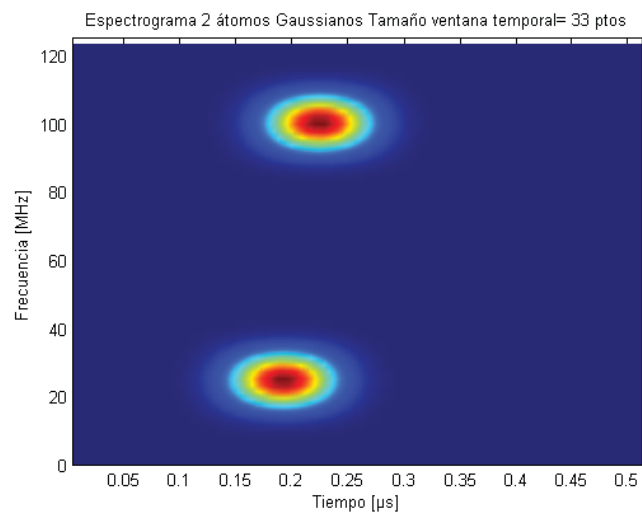
una posición temporal fija y se ha variado la posición relativa de los átomos en el plano frecuencial (figuras 2.7 y 2.8). Podemos observar cómo en el caso del espectrograma (figura 2.7) si las señales están cerca en frecuencia aparecerán términos interferentes que se pueden considerar despreciables y cómo estas interferencias son nulas cuando los términos se alejan en frecuencia, notar que el ejemplo habría resultado igualmente representativo si se hubiera mantenido fija la distancia en el plano frecuencial y se hubiera variado en el temporal o si se hubiera variado su posición relativa en ambos planos. En el caso de la Wigner Ville (figura 2.8) vemos cómo existen interferencias significativas, independientemente de que los términos estén más o menos separados.

### 2.3.5. La distribución Pseudo Wigner Ville (PWVD)

Como solución de compromiso entre ambas transformadas surge la transformada Pseudo Wigner Ville [31]. Según la formulación de la transformada Wigner Ville, expresión (2.21), teníamos que  $q_x(t, \tau) = x(t + \frac{\tau}{2})x^*(t - \frac{\tau}{2})$  desde  $\tau = -\infty$  hasta  $\tau = +\infty$ . En la implementación de la PWVD se reemplaza  $q_x(t, \tau)$  por una versión enventanada, llegando a la siguiente expresión:



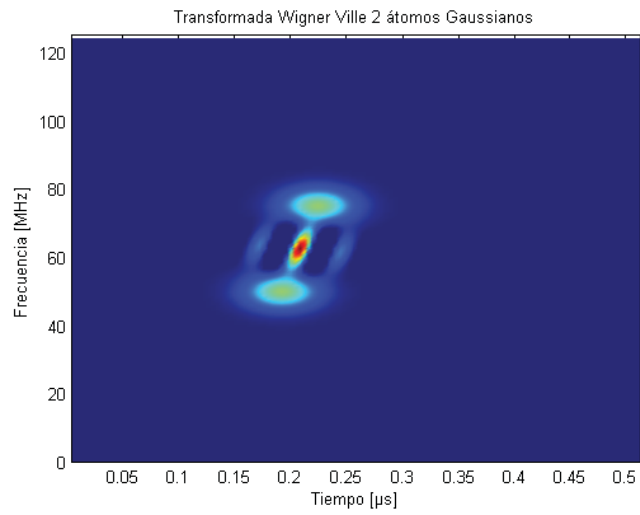
(a)



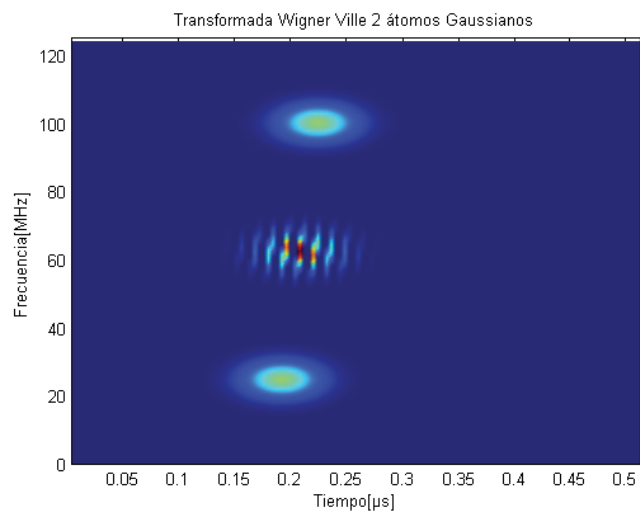
(b)

Figura 2.7: (a) Espectrograma correspondiente a dos átomos gaussianos poco distantes en el plano frecuencial, tamaño de ventana temporal de 33 puntos. (b) Espectrograma correspondiente a 2 átomos gaussianos alejados en el plano frecuencial, tamaño de ventana temporal de 33 puntos.





(a)



(b)

Figura 2.8: (a) Transformada Wigner Ville de 2 átomos gaussianos poco distantes en el plano frecuencial. (b) Transformada Wigner Ville de dos átomos gaussianos alejados en el plano frecuencial.

$$PW_x^h(t, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)x(t + \frac{\tau}{2})x^*(t - \frac{\tau}{2})e^{-j2\pi\nu\tau} d\tau \quad (2.20)$$

donde  $h(t)$  es una ventana regular. El efecto que se produce por el enventanado es equivalente a un suavizado frecuencial de la transformada Wigner Ville ya que

$$PW_x^H(t, \nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\nu - \xi)W_x(t, \xi)d\xi \quad (2.21)$$

donde  $H(\nu)$  es la transformada de Fourier de  $h(t)$ . De esta manera debido a su naturaleza oscilatoria, las interferencias de la PWVD se verán atenuadas en comparación con las interferencias de la WVD.

Como contrapartida algunas propiedades interesantes que tiene la WVD se pierden al enventanar ésta: propiedades marginales, la unitariedad, entre otras, y perderemos resolución frecuencial de las autocomponentes.

### 2.3.6. Conclusiones

En los apartados anteriores se pone de manifiesto que en la bibliografía podemos encontrar gran cantidad de tipos de transformadas diferentes [29, 31, 34]. Dependiendo de la aplicación en la que estemos trabajando puede que nos interese un tipo de transformada u otra.

En el desarrollo de la tesis se han probado diferentes tipos de transformadas tiempo-frecuencia: el espectrograma, la Wigner Ville o versiones modificadas de esta transformada. Se deduce, de manera obvia, que en aplicaciones donde sea necesario tener alta resolución temporal y frecuencial, de forma simultánea, no será una buena opción usar el espectrograma. Sin embargo, en aquellas aplicaciones donde se van a comparar diferentes diagramas tiempo-frecuencia la resolución puede no ser tan significativa a efectos de comparación, puesto que partimos de las mismas condiciones y se aplican por igual a los diferentes TFR que van a ser estudiados.

Durante el desarrollo de esta tesis, se ha trabajado de manera paralela en el uso de operadores morfológicos de imagen para el preprocesado de diagramas tiempo-frecuencia interferentes, de cara a eliminar el ruido que aparece al aplicar cierto tipo de transformaciones tiempo-frecuencia. Podemos citar a modo de ejemplo la utilidad de técnicas para la eliminación de las interferencias presentes en diagramas del tipo Wigner Ville.

El correcto diseño de algoritmos para reducción de interferencias en diagramas ruidosos ha de centrarse no solamente en la eliminación/reducción de las interferencias que presente la distribución ruidosa sino también en la preservación de la integridad geométrica del diagrama original.

Un ejemplo de estudios que se han realizado en este campo, durante el desarrollo de la presente tesis, puede verse en [33, 35]. No obstante, estos estudios se desarrollan en el Anexo A, dada la importancia de la investigación que se ha realizado en este campo, que si bien al final no ha estado directamente relacionada con la temática fundamental la tesis, ha dejado un frente abierto con importantes resultados, para futuras investigaciones.

Dado que la idea principal de la tesis es realizar comparativas en la forma del diagrama correspondiente a la distribución tiempo-frecuencia de diferentes tipos de materiales, las señales con las que se ha trabajado a lo largo de los capítulos 4, 5 y 6 fueron procesadas finalmente usando el espectrograma. No obstante, las dos publicaciones, que derivan de los estudios encaminados a la limpieza de diagramas interferentes, han aportado una serie de consideraciones útiles para el grupo, y dejan una puerta abierta a la mejor interpretación del TFR y a la hora de aplicar los resultados de esta tesis a problemas donde la resolución sí que sea decisiva. Citar entre otras aplicaciones que necesitan alta resolución, el estudio de diagramas tiempo-frecuencia de registros procedentes de señales acuáticas. A modo de ejemplo citar el estudio de señales emitidas por Belugas, que es una línea de investigación abierta recientemente en el GTS en colaboración con la Ciudad de las Artes y las Ciencias (Oceanogràfic) de Valencia.

Una vez realizada la discusión acerca de cómo obtener el diagrama tiempo-frecuencia de la señal, se procede a describir el proceso para la caracterización de materiales, a partir del diagrama tiempo-frecuencia, mediante la aplicación de descriptores geométricos y de forma, además de un conjunto de estimadores derivados de la frecuencia.



## Capítulo 3

# Extracción de características de diagramas tiempo-frecuencia

### 3.1. Presentación

En el capítulo anterior se justificó cómo las características físicas de un material pueden afectar a la forma del TFR de un determinado A-scan. En este capítulo se explotan precisamente estos cambios del diagrama tiempo-frecuencia para obtener información válida para la extracción de características, siendo el punto de partida la inspección ultrasónica de materiales dispersivos.

Se introduce en este capítulo de la tesis un método innovador para extraer parámetros, basado en el análisis geométrico y de forma aplicado a un diagrama tiempo-frecuencia, con el objetivo de extraer características y distinguir entre diferentes tipos de materiales.

Tradicionalmente, la firma ultrasónica se ha venido componiendo de un conjunto de parámetros obtenidos a partir del registro de señal procedente de la inspección ultrasónica de un material o bien mediante el procesado del diagrama tiempo-frecuencia del registro ultrasónico, buscando parámetros que varíen en función de la penetración del pulso en el material.

La principal aportación de esta tesis, es el uso de técnicas que no trabajan sobre el registro de señal directamente, sino sobre la imagen correspondiente al diagrama tiempo-frecuencia de un registro de señal. La imagen obtenida es procesada para extraer características relacionadas con la geometría y forma de este diagrama. En este apartado trabajaremos pues a partir de la imagen obtenida del diagrama tiempo-frecuencia correspondiente a un A-scan determinado.

Bajo esta perspectiva, el diagrama tiempo-frecuencia calculado a partir del

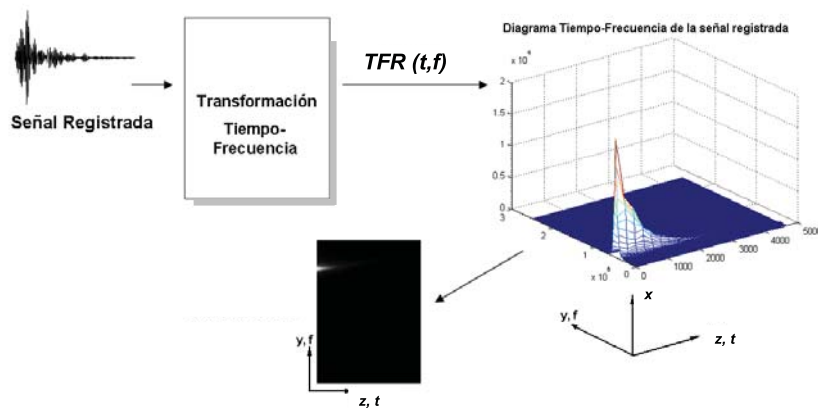


Figura 3.1: Obtención de una imagen a partir de la representación en tiempo-frecuencia del registro de señal bajo test.

registro de señal de partida será interpretado como una imagen, ver figura 3.1. Para llevar a cabo de forma sencilla la conversión a imagen, se pueden mapear los valores del eje  $x$  (valores de potencia) dentro del rango que va desde 0 a 255. Estos valores se corresponderán con distintos niveles de gris empezando por el negro completo (0) y llegando hasta el blanco puro (255). Los diferentes niveles de gris en las imágenes utilizadas indican el nivel de potencia de la señal registrada para cada par tiempo-frecuencia.

El esquema general con el que trabajaremos para llevar a cabo la tarea de extracción de características de la imagen, que compondrán la firma ultrasónica, se puede ver resumido en la figura 3.2.

A partir de este punto se realizará una revisión bibliográfica acerca del actual estado de la técnica en el uso de descriptores geométricos y de forma y su utilidad para un gran rango de aplicaciones. Después nos centraremos en el estudio de diferentes descriptores geométricos y de forma que nos permitan la clasificación de diferentes tipos de materiales, afines al modelo generado, ampliando y/o complementando el conjunto de parámetros que constituyen la tradicional firma ultrasónica. Para tal fin se llevará a cabo la descripción del conjunto de bloques que componen el esquema de la figura 3.2.

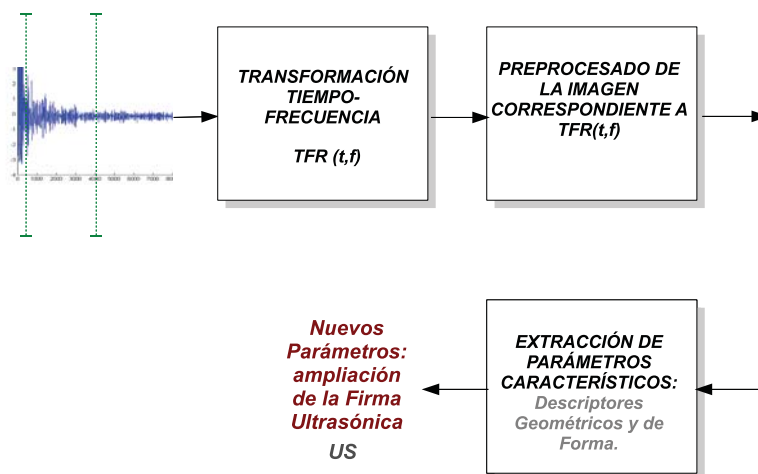


Figura 3.2: Esquema general del método para la extracción de la firma ultrasónica basado en tratamiento digital de imagen.

## 3.2. Estado de la técnica

Nos centramos en las siguiente líneas en realizar una revisión acerca del actual estado de la técnica, mediante la descripción de diferentes aplicaciones donde se utilizan descriptores geométricos y de forma. El objetivo es demostrar la utilidad y el gran uso del tipo de descriptores que se han aplicado en la presente tesis, tanto en el en el ámbito de tratamiento de imagen y como en otras disciplinas.

No son poco numerosas las aplicaciones en las que el tratamiento digital de la imagen se ha utilizado como complemento al procesado de datos procedentes de inspecciones ultrasónicas: a modo ejemplo podemos citar su aplicación en la industria alimenticia [18, 5]. Aunque quizá el principal ámbito de aplicación del tratamiento digital de imagen como complemento a inspecciones ultrasónicas haya sido el area de la medicina, se puede consultar a modo de ejemplo lo expuesto en [36], donde se usan técnicas de tratamiento digital de imagen para interpretar y analizar imágenes ultrasónicas obtenidas mediante inspecciones médicas.

Muchas son las técnicas referenciadas en la bibliografía con el objetivo de abordar la tarea de extraer parámetros significativos de una imagen dada, clasificación de imágenes basadas en texturas, en momentos de orden superior descriptores de contorno y forma entre otros.

Una técnica muy utilizada para reconocimiento o clasificación de patrones son los descriptores de forma [37, 38, 39, 40]. En este campo, el uso de técnicas para

representación y descripción de contornos [41] ha sido de gran utilidad en un amplio abanico de aplicaciones: reconocimiento de caracteres [42], industria alimentaria [43] o localización de imágenes por contenido en grandes bases de datos [44, 45], entre otros.

Si nos centramos en el estudio de transformaciones tiempo-frecuencia de diferentes registros de señal, en la bibliografía podemos encontrar diferentes técnicas de tratamiento digital de imagen para extracción de parámetros característicos [46, 47, 48, 49, 50]. De entre todas las referencias bibliográficas consultadas no hemos encontrado ninguna referencia acerca de la aplicación de técnicas basadas en el tratamiento digital de imagen con el objetivo concreto de extracción de parámetros para la caracterización de materiales.

De la revisión bibliográfica se concluye que serán los descriptores de forma, tanto los basados en el estudio de regiones como de los contornos, los principales candidatos a ser estudiados para abordar el problema planteado. En esta línea, en el siguiente apartado se formularán y describirán un conjunto de descriptores que, dadas las características del modelo, se puede justificar matemáticamente su relación con ciertas propiedades de los diferentes tipos de materiales que se pretenden caracterizar. Además, se formularán y mostrarán un conjunto de parámetros derivados de la frecuencia que se han venido usando convencionalmente para componer la tradicional firma ultrasónica así como una alternativa para el cómputo de éstos.

### 3.3. Método alternativo para la caracterización ultrasónica de materiales

#### 3.3.1. Presentación

El análisis de forma bidimensional (2D) puede ser aplicado a la distribución tiempo-frecuencia de A-scans ultrasónicos para caracterización de materiales dispersivos. La motivación de esta idea está basada en la observación de que variaciones en la atenuación del medio o el tamaño medio del dispersor, que componen la estructura de un material, afectan a la forma del TFR, ver figuras 2.3 y 2.4. Por esta razón, es esperable que aplicando descriptores sensibles a la forma del diagrama TFR seamos capaces de distinguir diferentes materiales. Además si se lleva a cabo un proceso de binarización del TFR, previamente a la extracción de características, es previsible que se disminuya la sensibilidad frente al ruido de observación ( $n(t)$ ).

La aplicación de descriptores geométricos para el estudio de diagramas tiempo-frecuencia proporciona un método innovador para complementar las técnicas clásicas. Algunos de los operadores probados representan además un camino alternativo para obtener parámetros con el mismo significado que los que componen la tradicional firma ultrasónica, con el valor añadido de presentar menor sesgo y/o varianza, tal cual se justificará en el capítulo 4.



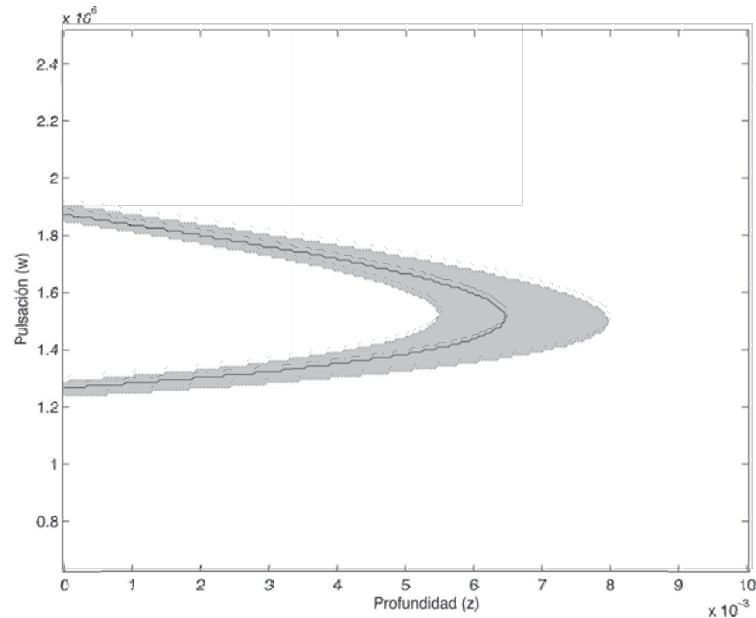


Figura 3.3: TFR de una señal simulada acorde con modelo presentado en la ecuación (2.6) ( $Y = 2$ ). TFR procedente de la señal sin contaminar con ruido, binarizado con umbral fijo (línea continua) y TFR procedente de la misma señal contaminada con AWGN de varianza 0.17 (línea punteada), la zona gris delimita el área de incertidumbre al umbralizar con el mismo umbral fijo la señal contaminada.

### 3.3.2. Preprocesado del diagrama tiempo-frecuencia: proceso de binarización

Antes de binarizar el diagrama tiempo-frecuencia del A-scan, fruto de una inspección ultrasónica, se debe de abordar la selección del umbral adecuado. Si asumimos que el registro ultrasónico de señal está contaminado con un ruido aditivo blanco y gaussiano (AWGN), el TFR binarizado contendrá *jitter*. Este *jitter* afectará a la forma del diagrama binarizado y por supuesto a los parámetros geométricos que de él se deriven.

Para ilustrar lo comentado en el párrafo anterior, la figura 3.3 muestra un diagrama tiempo-frecuencia generado a partir de una señal contaminada con AWGN y sin contaminar. La figura muestra el contorno (línea sólida) del TFR correspondiente a la señal sin contaminar con ruido, binarizado con un umbral fijo. Superpuesto se ha representado (ver área gris delimitada con líneas discontinuas) el área de incertidumbre que se produce al umbralizar, con el mismo valor de umbral calculado para la señal sin ruido, el TFR correspondiente a la misma señal pero ahora contaminada con ruido AWGN de varianza 0.17.

Una alternativa a la hora de intentar minimizar el efecto del ruido es usar un

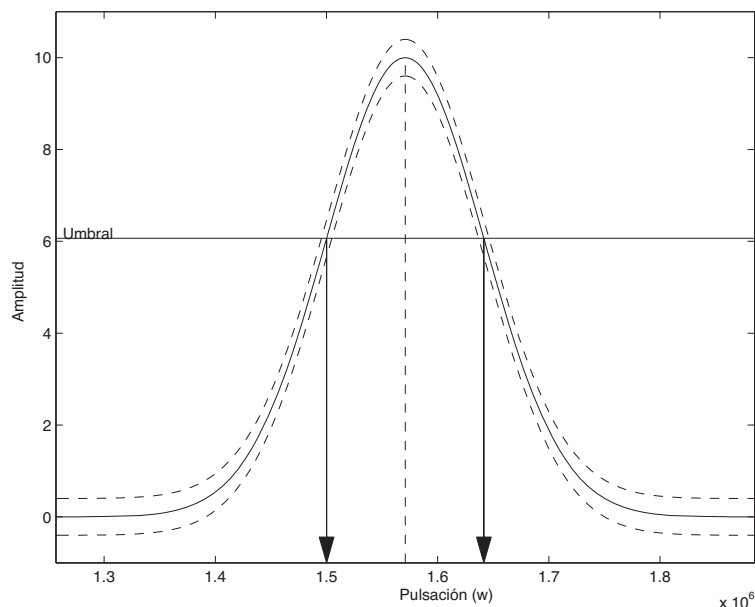


Figura 3.4: Corte de un TFR a una profundidad fija. Posicionamiento del umbral en el punto de máxima pendiente.

umbral variable con la profundidad.

Llegados a este punto es importante recordar que el espectro del pulso ultrasónico ha sido modelado por una envolvente gaussiana acorde con la ecuación (2.12). De esta manera, si el umbral es fijado, para cada profundidad, en el punto donde la pendiente de la envolvente gaussiana es máxima es posible minimizar el *jitter*. Las figuras 3.4 y 3.5 clarifican este punto.

La figura 3.4 muestra el corte de un diagrama tiempo-frecuencia a una cierta profundidad y se observa el posicionamiento del umbral en el punto de máxima pendiente, las líneas discontinuas muestran el *jitter* (cuando la señal presenta ruido con cierta varianza) que se produce al colocar el umbral en un punto diferente al de máxima pendiente.

Por otro lado la figura 3.5 muestra un diagrama tiempo-frecuencia umbralizado utilizando un umbral variable que se ha posicionado, para cada profundidad, en el punto de máxima pendiente de la gaussiana (ver línea continua). Seguidamente se ha añadido AWGN con varianza 0.17 a la misma señal y se ha obtenido su TFR el cual se ha binarizado usando el mismo umbral calculado para la señal sin ruido. Superpuesto se ha representado el área gris que muestra la incertidumbre o posibles valores que podría adoptar la forma del TFR debido al *jitter* producido por el ruido.

Si observamos las figuras 3.3 y 3.5 es fácil apreciar que el umbral variable

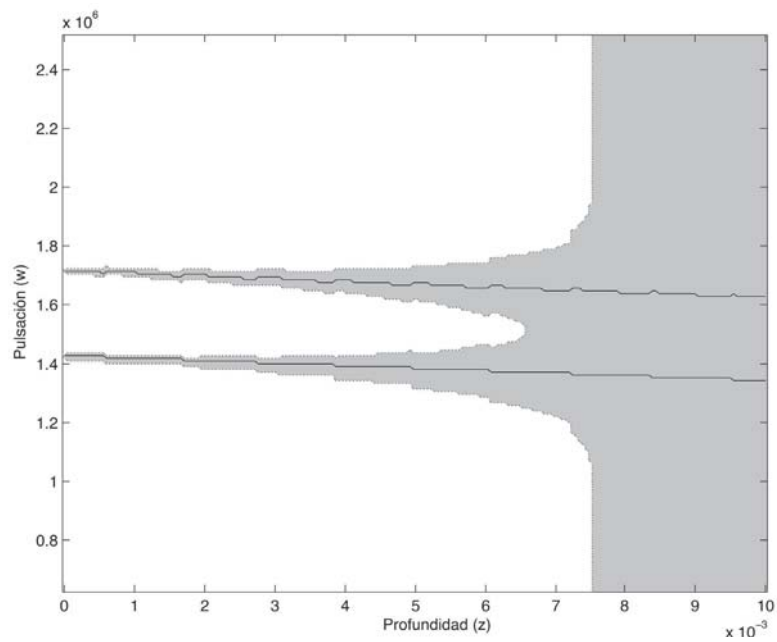


Figura 3.5: *TFR de una señal simulada acorde con modelo presentado en la ecuación (2.6) ( $Y = 2$ ). TFR procedente de la señal sin contaminar con ruido, binarizado con umbral variable (línea continua) y TFR procedente de la misma señal contaminada con AWGN de varianza 0.17 (línea punteada), la zona gris delimita el área de incertidumbre al umbralizar con el mismo umbral variable la señal contaminada.*

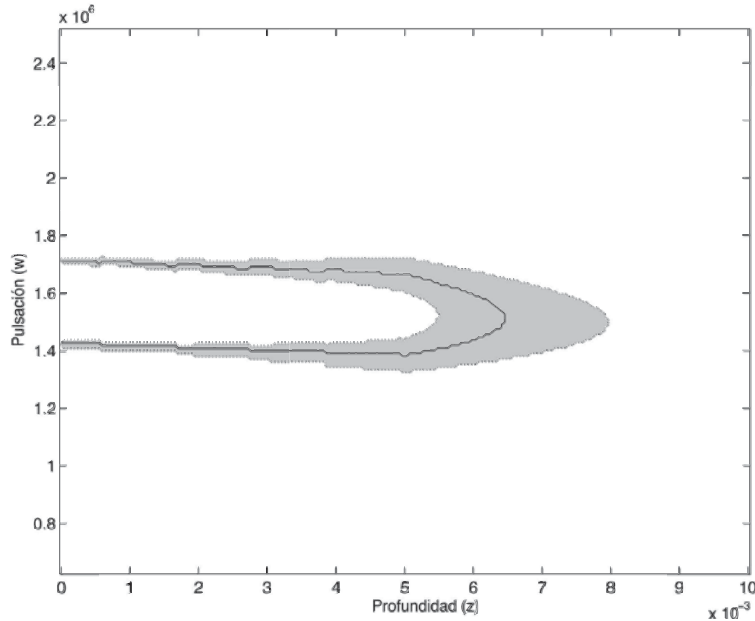


Figura 3.6: TFR de una señal simulada acorde con modelo presentado en la ecuación (2.6) ( $Y = 2$ ). TFR procedente de la señal sin contaminar con ruido, binarizado con umbral variable (línea continua) y TFR procedente de la misma señal contaminada con AWGN de varianza 0.17 (línea punteada), la zona gris delimita el área de incertidumbre al umbralizar la señal contaminada con el mismo umbral mixto.

proporciona mejores resultados (tiene menos *jitter*) cuando la amplitud de la envolvente gaussiana es mayor que el nivel de ruido mientras que el umbral fijo proporciona mejores resultados para niveles de ruido comparables a la amplitud de la gaussiana. Cuando el nivel de la gaussiana es comparable al nivel del ruido el área de incertidumbre que se produce al umbralizar con un umbral variable aumenta enormemente (figura 3.5).

Lo que se ha hecho en la presente tesis es combinar ambos umbrales en uno, al que se llama umbral mixto (ver figura 3.6). En primer lugar se estima la profundidad a la cual la energía del ruido es comparable a la de señal. Se usa un umbral variable que calcula para cada punto el valor del umbral adaptándolo a la máxima pendiente y a partir de la profundidad donde el nivel de ruido y señal son comparables, se aplica un umbral fijo, de forma que aunque sigue existiendo *jitter* este es mínimo para niveles de señal altos y no tan grande para mayores profundidades (donde el nivel de señal se ha atenuado mucho).

### 3.3.3. Extracción de características a partir de la imagen correspondiente al diagrama tiempo-frecuencia

Una vez sentadas las bases y descritas las pautas a seguir para la correcta binarización de la imagen correspondiente al diagrama tiempo-frecuencia, estamos en condiciones de abordar la descripción del conjunto de parámetros geométricos que pueden ser extraídos a partir de la matriz correspondiente al TFR.

Como ya se ha comentado anteriormente, es posible analizar el TFR y extraer parámetros que dependen de alguna o varias de las características del material inspeccionado. En el capítulo 2 se justificó que la forma del diagrama está correlada con algunas propiedades físicas del material; pero este hecho también puede ser justificado de manera matemática. Para no hacer extenso este punto nos centramos en el parámetro *area*, pero se podría llegar a conclusiones similares si se analizan matemáticamente la mayoría de los parámetros que se presentan en este capítulo.

Pasemos pues a justificar matemáticamente la dependencia del *area* del TFR con las propiedades físicas de cierto material analizado.

Sea la figura 3.7 un ejemplo, obtenido por simulación, de un diagrama tiempo-frecuencia binarizado con el umbral mixto descrito anteriormente. Denotamos  $I(\omega, z)$  a este diagrama tiempo-frecuencia binarizado. Esta representación puede ser formulada matemáticamente, en una primera aproximación, tal cual se describe en la ecuación (3.1), siempre y cuando el umbral haya sido correctamente seleccionado. Los parámetros  $\omega_o''(z)$  y  $B''(z)$  dependen de parámetros relacionados con importantes propiedades del material ( $\alpha_0$ ,  $\alpha_{S0}$  y  $\bar{D}$ ), tal cual se demostró en el capítulo 2 mediante las ecuaciones (2.13) y (2.14). Si consideramos, por simplicidad, solamente la dispersión estocástica, se puede demostrar que el área de un diagrama binarizado, hasta una profundidad ( $z_0$ ), viene dada por la ecuación (3.2). Notar que en el cómputo del área el término de desplazamiento  $\omega_o''(z)$ , puede ser omitido.

$$I(\omega, z) = \text{rect} \left( \frac{\omega - \omega_o''(z)}{B''(z)} \right) \quad (3.1)$$

Para una selección arbitraria del umbral, la igualdad de la ecuación (3.2) no siempre se cumple. Sin embargo, si que podemos asegurar una relación de proporcionalidad que nos resultará también válida para nuestro propósito de clasificación de materiales.

La ecuación (3.2) muestra que cuanto más elevado sea el valor de  $\bar{D}$ ,  $\alpha_{S0}$  ó  $\alpha_0$  menor será el área final del TFR binarizado. Esta simple demostración muestra que descriptores geométricos muy básicos pueden proporcionar importante información para llevar a cabo la comparación de características de diferentes materiales tales como atenuación o tamaño medio de dispersores.

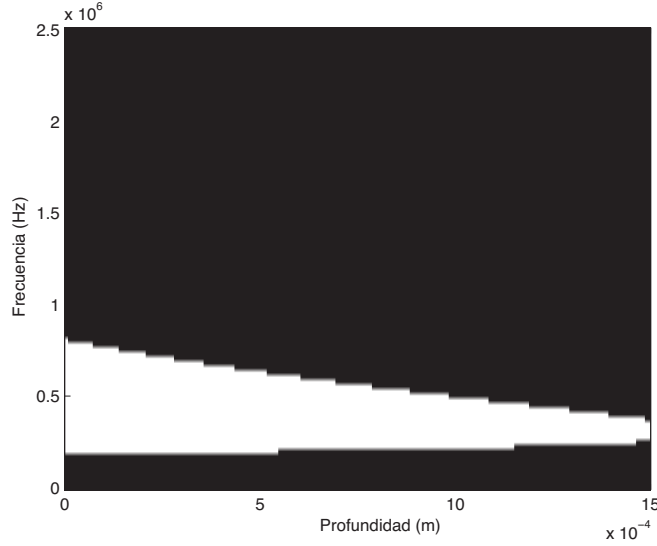


Figura 3.7: Ejemplo simulado de diagrama binarizado con umbral mixto. Los parámetros de simulación son:  $f_c=500$  KHz, AWGN de varianza 0.15 y  $\bar{D}=1.5$  mm.

$$\begin{aligned} \text{Area}[I(\omega, z)] &= \int_z \int_\omega \text{rect}\left(\frac{\omega}{B''(z)}\right) d\omega dz = \int_{z=0}^{z=z_0} B''(z) dz = \\ &= \frac{2}{\alpha_{S0} \cdot \bar{D} \cdot B'} \left( \sqrt{1 + \alpha_{S0} \cdot \bar{D} \cdot z_0 \cdot B'^2} - 1 \right) \quad (3.2) \end{aligned}$$

### Descriptores del diagrama tiempo-frecuencia: análisis de forma

Llegados a este punto, es importante recordar y enfatizar, que nuestra principal contribución es el trabajo con descriptores geométricos o de forma que de alguna manera nos puedan aportar información acerca de las características físicas, relacionadas con cambios en el TFR. Además es predecible que los descriptores geométricos constituyan una representación más intuitiva del modelo en comparación con los clásicos parámetros basados en el estudio de ciertas propiedades de una señal que se propaga a lo largo de un material.

En las siguientes líneas se presenta un conjunto de operadores básicos que se han usado tradicionalmente para el análisis geométrico y de forma en diferentes aplicaciones, tales como reconocimiento de patrones o caracterización de imágenes, entre otras. En el caso concreto que nos ocupa, y tal y como se ha justificado anteriormente, a partir de  $I(\omega, z)$ , el diagrama binarizado generado con el umbral mixto, se pueden calcular diferentes descriptores geométricos [37, 51, 52].

A continuación describimos todos aquellos parámetros que se intuye a priori nos permitirán abordar con éxito el objetivo perseguido:

1. *area*:

Para una función genérica y discreta en dos variables, los momentos de orden  $p + q$  se definen como,

$$m_{pq} = \sum_z \sum_\omega z^p \omega^q I(\omega, z) \quad (3.3)$$

siendo  $I(\omega, z)$  el TFR binarizado, en las coordenadas  $(\omega, z)$ .

El área de un TFR se relaciona con la atenuación,  $\alpha_0$  y  $\alpha_{S0}$ , del material inspeccionado así como con el diámetro medio del dispersor ( $\bar{D}$ ), tal cual fue demostrado en la ecuación (3.2).

El área de una región puede ser obtenida usando el momento de orden cero,  $m_{00} = \sum \sum I(\omega, z) \equiv area$ .

Si se usa el parámetro *area* para distinguir materiales con coeficiente de atenuación similar, pero con diferente distribución de tamaño de dispersores, es esperable que cuanto mayor sea el valor de  $\bar{D}$  menor sea el valor del descriptor *area*.

Por otro lado, si comparamos materiales dispersivos con microestructura granular similar pero con diferente coeficiente de atenuación por absorción ( $\alpha_0$ ), cuanto mayor sea el valor de  $\alpha_0$ , menor será el valor obtenido para el descriptor *area*.

Además los resultados descritos en los dos párrafos anteriores no solamente son acordes con lo expresado en la ecuación (3.2) sino que también concuerdan con la forma de los diagramas que se obtienen mediante simulación ver por ejemplo figuras 4.8 y 4.15 que serán presentadas en el capítulo 4.

2. *centroide*:

Usando los momentos de primer orden y la definición del parámetro *area* dada en el punto anterior, es posible calcular el *centro de gravedad*, *centroide* o *centro de masas* de una región dada.

Siendo  $m_{10} = \sum \sum z \cdot I(\omega, z)$  y  $m_{01} = \sum \sum \omega \cdot I(\omega, z)$ , el *centroide* puede ser definido como  $(c_z, c_\omega)$ , donde:

$$c_z = \frac{m_{10}}{m_{00}} \quad \text{y} \quad c_\omega = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (3.4)$$

Si dividimos la representación tiempo-frecuencia binarizada en pequeñas regiones, a lo largo del eje horizontal  $z$ , seremos capaces de estudiar la evolución de la frecuencia centroide con la profundidad, tal cual se expone más adelante.

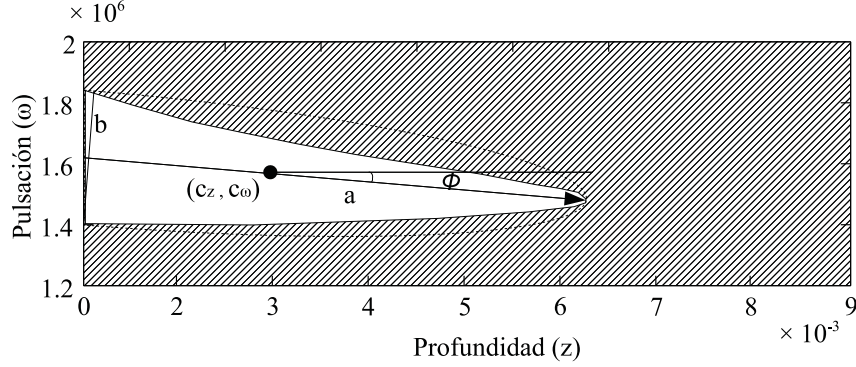


Figura 3.8: Descripción del parámetro orientación.

Además, el *centro de gravedad* también es usado para la formulación de los momentos centrales, ver ecuación (3.5), los cuales nos servirán como punto de partida para la definición del siguiente operador.

$$\mu_{pq} = \frac{1}{m_{00}} \sum_z \sum_\omega (z - c_z)^p (\omega - c_\omega)^q I(\omega, z) \quad (3.5)$$

### 3. orientación:

La orientación de un objeto ( $\phi$ ) puede ser calculada usando los momentos centrales de segundo orden, tal cual se pone de manifiesto en la ecuación 3.6.

$$\phi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}}\right) \quad (3.6)$$

La *orientación* puede ser descrita geoméricamente como el ángulo entre el eje mayor del objeto y el eje  $z$ , tal cual puede verse en la figura 3.8. Así, conforme la inclinación del TFR va aumentando, ver figuras 2.3 y 2.4, el valor absoluto de parámetro  $\phi$  irá aumentando.

### 4. excentricidad:

Un importante parámetro, también dependiente de la forma del TFR, es la *excentricidad* ( $\varepsilon$ ). La *excentricidad* permite estimar si la forma de un objeto es más o menos elíptica o circular. Los valores de excentricidad oscilan entre 0 y 1, ( $0 \leq \varepsilon \leq 1$ ). Para objetos circulares  $\varepsilon = 0$  sin embargo para contornos o formas más elípticas  $0 < \varepsilon < 1$ .

Geoméricamente, la excentricidad, responde a la siguiente expresión,

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \quad (3.7)$$



donde  $a$  y  $b$  son, respectivamente, los ejes mayores y menores del objeto, tal cual se describe en la figura 3.9.

La *excentricidad* de una región dada también puede ser calculada usando los momentos centrales de orden dos y el parámetro *orientacion*, acorde con la siguiente expresión,

$$\varepsilon = \left( \frac{\mu_{20}\cos^2\phi + \mu_{02}\sin^2\phi - \mu_{11}\sin 2\phi}{\mu_{20}\sin^2\phi + \mu_{02}\cos^2\phi - \mu_{11}\cos 2\phi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

donde  $\cos\phi$  y  $\sin\phi$  representan respectivamente el coseno y el seno del ángulo  $\phi$ .

Se puede usar la excentricidad para distinguir entre materiales con similar coeficiente de atenuación, pero con estructura dispersiva formada por dispersores de diferentes diámetros ( $\bar{D}$ ). En tal caso, cuando el tamaño medio del dispersor sea menor, es esperable que la excentricidad sea mayor y que cuando el tamaño del dispersor crezca la excentricidad decrezca. Por otro lado, cuando los materiales tienen una distribución similar de dispersores pero diferente coeficiente de atenuación, es un resultado lógico que cuanto mayor sea la atenuación del material menor sea la excentricidad y al contrario.

Lo que se concluye en el párrafo anterior se puede corroborar si observamos los diagramas que se muestran en la figuras 2.3 y 2.4.

La figura 2.3 muestra cómo para valores fijos de atenuación, materiales con mayores valores de  $\bar{D}$  tienen formas menos alargadas (más circulares) que aquellos que tienen menor valor de  $\bar{D}$ .

Acorde con la figura 2.4, cuando  $\bar{D}$  es fijo, materiales con mayores valores de atenuación tienen formas del TFR más circulares.

De esta manera, es lógico pensar que cuanto mayor sea la atenuación del material, o bien el valor de  $\bar{D}$ , menor será el valor del parámetro excentricidad.

##### 5. *signature del contorno (SC):*

La signature o firma de un contorno es una representación unidimensional (1D) del borde de un objeto.

Uno de los métodos más simples de generar el *SC* de una región es representar la distancia euclídea entre el centro de gravedad de la región y cada punto del borde como una función de un ángulo ( $\theta$ ).

En la figura 3.9 se ilustra este concepto. Así los cambios en tamaño del diagrama tiempo-frecuencia binarizado se manifestarán en cambios en los valores de amplitud de la correspondiente *SC*.

A modo de ejemplo la figura 3.10 muestra el resultado de aplicar el estimador *SC* sobre una región circular (ver figura 3.10.a) y sobre una región cuadrada (ver figura 3.10.b). En esta figura se puede observar cómo para el caso del círculo la amplitud del radio se mantiene constante conforme varía  $\theta$ ; sin embargo en el caso del cuadrado es lógico que la amplitud muestre cuatro

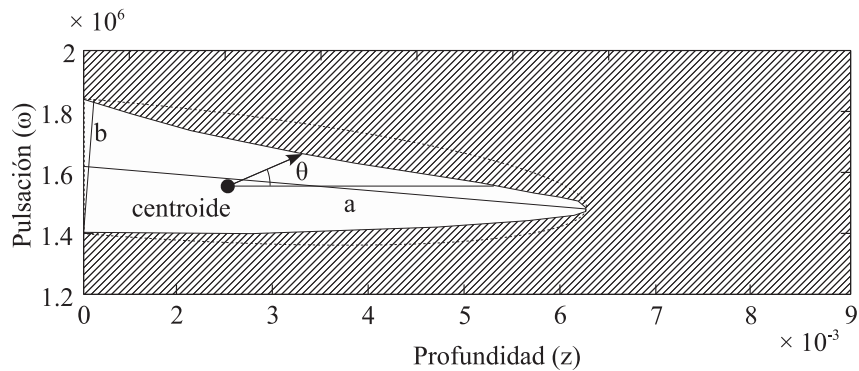
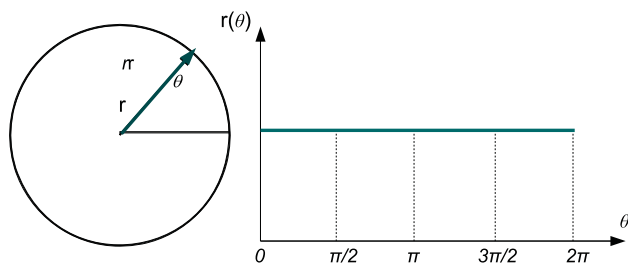
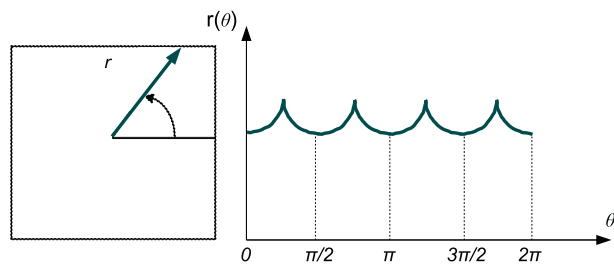


Figura 3.9: Descripción de los parámetros signature del contorno (SC) y excentricidad ( $\varepsilon$ ).



(a)



(b)

Figura 3.10: Ejemplo del cálculo del estimador signature del contorno. (a) Región circular. (b) Región cuadrada.

máximos debido a que la distancia euclídea del centroide al borde de la región es máxima en las cuatro esquinas del cuadrado.

Es esperable, al igual que pasaba en el cálculo de los descriptores *excentricidad* o *area*, que cuanto mayor sea el valor del diámetro medio de dispersor menor sea la amplitud del parámetro SC.

Por otro lado, si  $\bar{D}$  se mantiene fijo, es predecible que cuanto mayor sea la atenuación del material menor sea la amplitud del parámetro SC.

En resumen, para calcular el parámetro SC hemos de calcular para cada ángulo ( $\theta$ ) la distancia euclídea entre el *centro de gravedad* y el borde de la región. Así en función de la forma del diagrama tiempo-frecuencia se irán obteniendo diferentes valores de distancia entre el centroide y el borde, que representados en función del ángulo, compondrán la firma del borde o *signature del contorno*. Notar que el parámetro SC no solamente proporciona información sobre cambios en la distancia del *centroide* al borde, sino que también proporciona información acerca de la dirección angular de dichos cambios.

#### 6. Derivados de la frecuencia.

A continuación vamos a mostrar algunos de los parámetros que el GTS ha venido tradicionalmente empleando como parte de la firma ultrasónica. Estos parámetros se han modificado empleando el enfoque de tratar el TFR como una imagen. Los parámetros convencionales se han aplicado sobre la imagen correspondiente al TFR, modificada bien mediante un filtrado sencillo o bien debido al proceso de binarización.

De entre todos los parámetros que componen la tradicional firma ultrasónica se han seleccionado aquellos que se relacionan con el estudio de la evolución de la frecuencia de la señal con la profundidad. Los parámetros a los que nos referimos son la *frecuencia centroide*, la *frecuencia central* y el *ancho de banda fraccional a -3 dB*. Los citados parámetros se computan sobre el diagrama tiempo-frecuencia del A-scan y no sobre el registro de señal puro. Por esta razón, se decidió modificar los citados parámetros bien usando un filtrado sencillo de la imagen correspondiente al TFR o bien mediante el proceso de binarizado en el punto de máxima pendiente, con el objetivo de minimizar la sensibilidad de la estima a la componente de ruido auditivo y gaussiano.

De manera tradicional los estimadores convencionales *frecuencia centroide*, *frecuencia central* y *ancho de banda fraccional a -3 dB*, se han venido calculando acorde con lo expresado en las ecuaciones (3.9), (3.10) y (3.11), respectivamente.

- *frecuencia centroide* ( $\omega_c$ ):

$$\omega_c(z) = \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega \cdot |S(\omega, z)| \cdot d\omega}{\int_{\omega_1}^{\omega_2} |S(\omega, z)| \cdot d\omega} \quad (3.9)$$

, donde  $|S(\omega, z)|$  es la magnitud de la representación tiempo-frecuencia, y  $[\omega_1, \omega_2]$  define el intervalo de integración.

- *ancho de banda fraccional a  $-3$  dB ( $BW_{\%}$ ):*

$$BW_{\%}(z) = \frac{BW_{-3dB}(z)}{2 \cdot \pi \cdot \omega_0(z)} \cdot 100\% \quad (3.10)$$

- *frecuencia central ( $\omega_{max}$ ):*

$$\omega_{max}(z) = \underbrace{\max}_{\omega} |S(\omega, z)| \quad (3.11)$$

Para el cómputo de los estimadores derivados de la frecuencia modificados, se procede de la siguiente forma:

- Para calcular la evolución de la *frecuencia central* con la profundidad se trabajará con la imagen correspondiente al diagrama tiempo-frecuencia en escala de gris (sin binarizar) previo filtrado de ésta usando un filtro de media con una máscara de tamaño 5. Una vez realizado el filtrado de la imagen correspondiente al diagrama tiempo-frecuencia se procederá a calcular, para cada profundidad, la frecuencia a la que corresponde la amplitud máxima del diagrama. El resultado final será la evolución de la *frecuencia central* a lo largo del eje  $z$  (profundidad). En lo sucesivo nos referiremos a este estimador como estimador *frecuencia central modificado* ó  $\omega_{max}^{mod}$ .
- El cálculo de la evolución del estimador *ancho de banda* con la profundidad es similar al de la *frecuencia central*. Se partirá igualmente de la imagen correspondiente al diagrama tiempo-frecuencia filtrado. Para cada valor de profundidad se binarizará el diagrama con un umbral a  $-3$  dB del máximo y se calculará, en la dimensión  $\omega$ , el tamaño del rectángulo resultante. De esta manera se obtiene la evolución del *ancho de banda fraccional a  $-3$  dB* a largo del eje  $z$ . En lo sucesivo nos referiremos a este estimador como estimador *ancho de banda fraccional a  $-3$  dB modificado* ó  $BW_{\%}^{mod}$ .
- Para calcular la evolución de la *frecuencia centroide* con la profundidad se trabajará con la imagen correspondiente al diagrama tiempo-frecuencia binarizado. En este caso la binarización se realizará usando un umbral adaptativo con la profundidad y ubicado en el punto de máxima pendiente, hasta que el nivel de señal sea comparable al de ruido, tal cual se ha comentado al principio de este capítulo. El TFR binarizado se dividirá en pequeños rectángulos a lo largo del eje horizontal y se calculará el *centroide* para cada rectángulo usando los momentos de orden cero y uno, ver ecuación (3.4). El resultado final será la evolución de la *frecuencia centroide* con la profundidad (ver figura 3.11). En lo sucesivo nos referiremos a este estimador como estimador *frecuencia centroide modificado* ó  $\omega_c^{mod}$ .

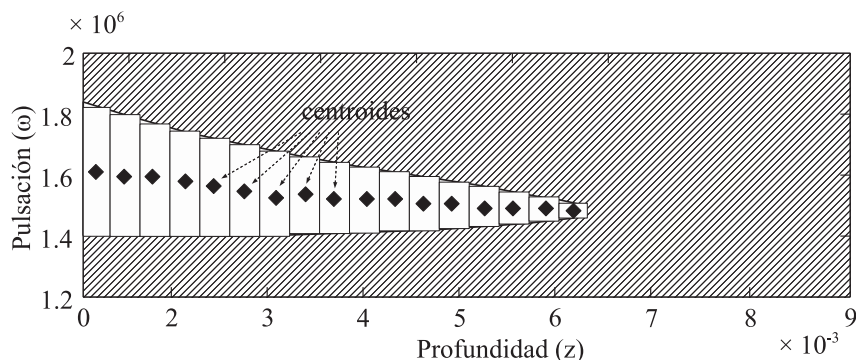


Figura 3.11: Estimación de la evolución de la frecuencia centroide descomponiendo la imagen binarizada en pequeños rectángulos y calculando su centro de gravedad.

### 3.4. Conclusiones

En este capítulo se han presentado y formulado una serie de parámetros para la descripción de la imagen correspondiente a un diagrama tiempo-frecuencia

Estos parámetros se centran en la descripción tanto del contorno (parámetro  $SC$ ) como de las características geométricas (parámetros *area* o *centroide*) y topológicas (parámetro *excentricidad*) de la región que se forma al binarizar un diagrama tiempo-frecuencia.

Se han presentado además una serie de parámetros derivados de la frecuencia que si bien son muy parecidos a los que componen la convencional firma ultrasónica, éstos pretenden aportar una nueva perspectiva: para el cómputo de  $\omega_{max}^{mod}$  se realiza previamente un filtrado de media, sobre la imagen correspondiente al diagrama tiempo-frecuencia; para el cómputo de  $BW_{\%}^{mod}$  también se parte de la imagen filtrada pero en este caso se trabaja con la señal binarizada a  $-3$  dB, punto a punto y a lo largo del eje  $z$ , y para el cálculo de  $\omega_c^{mod}$  se partirá de la imagen binarizada, usando un umbral adaptativo con la profundidad en el punto de máxima pendiente.

En el siguiente capítulo se contrastará mediante simulación la utilidad del uso de este último grupo de parámetros modificados frente a los convencionales equivalentes.

Será en los capítulos 5 y 6 donde se muestre el resultado de aplicar todo el conjunto de parámetros a piezas reales desarrolladas en un entorno de laboratorio. Los resultados presentados en los dos capítulos citados anteriormente nos servirán para contrastar la utilidad de los operadores en dos tipos de problemas bien diferenciados: materiales dispersivos con diámetro medio de dispersor cambiante y fondo homogéneo y en contraste la aplicación a materiales dispersivos con

estructura constante de dispersores pero donde varía la composición del fondo del material.

## Capítulo 4

# Aplicación de descriptores convencionales y modificados a señales simuladas

### 4.1. Presentación

En este capítulo, se presenta el simulador que ha sido desarrollado para la generación de señales sintéticas, con la finalidad de realizar una comparativa de los estimadores derivados de la frecuencia frente a sus versiones modificadas, los cuales fueron descritos en el capítulo anterior.

Una vez haya sido descrito el simulador, se mostrará el resultado de aplicar ambos tipos de estimadores al conjunto de señales sintéticas así como la respuesta teórica que debería ser obtenida. Para tal fin se tomará como caso ejemplo dos tipos de materiales diferentes: por un lado se analizarán materiales con fondo cambiante y estructura dispersiva homogénea y se analizará el comportamiento de ambos tipos de estimadores para diferentes valores de atenuación por absorción; por otro lado, se analizarán materiales con fondo homogéneo y tamaño de dispersor variable y se analizará el comportamiento de ambos tipos de estimadores para diferentes valores de diámetro medio de dispersor.

Se mostrará además la evolución del sesgo y varianza de los estimadores convencionales y se comparará con el sesgo y varianza de sus equivalentes modificados. La comparativa se llevará a cabo bajo diferentes condiciones de ruido de observación, de cara a estudiar la sensibilidad de ambos tipos de estimadores frente al ruido.

La forma en que los resultados son mostrados, en cada una de las secciones es la siguiente:

En la primera sección de este capítulo se muestra el resultado de aplicar am-

dos tipos de operadores a señales simuladas procedentes de materiales dispersivos con fondo homogéneo, atenuación por absorción  $\alpha_0$  fija, y estructura dispersiva variable. Manteniendo fijo el valor  $\alpha_{s0}$  se fue variando el valor del tamaño medio de dispersor ( $\bar{D}$ ).

En la segunda sección se muestra el resultado de aplicar ambos tipos de operadores a señales simuladas procedentes de materiales dispersivos con fondo no homogéneo,  $\alpha_0$  variable, y tamaño medio de dispersor ( $\bar{D}$ ) fijo.

En la tercera sección se presenta el comportamiento frente al ruido de ambos tipos de estimadores, representando conjuntamente el sesgo y la varianza de éstos para diferentes escenarios en cuanto a condiciones de ruido se refiere.

## 4.2. Descripción del simulador

Las señales simuladas han sido generadas acorde con el modelo presentado en el capítulo 2, el cual se resume en la figura 4.1. Se ha desarrollado un simulador usando el entorno de programación MATLAB.

El modelo simulado cumple las características que se describen a continuación:

La reflectividad del material ( $r(t)$ ) ha sido modelada como un ruido blanco de estadística tipo  $K$ , con  $K = 0,5$  y varianza unidad, manteniéndose como un proceso estacionario e independiente de la profundidad del material.

El ruido de observación ( $n(t)$ ) es modelado como un ruido aditivo blanco y gaussiano.

La respuesta del transductor fue modelada mediante un sistema lineal ARMA (modelo autorregresivo de media móvil). El orden del sistema fue estimado experimentalmente de la manera que se indica a continuación. Lo que se hizo fue usar un esquema de medición ultrasónica en modo pulso-eco que atacaba a una probeta de test, de cara a obtener el pulso ultrasónico. Una vez conocida la forma del pulso ultrasónico a reconstruir era necesario el uso de algún método para calcular el orden del filtro  $ARMA(q, p)$  que nos proporcionara la respuesta más parecida al pulso deseado. Para tal fin se utilizó un método basado en series residuales temporales (RTS), [53], de esta forma variando los parámetros  $q$  y  $p$ , el método RTS realiza estimas calculando primero los coeficientes de la parte  $MA$  del filtro, posteriormente, mediante filtrado inverso, estima los coeficientes de la parte realimentada  $AR$  y se van reconstruyendo diferentes pulsos ultrasónicos para diferentes órdenes del filtro ARMA. Una vez obtenido el pulso a través de la probeta de test y los diferentes pulsos calculados mediante el método RTS, para diferentes pares de valores  $q$  y  $p$ , se calcula el error de predicción entre el pulso reconstruido para cada uno de los valores de  $q$  y  $p$  y el pulso obtenido mediante la probeta, el mínimo error nos dará los valores  $p$  y  $q$  que producen mejor estimación del pulso.

Los mejores resultados para el transductor que ha sido empleado se consiguieron con un modelo ARMA de orden 4,  $ARMA(4, 4)$ . Para adaptar el comportamiento variante del pulso, propio de un material de tipo dispersivo, se sustituyeron



los coeficientes  $b's$  y  $a's$  constantes por otros  $b's$  y  $a's$  dependientes de la profundidad. La ley de dependencia se obtuvo tal y como se describe a continuación. Los parámetros  $A''(z)$ ,  $\omega_0''(z)$  y  $B''(z)$  se variaron para adaptarse a las leyes descritas por las ecuaciones (2.13), (2.14) y (2.15) (ver capítulo 2). Posteriormente se emplea el algoritmo de Yule-Walker para obtener los coeficientes  $b's$  y  $a's$  que, para cada profundidad, dan lugar al pulso con los parámetros  $A''(z)$ ,  $\omega_0''(z)$  y  $B''(z)$ .

De esta manera, el sistema lineal y variante en el tiempo (LTV) fue simulado acorde con la ecuación (4.1), donde  $z$  (profundidad de penetración en el material) está relacionada con el instante temporal a través de  $z = \frac{n}{2} \cdot \frac{v_p}{f_s}$ , siendo  $v_p$  la velocidad de propagación de una onda ultrasónica longitudinal y  $f_s$  la frecuencia de muestreo.

$$y(n) = b_0(z) \cdot x(n) + b_1(z) \cdot x(n-1) + b_2(z) \cdot x(n-2) + b_3(z) \cdot x(n-3) + b_4(z) \cdot x(n-4) - a_1(z) \cdot y(n-1) - a_2(z) \cdot y(n-2) - a_3(z) \cdot y(n-3) - a_4(z) \cdot y(n-4) \quad (4.1)$$

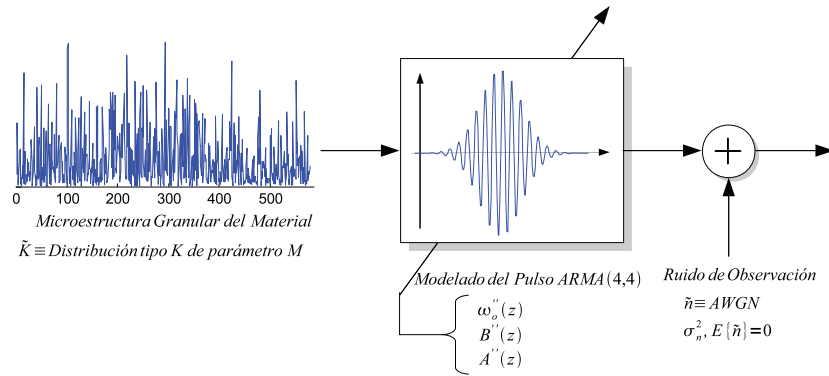


Figura 4.1: Estructura del modelo lineal y variante en el tiempo (LTV) usado para llevar a cabo las simulaciones.

El diagrama de bloques del generador de señales simuladas es el que se muestra en la figura 4.1. Variando los diferentes parámetros del modelo, relacionados con las características físicas del material a validar, se generaron numerosos A-scans. El propósito de este simulador es el de validar la utilidad de los descriptores derivados de la frecuencia modificados, presentados en el capítulo 3, así como realizar una comparativa entre estos descriptores y los convencionales análogos (ver capítulo 3 ecuaciones (3.9), (3.10) y (3.11)).

En las siguientes secciones se procede a realizar la citada comparativa de ambos tipos de estimadores mediante aplicación a señales simuladas de los dos tipos de materiales diferentes descritos en la presentación de este capítulo.

### 4.3. Simulación de materiales con tamaño de dispersor variable y atenuación del fondo fija

Acorde con lo expuesto en el apartado 4.1, en esta sección se muestra el resultado de aplicar el conjunto de los operadores derivados de la frecuencia convencionales y modificados (descritos en el capítulo anterior) a señales simuladas procedentes de materiales dispersivos con fondo homogéneo ( $\alpha_0$  fijo) y estructura dispersiva variable. El objetivo que se pretende es el de comparar la respuesta de ambos tipos de estimadores con la respuesta teórica.

De esta manera, manteniendo fijo el valor  $\alpha_0$  y  $\alpha_{s0}$ , se han obtenido dos figuras correspondientes a dos valores diferentes de diámetro medio de dispersor. Concretamente, para cada par de estimadores probados ( $\omega_{max}$  versus  $\omega_{max}^{mod}$ ,  $BW_{\%}$  versus  $BW_{\%}^{mod}$  y  $\omega_c$  versus  $\omega_c^{mod}$ ) se han obtenido dos figuras, la primera correspondiente a un valor del parámetro  $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$  y la segunda figura correspondiente a un valor del parámetro  $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$ . Cada una de estas figuras contiene a su vez tres gráficas que corresponden a la aplicación de los estimadores en diferentes condiciones de ruido de observación, concretamente para valores de AWGN (ruido auditivo blanco y gaussiano) de varianza= {0, 0.25, y 0.50}.

Se procede a explicar detenidamente cada una de las figuras.

Si nos centramos en las simulaciones realizadas para un valor del parámetro tamaño medio de dispersor  $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$ , obtenemos las figuras 4.2, 4.4 y 4.6.

Si nos centramos en las simulaciones realizadas para el valor del parámetro tamaño medio de dispersor  $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$ , obtenemos las figuras 4.3, 4.5 y 4.7.

La figura 4.2 muestra la evolución de la frecuencia central con la profundidad usando el estimador  $\omega_{max}$  (ver línea roja con marcador “\*”); superpuesta se muestra la evolución con la profundidad del estimador modificado  $\omega_{max}^{mod}$  (ver línea verde con marcador “o”). Además se representa la respuesta teórica que debería obtenerse acorde con los parámetros con los que se ha llevado a cabo la simulación (ver línea azul). Concretamente la gráfica 4.2.a muestra los resultados de ambos estimadores en ausencia de ruido (AWGN de varianza=0), la gráfica 4.2.b muestra

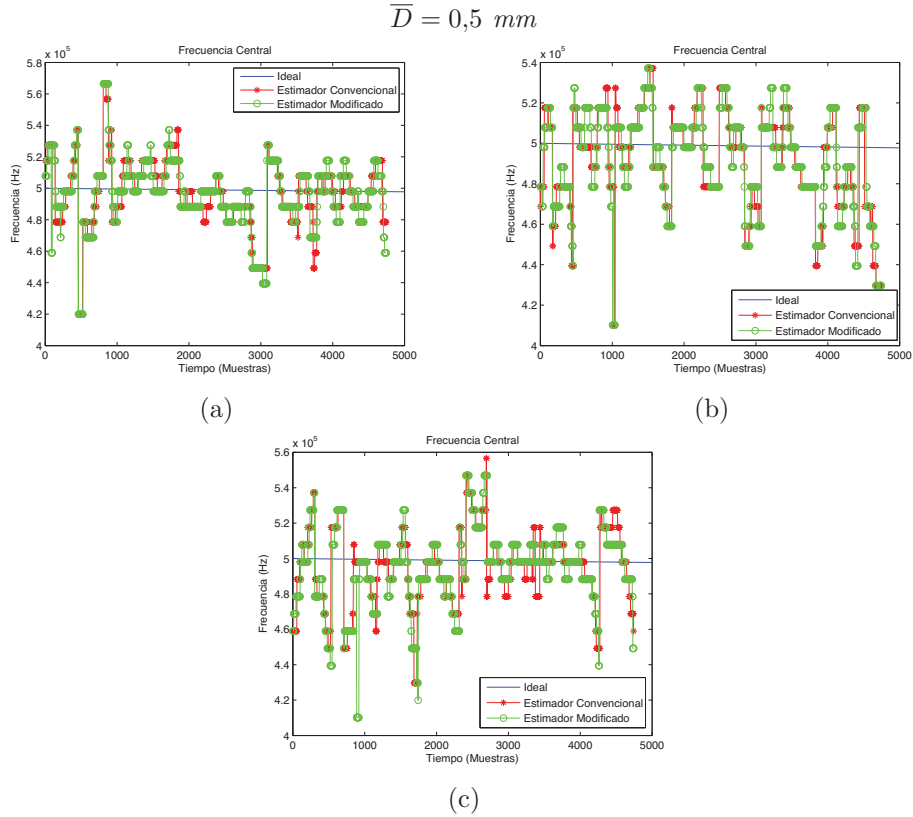


Figura 4.2: Evolución de la frecuencia central: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron:  $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$  y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c).

el caso cuando los parámetros del simulador son AWGN de varianza=0,25 y la gráfica 4.2.c cuando tenemos AWGN de varianza=0,50.

La figura 4.3 muestra la misma información que la figura 4.2, pero en este caso las simulaciones fueron generadas para un valor de diámetro medio de dispersor  $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$ .

De la observación de las figuras 4.2 y 4.3 es importante enfatizar los siguientes aspectos:

- En el análisis de la evolución de la frecuencia central,  $\omega_{max}$  y  $\omega_{max}^{mod}$  proporcionan resultados similares, independientemente del valor de ruido de observación. Además la similitud de resultados se cumple independientemente del valor del diámetro medio de dispersor.
- Se puede observar cómo el valor de la frecuencia central disminuye con la

$$\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$$

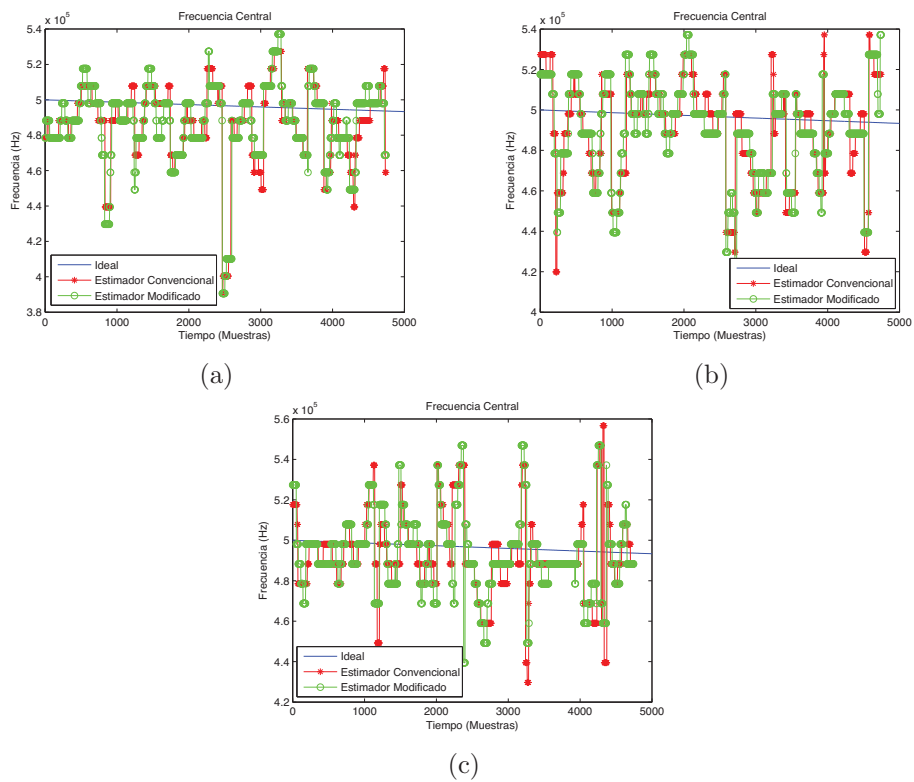


Figura 4.3: Evolución de la frecuencia central: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron:  $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$  y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c).



$$\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$$

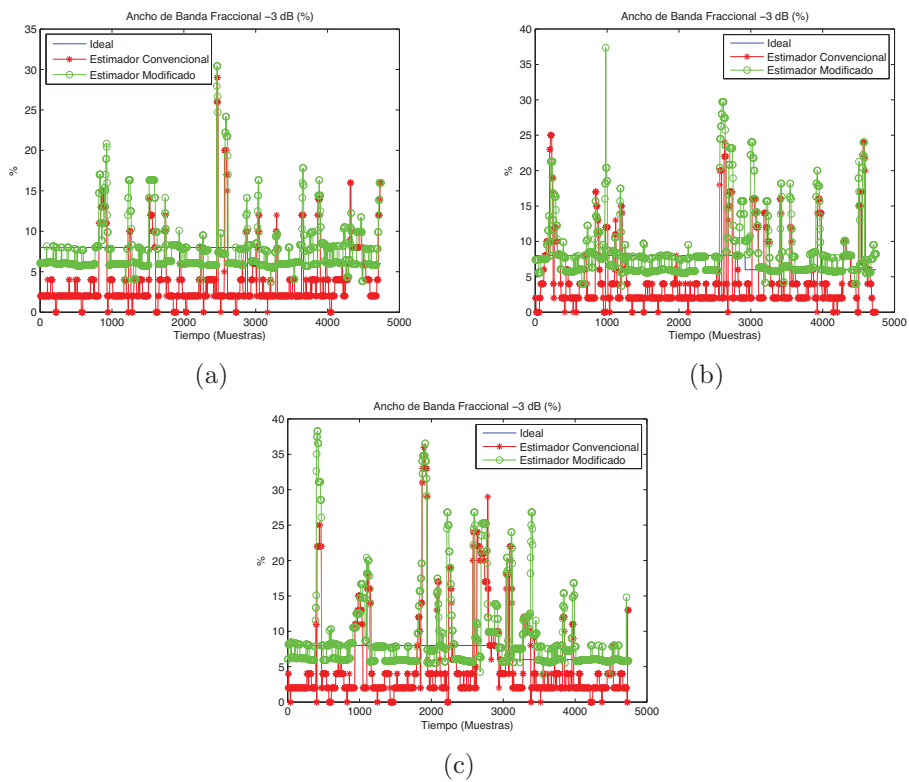


Figura 4.5: Evolución del ancho de banda fraccional: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron:  $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$  y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c).

sión convencional ( $BW_{\%}$ ) se representa mediante línea roja con marcador “\*” y superpuesta se muestra la evolución con la profundidad del mismo estimador modificado ( $BW_{\%}^{mod}$ ) (ver línea verde con marcador “o”). Además se representa la respuesta teórica que debería obtenerse acorde con los parámetros con los que se ha llevado a cabo la simulación (ver línea azul). La gráfica 4.4.a muestra los resultados en ausencia de ruido (AWGN de varianza=0), la gráfica 4.4.b para AWGN de varianza=0,25 y la gráfica 4.4.c para AWGN de varianza=0,50.

La figura 4.5 muestra la misma información que la figura 4.4, pero en este caso las simulaciones fueron generadas para un valor de diámetro medio de dispersor  $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$ .

De la observación de las figuras 4.4 y 4.5 es importante enfatizar que:

- Al analizar la evolución con la profundidad del ancho de banda fraccional a  $-3 \text{ dB}$ , ambos estimadores proporcionan resultados diferenciados.
- Las estimas proporcionadas tanto por  $BW_{\%}$  como por  $BW_{\%}^{mod}$  parecen seguir la tendencia de la línea teórica. No obstante ambos tienen muchos picos en la estima (es previsible que tengan una varianza alta).
- Además de los detalles citados anteriormente, a la vista de los resultados mostrados en las figuras 4.4 y 4.5 es difícil determinar cuantitativamente el error producido de la aplicación de ambos estimadores. No obstante, es previsible que el estimador  $BW_{\%}^{mod}$  tenga algo menos de error en la estima que el estimador  $BW_{\%}$ , pero no estamos aún seguros de poder generalizar esta afirmación como válida para cualquier valor del parámetro  $\bar{D}$  o para cualquier escenario en cuanto a varianza de ruido AWGN. En el caso del material con valor de  $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$  la mejora se aprecia sobre todo para condiciones de mayor ruido; sin embargo en el caso de materiales con valor de  $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$  la mejora se produce independientemente del nivel de ruido.

Los resultados más interesantes se han obtenido en el estudio de la evolución de la frecuencia centroide. De la misma manera que en los dos casos anteriores, la figura 4.6 muestra la evolución con la profundidad del estimador convencional  $\omega_c$  (ver línea roja con marcador “\*”), así como los resultados proporcionados por el mismo estimador en su versión modificada ( $\omega_c^{mod}$ ) (ver línea verde con marcador “o”). Los resultados de ambos estimadores se han comparado también con la respuesta teórica (ver línea azul). En cuanto a las tres gráficas que forman la figura, la gráfica 4.6.a muestra los resultados en ausencia de ruido, y las gráficas 4.6.b y 4.6.d muestran el caso para AWGN de varianza=0,25 y AWGN de varianza=0,50, respectivamente.

La figura 4.7 muestra la misma información que la figura 4.6, pero en este caso las simulaciones fueron generadas para un valor de diámetro medio de dispersor  $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$ .

De la observación de las figuras 4.6 y 4.7 cabe destacar que:

$$\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$$

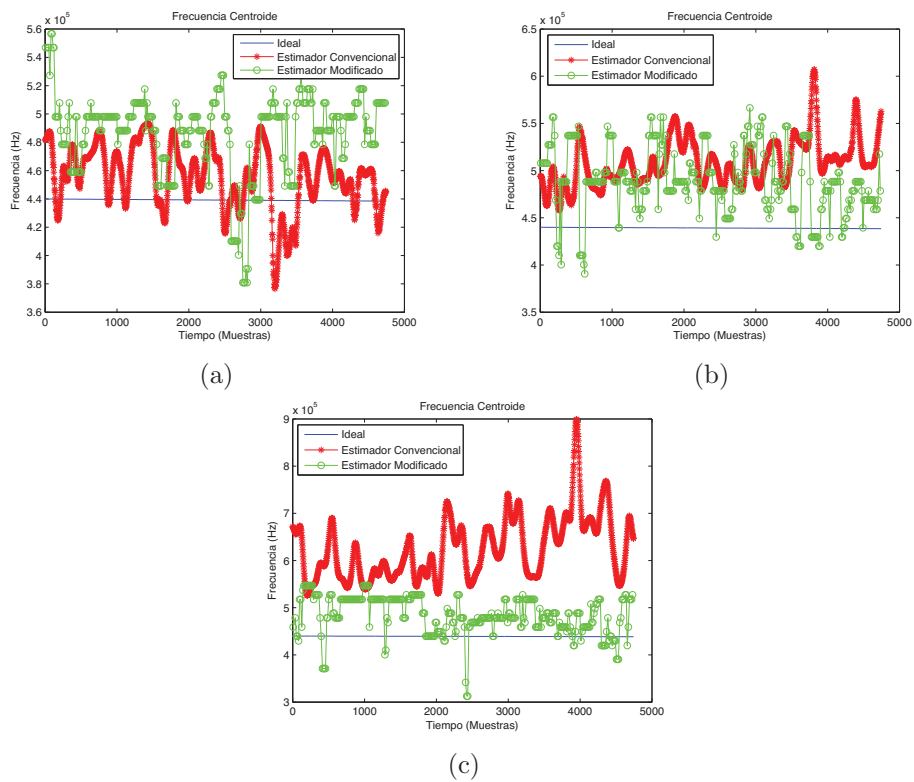


Figura 4.6: Evolución de la frecuencia centroide: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron:  $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$  y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c).



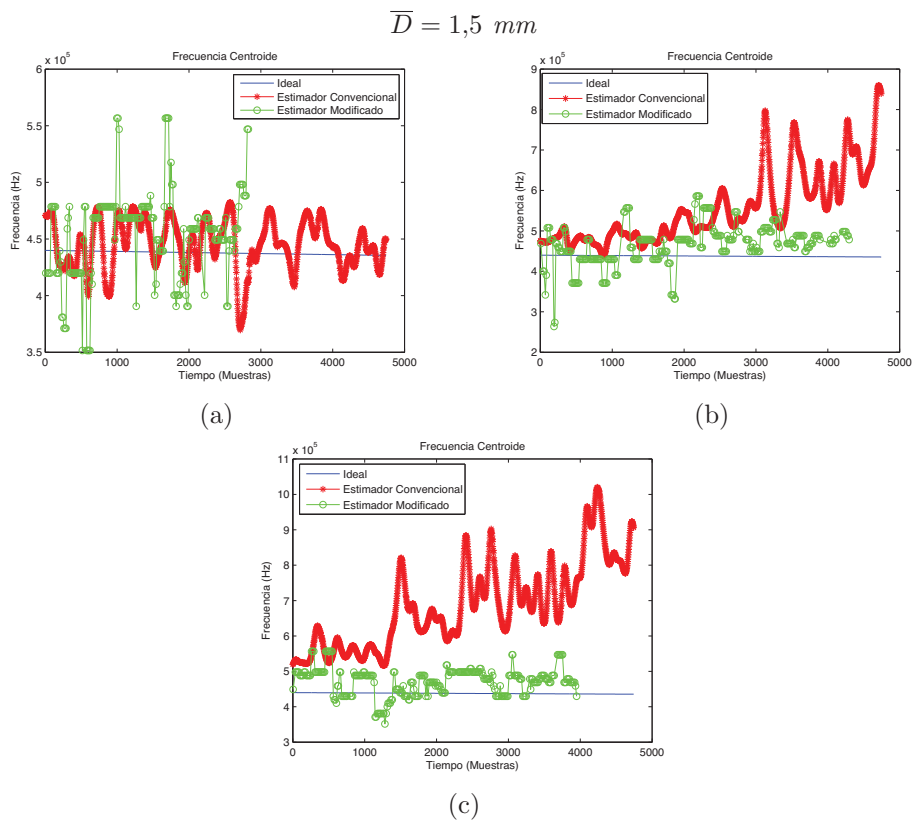


Figura 4.7: Evolución de la frecuencia centroide: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron:  $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$  y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c).

- Conforme aumenta el valor del ruido de observación, los resultados obtenidos con ambos tipos de operadores difieren cada vez más. Para corroborar la línea anterior es suficiente con comparar los resultados mostrados en la gráfica 4.6.a con los mostrados en la gráfica 4.6.b y 4.6.c. El mismo comportamiento se puede apreciar cuando aumenta el valor de  $\bar{D}$ , basta con comparar los resultados mostrados en las gráficas 4.7.a, con los mostrados en la gráfica 4.7.b ó 4.7.c. Se puede además afirmar que conforme aumenta el ruido de observación el estimador  $\omega_c$  se aleja más de la estima teórica, mientras que el estimador  $\omega_c^{mod}$  mantiene una buena estima.
  
- Conforme aumenta el valor del parámetro  $\bar{D}$  el estimador  $\omega_c$  es más sensible al ruido de observación. Por esta razón, los resultados proporcionados por el estimador convencional se alejan más de la respuesta teórica en la figura 4.7 que en la figura 4.6.
  
- Cuando el valor de  $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$  el estimador  $\omega_c^{mod}$  proporciona estimas en todos los instantes temporales (ver figura 4.6). Sin embargo cuando  $\bar{D}$  aumenta el estimador  $\omega_c^{mod}$  no es capaz de proporcionar estimas para todos los instantes de tiempo (ver figura 4.7). Si el valor de  $\bar{D}$  aumenta la energía del pulso decrecerá más rápidamente conforme el pulso se propaga a lo largo del material atenuante y el eco recibido en el transductor tendrá valores de energía más cercanos al nivel del ruido de fondo. Si el eco recibido llega muy atenuado su valor de energía caerá por debajo del umbral de binarización. Para ilustrar gráficamente este punto se han representado la figura 4.8, que representa la forma del TFR binarizado de una señal simulada con valores de los parámetros  $\alpha_0$  y  $\alpha_{s0}$  fijos y  $\bar{D}$  variable. Concretamente la gráfica 4.8.a se corresponde con simulaciones para un valor de  $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$ ; la gráfica 4.8.b para  $\bar{D} = 0,7 \text{ mm}$ ; la gráfica 4.8.c para  $\bar{D} = 0,9 \text{ mm}$ ; la gráfica 4.8.d para  $\bar{D} = 1,1 \text{ mm}$ ; la gráfica 4.8.e para  $\bar{D} = 1,3 \text{ mm}$ , y finalmente la gráfica 4.8.f se corresponde con un valor de  $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$ . Podemos apreciar en estas gráficas que conforme aumenta el valor del parámetro  $\bar{D}$  la forma del TFR binarizado se va acortando, ya que los ecos llegarán más atenuados, llegando a ser imposible el calcular la frecuencia centroide por el método esquematizado en la figura 3.11.
  
- A priori, parece ser que el estimador  $\omega_c^{mod}$  es menos sensible al ruido y produce mejores estimas que el estimador  $\omega_c$ . Para corroborar esta información es necesario un estudio algo más detallado de ambos tipos de estimadores, por esta razón en la sección 4.5 de este capítulo se realiza un estudio del sesgo y varianza de este estimador para un rango más amplio de valores de ruido de observación.

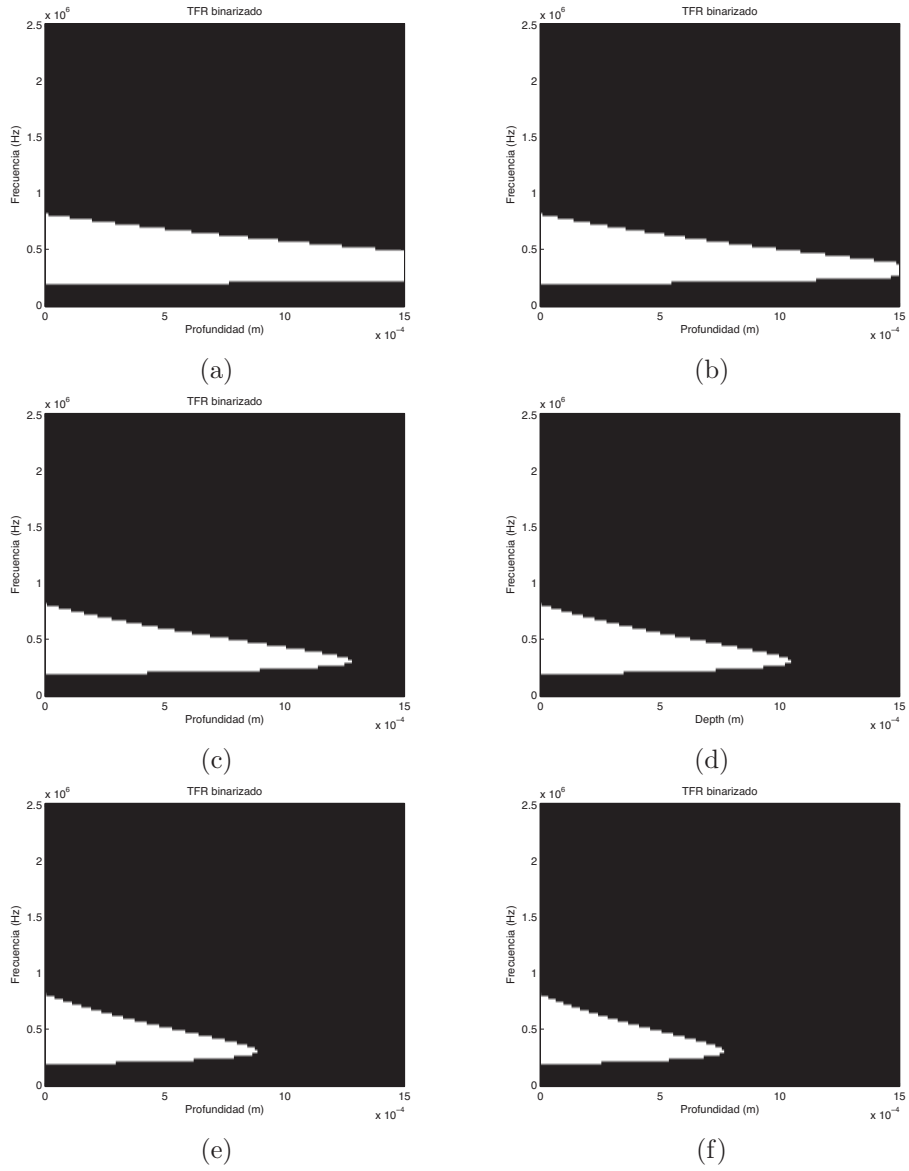


Figura 4.8: TFR binarizado con parámetros  $\alpha_0$  y  $\alpha_{s0}$  fijos y  $\bar{D}$  variable. (a)  $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$ ; (b)  $\bar{D} = 0,7 \text{ mm}$ ; (c)  $\bar{D} = 0,9 \text{ mm}$ ; (d)  $\bar{D} = 1,1 \text{ mm}$ ; (e)  $\bar{D} = 1,3 \text{ mm}$ ; (f)  $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$ .

#### 4.4. Simulación de materiales con tamaño de dispersor fijo y atenuación del fondo variable

De manera similar a como se presentan los resultados de la sección anterior, y acorde con lo expuesto en el apartado 4.1, en esta sección se muestra el resultado de aplicar el subconjunto de operadores convencionales y sus versiones modificadas a señales simuladas, pero en este caso procedentes de materiales dispersivos con fondo cambiante ( $\alpha_0$  variable) y estructura dispersiva homogénea, es decir todas las simulaciones fueron generadas para el mismo valor del parámetro  $\bar{D}$  y  $\alpha_{s0}$ . El objetivo es nuevamente, el de comparar los resultados de ambos tipos de estimadores con respecto a la respuesta teórica.

De esta manera manteniendo fijo el valor  $\bar{D}$  y el valor de  $\alpha_{s0}$  se han obtenido dos figuras correspondientes a dos valores diferentes de atenuación del material ( $\alpha_0$ ). De la misma manera que se realizó en la sección anterior, para cada par de estimadores estudiados ( $\omega_{max}$  versus  $\omega_{max}^{mod}$ ,  $BW_{\%}$  versus  $BW_{\%}^{mod}$  y  $\omega_c$  versus  $\omega_c^{mod}$ ) se han obtenido dos figuras; la primera correspondiente a un valor del parámetro  $\alpha_0 = 0.05 \text{ dB/cm}$  y la segunda figura correspondiente a un valor del parámetro  $\alpha_0 = 0.25 \text{ dB/cm}$ . Cada una de éstas figuras contiene a su vez tres gráficas que corresponden a la aplicación de los estimadores en diferentes condiciones de ruido de observación, concretamente para valores de AWGN de varianzas = {0, 0.25, y 0.50}, para la 1ª, 2ª y 3ª gráfica, respectivamente.

En cuanto al contenido de las figuras y los códigos de colores, éstos son similares a los usados en las figuras mostradas en la sección anterior. La respuesta teórica se ha representado con una línea azul, la respuesta del estimador convencional se ha representado en línea roja con marcador "\*", y los resultados del estimador modificado aparecen representados en línea verde con marcador "o".

Si nos centramos en las simulaciones realizadas con un valor de atenuación del fondo de  $\alpha_0 = 0,05 \text{ dB/m}$ , obtenemos la figura 4.9, correspondiente a la evolución de la frecuencia central para los tres valores de varianzas de ruido {0, 0.25 y 0.50}; la figura 4.11 correspondiente a la evolución del ancho de banda fraccional para los mismos valores de varianzas de ruido citados anteriormente y 4.13 la misma información pero en este caso se muestra la evolución de la frecuencia centroide.

Si nos centramos en las simulaciones realizadas con un valor de atenuación del fondo de  $\alpha_0 = 0,25 \text{ dB/m}$ , obtenemos las figuras 4.10, 4.12 y 4.14, equivalentes a las figuras 4.9, 4.11 y 4.13, respectivamente, pero para valores de atenuación de  $\alpha_0 = 0,25 \text{ dB/m}$  en vez de  $\alpha_0 = 0,05 \text{ dB/m}$ .

Los resultados que se deducen de estas gráficas son los que se muestran a continuación:

- Al igual que ocurría para los tipos de materiales simulados en la sección anterior, no es fácil cuantificar a simple vista si el estimador  $\omega_{max}^{mod}$  aporta mejoras con respecto al estimador  $\omega_{max}$  (ver figuras 4.9 y 4.10).
- Al aumentar la atenuación, el valor de la frecuencia central disminuye más

rápida con la profundidad, comparar figuras 4.9.a y 4.10.a (línea azul).

- Parece que el estimador  $BW_{\%}^{mod}$  mejora con respecto al estimador  $BW_{\%}$  (ver figuras 4.11 y 4.12) pero no se puede cuantificar la magnitud de la mejora en base a las figuras obtenidas.
- El estimador  $\omega_c$  es más sensible al ruido de observación y esta tendencia se agudiza al aumentar el valor de atenuación del medio (ver figuras 4.13 y 4.14).
- Al igual que se discutió en la sección anterior, para el caso de la evolución de la frecuencia centroide, si el medio es muy atenuante (en este caso debido al aumento del valor del parámetro  $\alpha_0$ ) el valor de la energía del pulso decrecerá con mayor rapidez y los ecos recibidos en el transductor llegarán atenuados por lo que serán eliminados antes, debido al proceso de binarización. Se puede apreciar que la longitud de la línea verde es menor (menor número de muestras donde proporcionar estima) en la figura 4.13 que en la figura 4.14. Para corroborar lo anterior, la figura 4.15 muestra la forma de varios TFRs binarizados. Las simulaciones se generaron para modelar materiales con valores de  $\alpha_{s0}$  y  $\bar{D}$  fijos, variando el valor del parámetro  $\alpha_0$ . Concretamente la gráfica 4.15.a se corresponde con un valor de atenuación  $\alpha_0 = 0,5e - 10$ ; la gráfica 4.15.(b) para  $\alpha_0 = 0,75e - 10$ ; la gráfica 4.15.(c) corresponde a un valor de  $\alpha_0 = 1,25e - 10$ ; la gráfica 4.15.(d) corresponde con  $\alpha_0 = 1,5e - 10$ ; y la gráfica 4.15.(e) y 4.15.f corresponden con los valores  $\alpha_0 = 1,75e - 10$  y  $\alpha_0 = 2e - 10$ , respectivamente.
- Un aspecto a resaltar es que el resultado de aplicar ambos tipos de estimadores a los materiales simulados en esta sección presenta un patrón de comportamiento similar a los resultados ya comentados para los tipos de materiales presentados en la sección anterior. Es decir, el aumento de la atenuación afecta al TFR de manera similar al aumento del tamaño medio de dispersor, o viceversa, puesto que los estimadores se comportan de manera parecida. Este resultado es acorde, con la forma de los diagramas mostrados en la figura 2.3 y 2.4 y además concuerda con lo esperado en base a las ecuaciones (2.13), (2.14) y (2.15).

## 4.5. Error y varianza de estimadores convencionales versus modificados

El propósito de esta sección es el de comparar la robustez frente al ruido de observación del conjunto de estimadores convencionales y modificados que fueron formulados y descritos en el capítulo 3. Los resultados se presentan en gráficas que representan el sesgo y la varianza para cada estimador. Se trata de observar el comportamiento y evolución con la profundidad de ambos estimadores conforme aumenta la cantidad de ruido de observación (AWGN).

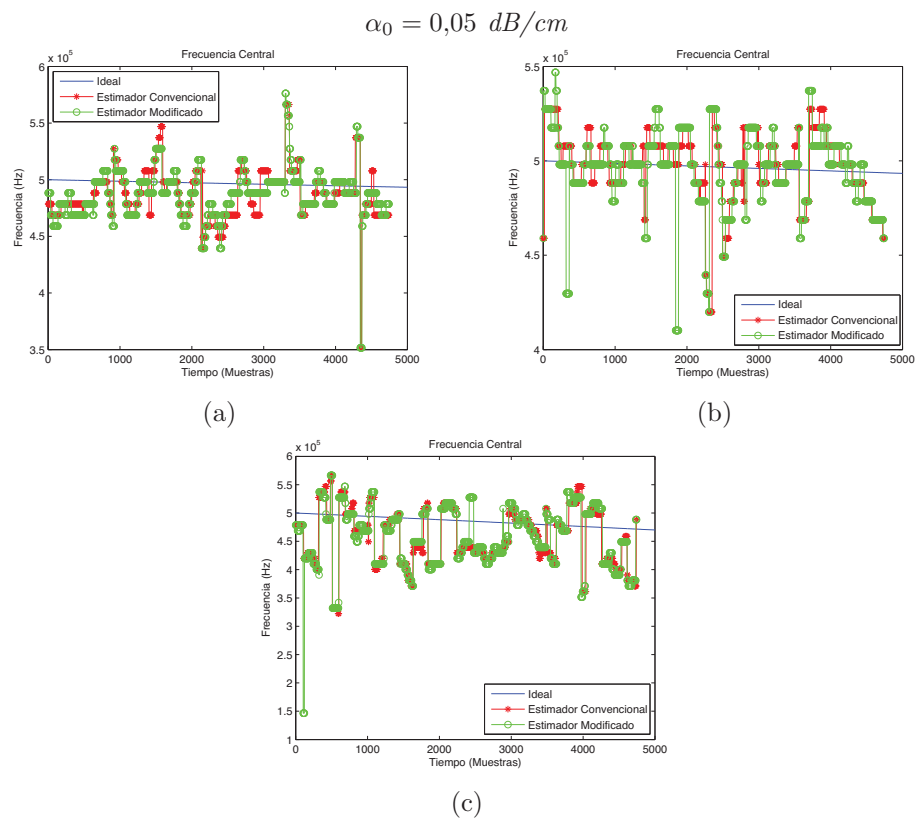


Figura 4.9: Evolución de la frecuencia central: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron:  $\alpha_0 = 0,05 \text{ dB/cm}$  y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c).

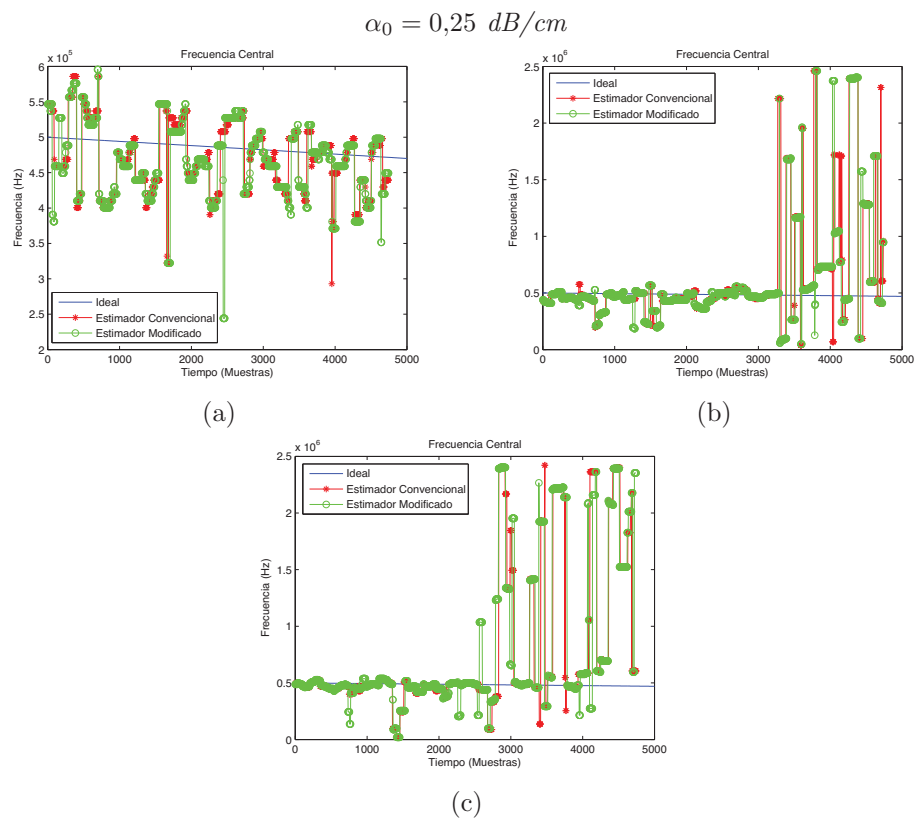


Figura 4.10: Evolución de la frecuencia central: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron:  $\alpha_0 = 0,25 \text{ dB/cm}$  y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c).

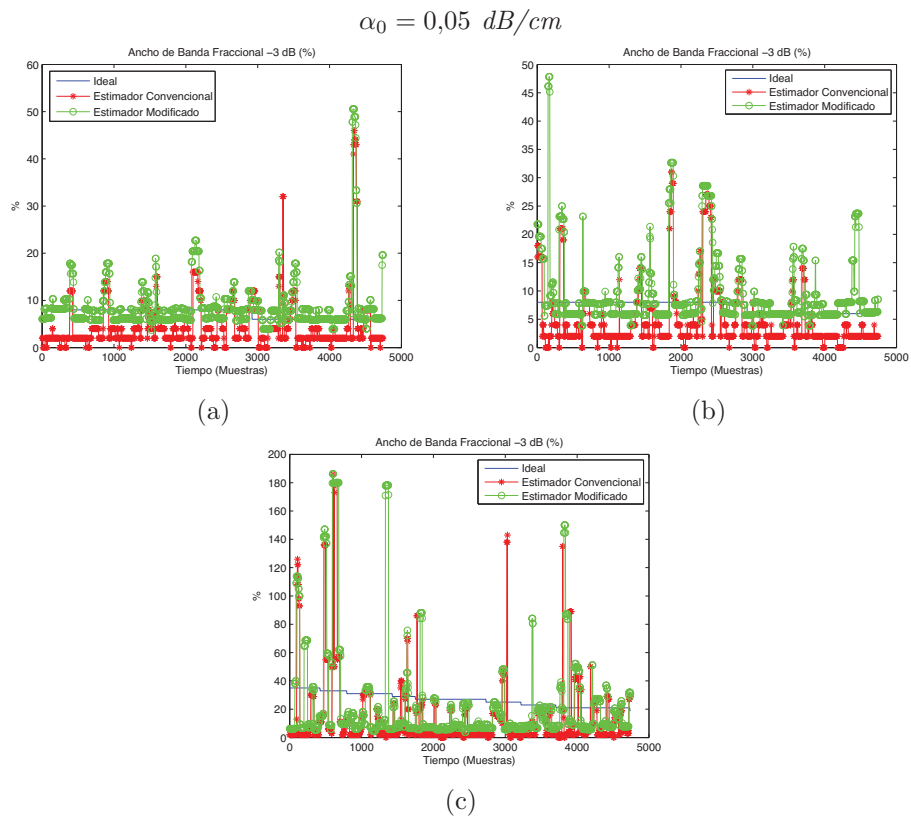


Figura 4.11: Evolución del ancho de banda fraccional: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron:  $\alpha_0 = 0,05 \text{ dB/cm}$  y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c).



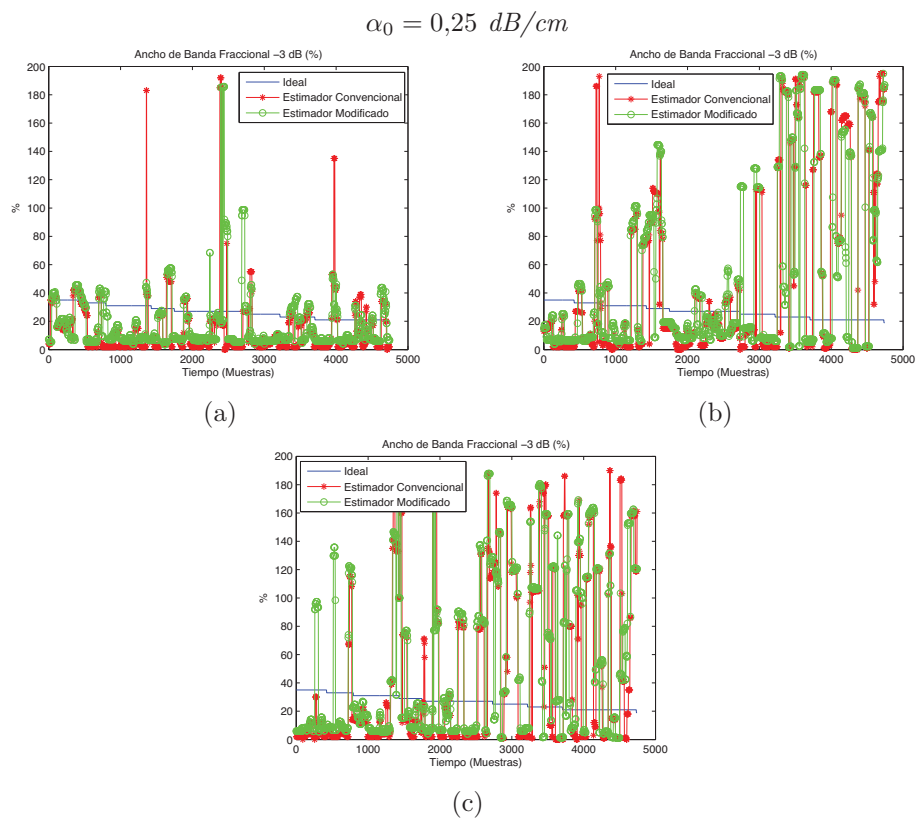


Figura 4.12: Evolución del ancho de banda fraccional: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron:  $\alpha_0 = 0,25 \text{ dB/cm}$  y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c).

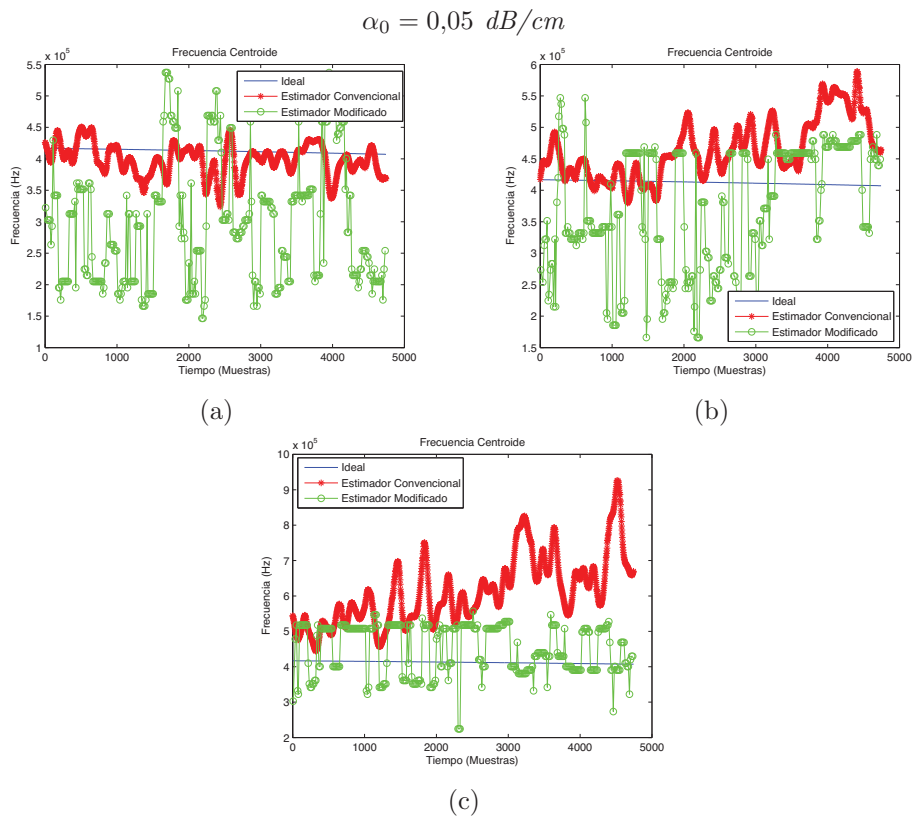


Figura 4.13: Evolución de la frecuencia centroide: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron:  $\alpha_0 = 0,05 \text{ dB/cm}$  y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c).

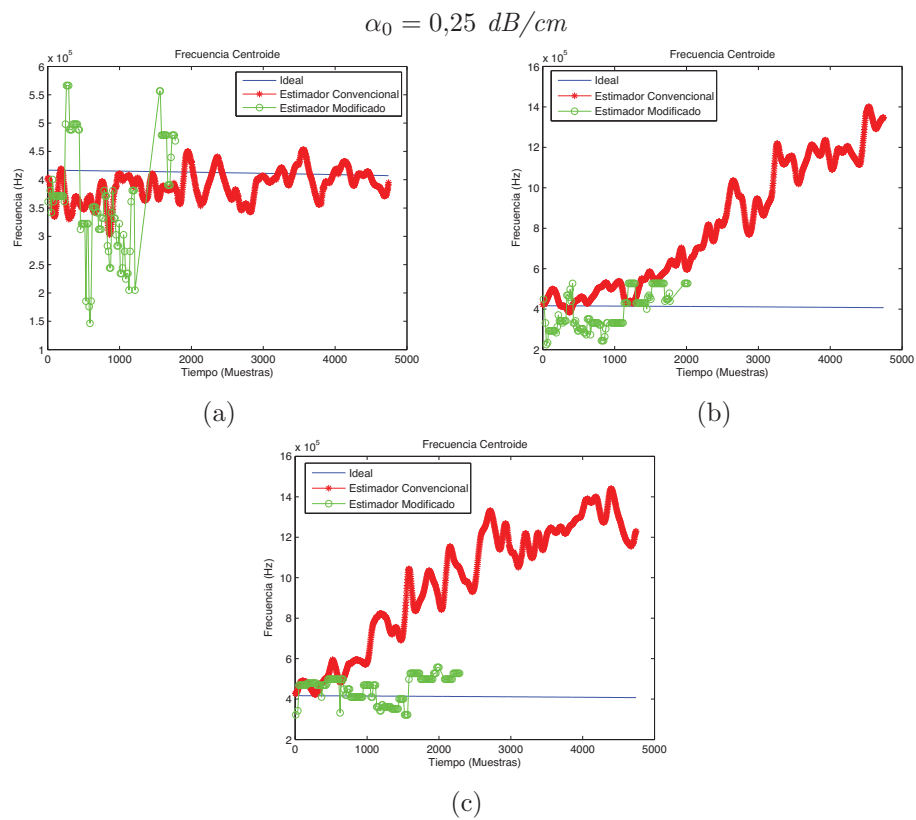


Figura 4.14: Evolución de la frecuencia centroide: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron:  $\alpha_0 = 0,25 \text{ dB/cm}$  y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c).

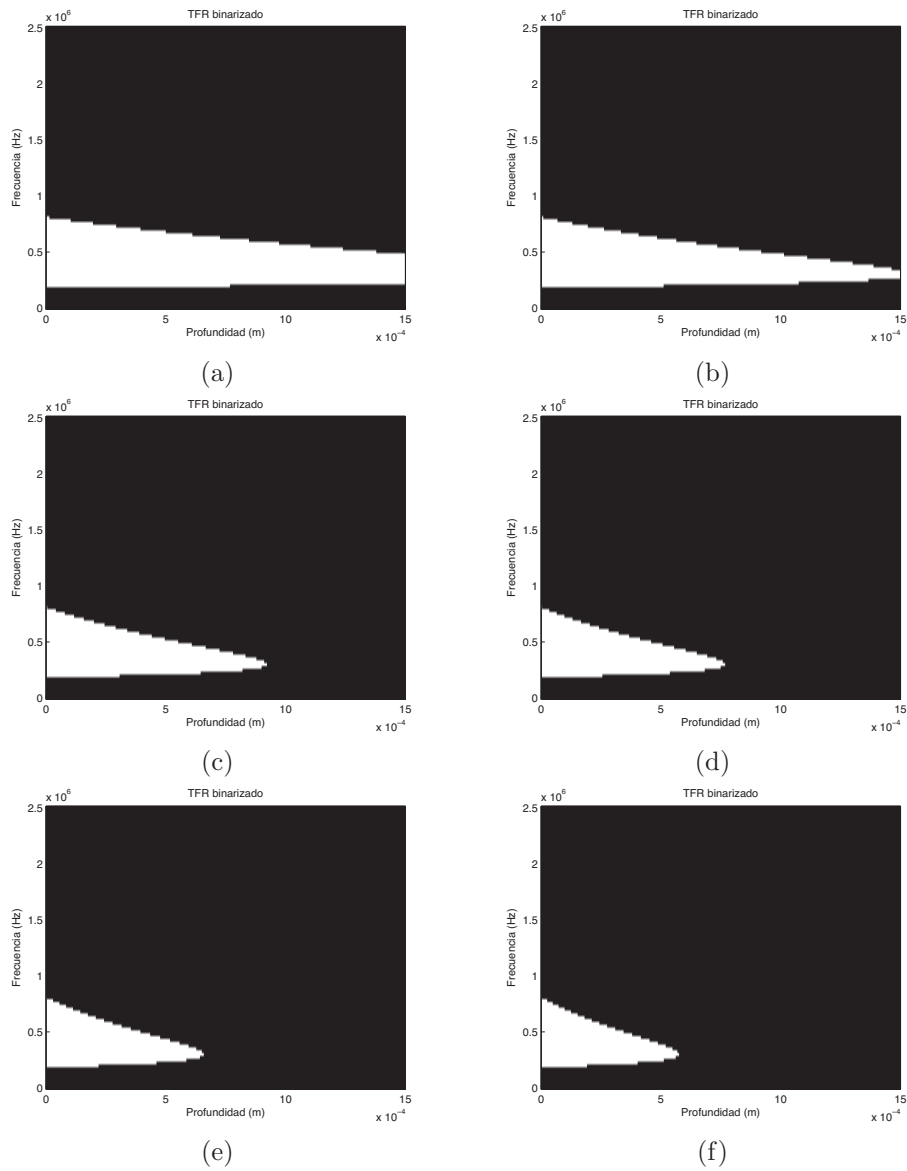


Figura 4.15: *TFR binarizado con parámetros  $\alpha_{s0}$  y  $\bar{D}$  fijos,  $\alpha_0$  variable. (a)  $\alpha_0 = 0,5e - 10$ ; (b)  $\alpha_0 = 0,75e - 10$ ; (c)  $\alpha_0 = 1,25e - 10$ ; (d)  $\alpha_0 = 1,5e - 10$ ; (e)  $\alpha_0 = 1,75e - 10$ ; (f)  $\alpha_0 = 2e - 10$ .*

Siguiendo la línea de las dos secciones anteriores, en esta sección se muestran los resultados de aplicación de los estimadores para dos tipos de materiales: por un lado la aplicación a materiales con estructura dispersiva variable y fondo homogéneo y por otro lado se muestran los resultados de aplicación de los estimadores para materiales con estructura dispersiva homogénea y fondo variable.

Centrándonos en el caso de materiales con fondo homogéneo y estructura dispersiva variable, se ha representado la figura 4.16 que fue generada mediante simulación usando como parámetros:  $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$  y varianza del ruido AWGN variando entre 0,05 y 0,5. La figura muestra la varianza (barras verdes) y el sesgo (marcador “o”) de los estimadores modificados:  $\omega_{max}^{mod}$  (gráfica (a)),  $BW_{\%}^{mod}$  (gráfica (b)) y  $\omega_c^{mod}$  (gráfica (c)). En las mismas gráficas, según corresponda y de manera superpuesta, se representan la varianza (barras rojas) y el sesgo (marcador “\*”) de los mismos estimadores aplicados de manera convencional.

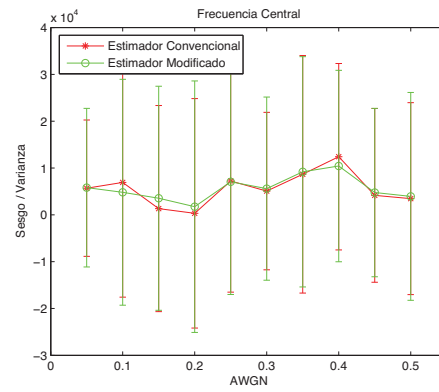
La figura 4.17 fue generada mediante simulación usando como parámetros:  $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$  y varianza del ruido AWGN variando entre 0,05 y 0,5. Esta figura representa la misma información que la figura 4.16 pero en este caso cambiando  $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$  por  $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$ .

Por otro lado, para ilustrar el caso de materiales con estructura dispersiva homogénea y fondo variable, la figura 4.18 fue generada mediante simulación usando como parámetros:  $\alpha_0 = 0,05 \text{ dB/cm}$  y varianza del ruido AWGN variando entre 0,05 y 0,5. Al igual que para el caso anterior, la figura muestra la varianza (barras verdes) y el sesgo (marcador “o”) de los estimadores modificados:  $\omega_{max}^{mod}$ ,  $BW_{\%}^{mod}$  y  $\omega_c^{mod}$  en las gráficas (a), (b) y (c) respectivamente. En la misma gráfica, de manera superpuesta, se representan la varianza (barras rojas) y el sesgo (marcador “\*”) de los estimadores convencionales:  $\omega_{max}$ ,  $\omega_c$  y  $BW_{\%}$ .

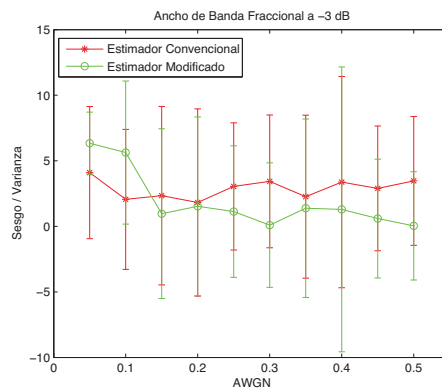
En esta misma línea, la figura 4.19 fue generada mediante simulación usando como parámetros:  $\alpha_0 = 0,25 \text{ dB/cm}$  y varianza del ruido AWGN variando entre 0,05 y 0,5. Esta figura representa la misma información que la figura 4.18 pero en este caso cambiando  $\alpha_0 = 0,05 \text{ dB/cm}$  por  $\alpha_0 = 0,25 \text{ dB/cm}$ .

De la observación de los pares de figuras 4.16 y 4.17 así como de los pares 4.18 y 4.19 se puede llegar a las siguientes conclusiones:

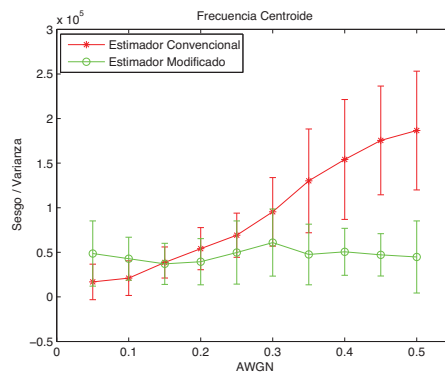
- Ambos métodos (estimadores convencionales versus estimadores modificados) son prácticamente equivalentes en cuanto a sesgo y varianza a la hora de calcular la *frecuencia central*. No obstante, sí que se puede intuir una ligera disminución de la varianza del estimador modificador (barras verticales verdes) con respecto al convencional (barras verticales rojas). Este resultado puede hacerse válido para los dos tipos de materiales simulados en este capítulo.
- Las estimas proporcionadas por los estimadores modificados mejoran con respecto a las de los convencionales en los caso en que se analiza el diagrama tiempo-frecuencia binarizado (estimadores  $\omega_c^{mod}$  y  $BW_{\%}^{mod}$ ).
- Si se compara el estimador  $BW_{\%}$  con el estimador de  $BW_{\%}^{mod}$ , aunque la



(a)

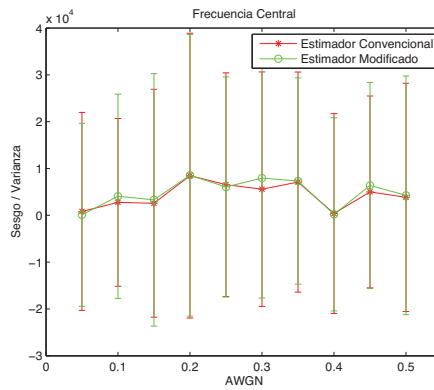


(b)

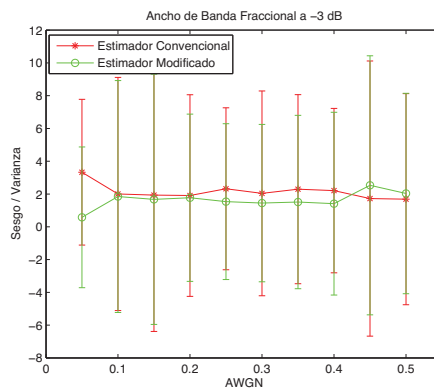


(c)

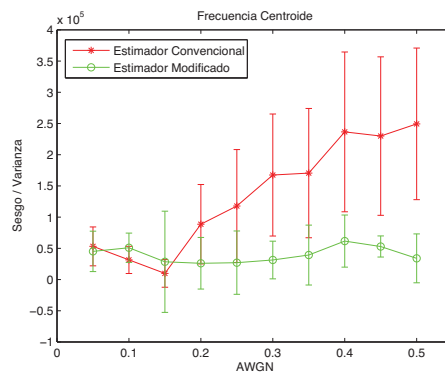
Figura 4.16: Varianza y sesgo de los operadores: (a) frecuencia central; (b) ancho de banda fraccional a  $-3$  dB; (c) frecuencia centroide. Los parámetros de simulación para el LTV fueron:  $\bar{D} = 0,5$  mm y AWGN con varianza variando de 0,05 a 0,5. Sesgo (marcador 'x' ó 'o') y varianza (barras verticales).



(a)

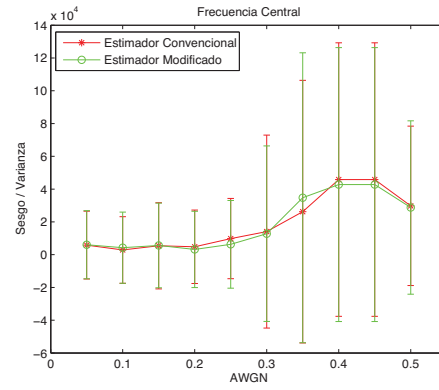


(b)

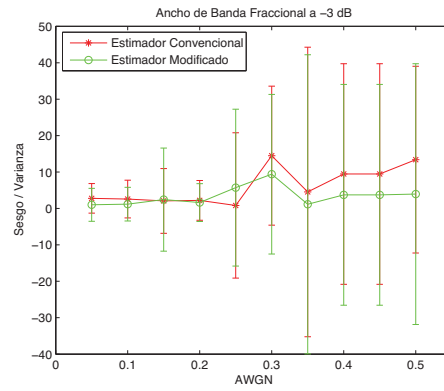


(c)

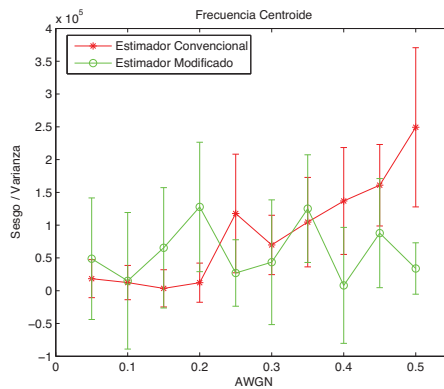
Figura 4.17: Varianza y sesgo de los operadores: (a) frecuencia central; (b) ancho de banda fraccional a  $-3$  dB; (c) frecuencia centroide. Los parámetros de simulación para el LTV fueron:  $\bar{D} = 1,5$  mm y AWGN con varianza variando de 0,05 a 0,5. Sesgo (marcador '\*' o 'o') y varianza (barras verticales).



(a)



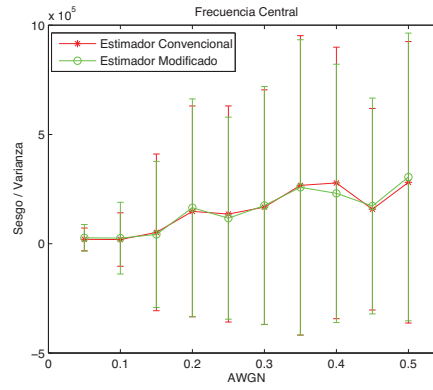
(b)



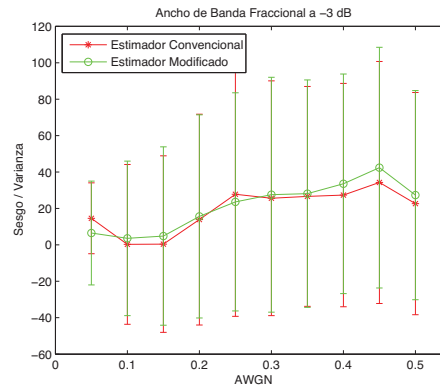
(c)

Figura 4.18: Varianza y sesgo de los operadores: (a) frecuencia central; (b) ancho de banda fraccional a -3 dB; (c) frecuencia centroide. Los parámetros de simulación para el LTV fueron:  $\alpha_0 = 0,05$  dB/cm y AWGN con varianza variando de 0,05 a 0,5. Sesgo (marcador '\*' o 'o') y varianza (barras verticales).

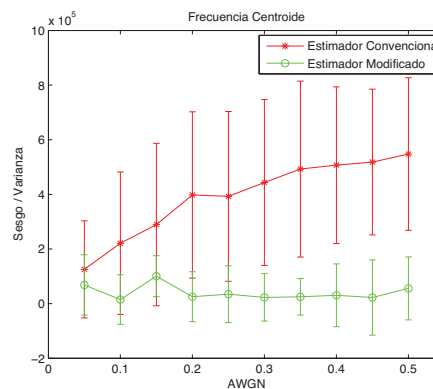




(a)



(b)



(c)

Figura 4.19: Varianza y sesgo de los operadores: (a) frecuencia central; (b) ancho de banda fraccional a  $-3$  dB; (c) frecuencia centroide. Los parámetros de simulación para el LTV fueron:  $\alpha_0 = 0,25$  dB/cm y AWGN con varianza variando de 0,05 a 0,5. Sesgo (marcador '\*' o 'o') y varianza (barras verticales).

diferencia en términos de sesgo no es muy elevada, se puede afirmar que en la mayoría de los casos el estimador  $BW_{\%}^{mod}$  proporciona mejores estimas (menos sesgo) que el equivalente convencional. No obstante, en los casos en que el material es muy atenuante, alto valor de  $\alpha_0$  o  $\bar{D}$ , (ver gráficas 4.17.b ó 4.19.b), el estimador  $BW_{\%}^{mod}$  aumenta su sesgo con respecto a  $BW_{\%}$ , para condiciones de mayor ruido. En cuanto a la varianza de ambos estimadores no se aprecian grandes diferencias. Por lo anteriormente comentado, no se puede asegurar una mejora del estimador  $BW_{\%}^{mod}$  con respecto a  $BW_{\%}$  que sea generalizable a todos los tipos de materiales simulados en este capítulo. En cualquier caso se ha podido saber exactamente los casos en que mejora puesto que estamos usando un modelo controlado cuyos parámetros conocemos, pero a la hora de evaluar un conjunto de materiales a priori desconocidos no podemos asegurar que el estimador modificado nos vaya a proporcionar estimas más acertadas.

- Si se comparan las estimas proporcionadas por los estimadores  $\omega_c$  y  $\omega_c^{mod}$ , se puede observar que se obtienen menores valores de varianza (menor longitud de barras verticales verdes) y menor sesgo (marcador “o” verde por debajo del marcador “\*” rojo), cuando es aplicado el estimador  $\omega_c^{mod}$ . Además, el estimador  $\omega_c^{mod}$  mantiene una buena estima incluso al aumentar la varianza del ruido (entiéndase dentro de unos límites). Este resultado puede hacerse válido para los dos tipos de materiales simulados en este capítulo. Por otro lado enfatizar que las ventajas de aplicación del estimador  $\omega_c^{mod}$  se acentúan para el caso de materiales más atenuantes (ver gráficas 4.17.c ó 4.19.c), ya que en estos casos el sesgo y varianza del estimador  $\omega_c$  es mayor que en el caso de aplicación a materiales menos atenuantes. Para clarificar este punto se puede consultar la gráficas 4.16.c y compararla con la gráfica 4.17.c y observar que en esta última el sesgo del estimador  $\omega_c$  alcanza valores mayores conforme aumenta el ruido de observación; las mismas conclusiones se pueden obtener de la comparación de las gráficas 4.18.c y 4.19.c.

## 4.6. Conclusiones

Se ha presentado en este capítulo un simulador que se programó con la intención de comparar aquellos estimadores convencionales que componían la tradicional firma ultrasónica con versiones modificadas de éstos. La intención de éste capítulo era la de decidir de los seis estimadores presentados, tres estimadores convencionales y sus correspondientes tres estimadores modificados, cuáles eran mejores candidatos a formar parte de la ya mencionada firma ultrasónica.

En cuanto a la frecuencia central se ha demostrado que el estimador  $\omega_{max}^{mod}$  proporciona resultados similares a los proporcionados por el estimador  $\omega_{max}$ , por lo tanto habrá que contrastar en la práctica y en base a señales reales la ventaja de usar uno u otro estimador. En los capítulos 5 y 6 se realizará una discusión de la utilidad de la aplicación de este estimador (en su versión convencional y modificada) mediante su aplicación a materiales de diferente naturaleza.

Con respecto al estudio del ancho de banda fraccional, los resultados obtenidos son similares para los dos tipos de materiales presentados: fondo fijo y estructura dispersiva variable o fondo variable y estructura dispersiva fija. Se concluye además que no se puede asegurar una mejora del estimador  $BW_{\%}^{mod}$  aunque en muchos casos sí que se mejoran los resultados del estimador  $BW_{\%}$ . Con respecto a la varianza no podemos proclamar una mejora generalizada del estimador modificado. Por estas razones, al igual que en el caso anterior, habrá que contrastar su utilidad en base a la aplicación del estimador a señales reales y estudiar su comportamiento en la caracterización de un tipo u otro de materiales.

Con respecto al estudio de la frecuencia centroide, la modificación del estimador sí que supone una clara alternativa al estimador convencional, puesto que produce estimas con menor error y varianza para todos los casos que se han probado. Además esta mejora se produce en los dos tipos de materiales ensayados y los resultados son prometedores incluso en condiciones donde hay mayor ruido de observación. Por esta razón podemos apuntar al estimador  $\omega_c^{mod}$  como un buen candidato a formar parte de la firma ultrasónica para la caracterización de materiales dispersivos blandos. No obstante, estos resultados serán igualmente contrastados en los capítulos 5 y 6 mediante la aplicación del estimador para la caracterización de señales reales. Dichas señales reales procederán de materiales generados en un entorno de laboratorio y afines a los dos tipos de materiales simulados en este capítulo.



## Capítulo 5

# Aplicación a materiales dispersivos blandos con tamaño de dispersor variable y atenuación del fondo fija

### 5.1. Presentación

En este capítulo se presenta el resultado de aplicar la colección de parámetros descritos en el capítulo 3 a un conjunto de probetas generadas en el laboratorio. Estas probetas constituyen matrices homogéneas de un material blando y atenuante en las que se ha ido introduciendo diferentes elementos emuladores de dispersores esféricos de diámetro  $\overline{D}$ . Se ha ido variando el tamaño de los dispersores de las probetas de cara a obtener, para su posterior estudio, materiales dispersivos blandos con fondo homogéneo y  $\overline{D}$  variable.

Se describe en la primera sección el proceso seguido para la preparación de las piezas así como el equipamiento de medida y la disposición de los elementos para realizar las medidas.

En la segunda sección se detallan los resultados de aplicar el conjunto de estimadores a los citados materiales de test y la discusión de éstos.

En la última sección se muestran las conclusiones de aplicación del método presentado en esta tesis al conjunto de materiales evaluados.

## 5.2. Equipamiento de medida, preparación y medición de probetas

Mediante la inserción de dispersores, de tamaño variable, en matrices homogéneas de agar-agar se generó una batería de cuerpos blandos dispersivos acorde con el modelo teórico presentado en el capítulo 2 (ver ecuaciones (2.13), (2.14) y (2.15)).

En este capítulo se muestra el resultado de llevar a cabo medidas reales sobre un conjunto compuesto por ocho probetas de test. Las piezas de test se generaron en un entorno de laboratorio y todas ellas se componen de una matriz uniforme de agar-agar generada en las mismas condiciones y conteniendo dispersores de diferentes tamaños. Todas las piezas fueron generadas con la misma relación agua/agar y conteniendo la misma concentración de dispersores. A lo largo del capítulo se mostrará cómo los parámetros presentados en el capítulo 3 nos permiten distinguir entre los diferentes materiales dispersivos fabricados, en función del valor del parámetro  $\bar{D}$ .

El proceso para la creación de las citadas piezas de test fue algo largo y tedioso. Tras realizar un estudio de los materiales y compuestos disponibles en el mercado para poder fabricar una matriz homogénea atenuante, a la que después fuera posible añadir pequeños dispersores, se decidió usar una pequeña concentración de agar-agar en agua destilada pues nos permitía insertar de manera uniforme los dispersores. El agar-agar es un polisacárido que se extrae de un alga el cual se presenta en forma de polvo y se usa como gelificante. Al agua destilada se le añadió una pequeña concentración del sal puesto que ésta permitía que la señal se atenuara ligeramente conforme viaja a lo largo del material [54], simulando así la atenuación por absorción.

En cuanto al proceso de búsqueda del tipo de material adecuado para simular los dispersores se realizaron y probaron piezas usando gran cantidad de diferentes materiales, unos tenían mucho peso y se precipitaban rápidamente al fondo de la muestra, otros menos pesados tenían agujeros en el centro y no se terminaban de ajustar al modelo teórico. Finalmente tras varios meses de pruebas se decidió usar tamices moleculares (*molecular sieves*) que son materiales inorgánicos microporosos que se usan en el campo de la química para filtrar a nivel molecular o bien como desecantes. Estos materiales tienen bajo peso por lo que permitían ser insertados en la matriz de agar-agar sin riesgo de que precipitaran al fondo y además pueden presentar, entre otras opciones, una forma esférica de forma que la energía reflejada por el dispersor es proporcional a la que incide en él (se comportan de manera isotrópica), simplificando el modelo. Si el dispersor no es esférico influirán otros factores como por ejemplo su orientación (comportándose como dispersores de energía direccionales), para una discusión más completa de este punto se recomienda revisar la tesis doctoral [7].

De esta forma se generó una colección de matrices homogéneas compuestas por agua destilada con pequeñas concentraciones de sal y agar-agar y antes de la gelificación de dichas matrices se introdujeron uniformemente el conjunto de

*molecular sieves*, simulando pequeños dispersores.

Un resumen de la composición detallada de cada una de las piezas puede verse en la tabla 5.1. En la citada tabla se puede apreciar cómo, de cara a verificar la repetibilidad del proceso, se han generado dos piezas para cada tamaño de dispersor, obteniendo así una batería duplicada de cuatro materiales dispersivos blandos con un valor de diámetro medio de dispersor ( $\bar{D}$ ) variando entre 0,5 y 1,8 *mm*.

| Pieza test | Concentración agar-agar                                  | N <sup>o</sup> dispersores   | $\bar{D}$     |
|------------|--|------------------------------|---------------|
| 1 y 2      | 2% en agua destilada<br>(con concentración de sal al 2%) | 1000 <i>molecular sieves</i> | 0.5 <i>mm</i> |
| 3 y 4      | 2% en agua destilada<br>(con concentración de sal al 2%) | 1000 <i>molecular sieves</i> | 0.7 <i>mm</i> |
| 5 y 6      | 2% en agua destilada<br>(con concentración de sal al 2%) | 1000 <i>molecular sieves</i> | 1.3 <i>mm</i> |
| 7 y 8      | 2% en agua destilada<br>(con concentración de sal al 2%) | 1000 <i>molecular sieves</i> | 1.8 <i>mm</i> |

Tabla 5.1: Resumen de composición de las piezas de test.

Como paso previo a la descripción del proceso completo para la creación de las piezas de test es importante hacer un pequeño paréntesis para establecer ciertas consideraciones acerca del tamaño medio de los dispersores seleccionados.

En el siguiente punto se discute el por qué de la elección de los citados valores del parámetro  $\bar{D}$ .

En los apartados sucesivos se describirá también el proceso para la creación de las piezas así como el equipamiento y proceso de medida. Se detallan además todos los aspectos que puedan quedar dudosos para la completa comprensión de los datos mostrados en la tabla 5.1.

### 5.2.1. Selección del diámetro medio de dispersor adecuado

A la vista de los resultados mostrados en la tabla 5.1, se observa que el tamaño de los dispersores (*molecular sieves*) que han sido utilizados para la fabricación de las probetas, oscila entre  $0,5 < \bar{D} < 1,8$  *mm*. La elección de estos valores no se ha llevado a cabo de manera arbitraria, sino que fue estudiada para ser acorde con el modelo de señal propuesto en el capítulo 2.

Recordemos, que en el desarrollo matemático realizado en el capítulo 2 se han definido las ecuaciones que modelan en frecuencia el efecto de la atenuación de la onda ultrasónica debido a dos contribuciones principalmente: atenuación por absorción y atenuación debida a la dispersión estocástica. La atenuación por absorción es debida a las características del material y proporcional a  $\omega^2$ , [22]. Por otro lado, la atenuación debida a la dispersión estocástica depende, además de la frecuencia y de  $\alpha_{S0}$ , del tamaño medio del dispersor. De hecho, para asegurar que estamos trabajando en la zona de dispersión estocástica se deben de cumplir

una serie de consideraciones en la relación  $\frac{\overline{D}}{\lambda}$ , para una completa discusión de este punto ver tesis doctoral [7] (Anexo A).

En la citada tesis, [7], se demuestra que la atenuación de una onda longitudinal debida al fenómeno de dispersión tiene diferente comportamiento en función de la relación  $\frac{\overline{D}}{\lambda}$ , en concreto la tabla 5.2 resume las distintas regiones existentes en función de la relación citada anteriormente: donde  $\lambda$  es la longitud de onda y se define como la distancia física que separa dos máximos consecutivos de una onda ultrasónica pura y se define como  $\lambda = \frac{c}{f_0}$ , donde  $f_0$  es la inversa del tiempo que tardan en producirse los dos máximos consecutivos y  $c$  es la velocidad de propagación de la onda para una condición dada. La velocidad de propagación depende del material, para no complicar el modelo hemos supuesto que se mantiene constante al variar la frecuencia.

| Región de Dispersión | Relación   |
|----------------------|--|
| Rayleigh             | $\lambda \gg \overline{D} \left(0 \leq \frac{\overline{D}}{\lambda} < 0,3\right)$        |
| Estocástica          | $\lambda \approx \overline{D} \left(0,3 \leq \frac{\overline{D}}{\lambda} \leq 3\right)$ |
| Difusa               | $\lambda \ll \overline{D} \left(\frac{\overline{D}}{\lambda} > 3\right)$                 |

Tabla 5.2: Diferentes regiones de dispersión según la relación  $\frac{\overline{D}}{\lambda}$ .

Dados los resultados de la tabla 5.2 sólo nos queda comprobar en qué región de dispersión nos situamos al trabajar con dispersores de tamaños entre 0,5 y 1,8 mm. Para tal fin hemos de calcular el valor del parámetro  $\lambda$ , teniendo en cuenta que la frecuencia  $f_0$  es conocida y corresponde a la frecuencia del transductor que se ha usado para medir las probetas de este capítulo,  $f_0 = 1 \text{ MHz}$ , sólo nos falta determinar la velocidad de propagación de una onda ultrasónica al atravesar una matriz de agar-agar con las concentraciones de agar-agar y sal citadas en la tabla 5.1. Para tal fin se construyó una probeta sin dispersores con una proporción de 2% de agar-agar y 2% de sal, y se realizó una inspección ultrasónica en modo pulso-eco, obteniendo la señal representada en la figura 5.1.

Si analizamos la figura 5.1 es fácil distinguir el pulso inicial y el eco producido al llegar la señal al fondo de la probeta. Por lo tanto, si tenemos en cuenta que la señal recorre el doble de espacio ( $2 \cdot z_1$ ) puesto que viaja a lo largo de la probeta y vuelve al rebotar al encontrarse con el fondo de ésta (modo pulso-eco), es sencillo, una vez calculado el tiempo entre uno y otro pulso ( $t$ ), calcular la velocidad de propagación de la onda ultrasónica a través de este medio y que es de  $v_p = 1698 \text{ m/s}$ . En la citada figura también se muestran los cálculos que se han realizado para llegar a este resultado. Básicamente se ha tenido en cuenta el tamaño de la probeta que era de 6,5 cm y una vez calculado el tiempo de vuelo de la señal al atravesar dos veces la probeta se puede calcular la velocidad de propagación de la onda ultrasónica a través de esta.

Una vez conocemos exactamente el valor de  $f_0$  y  $v_p$ , tenemos un valor de  $\lambda = \frac{v_p}{f_0} = \frac{1698}{10^6} = 1,7 \text{ mm}$  y conocido el diámetro mínimo y máximo de los dispersores con los que vamos a trabajar, es sencillo obtener las siguiente relaciones para  $\frac{\overline{D}}{\lambda}$ :



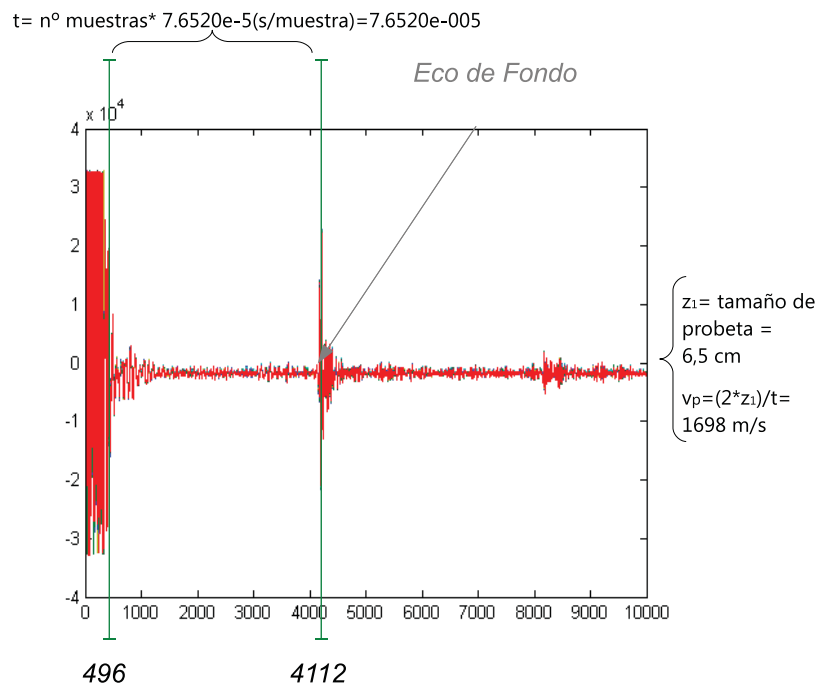


Figura 5.1: A-scan obtenido mediante la inspección ultrasónica de una probeta de agar-agar y proceso para el cálculo de la velocidad de propagación de la onda ultrasónica al viajar a lo largo de ésta.

Relación  $\frac{\bar{D}}{\lambda}$  para  $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$

$$\frac{\bar{D}}{\lambda} = \frac{0,5 * 10^{-3}}{1,7 * 10^{-3}} = 0,29 \quad (5.1)$$

Relación  $\frac{\bar{D}}{\lambda}$  para  $\bar{D} = 1,8 \text{ mm}$

$$\frac{\bar{D}}{\lambda} = \frac{1,8 * 10^{-3}}{1,7 * 10^{-3}} = 1,05 \quad (5.2)$$

A partir de las ecuaciones (5.1) y (5.2) y según lo expuesto en la tabla 5.2 podemos concluir que el rango de diámetros elegidos para los dispersores nos aseguran que estamos trabajando en la zona de dispersión estocástica.

### 5.2.2. Proceso detallado para la preparación de las probetas

Una vez realizada la discusión acerca del rango de tamaños de dispersores válidos acorde con el modelo, se detalla e ilustra el proceso de creación de las citadas piezas de test sobre las que se ha llevado a cabo la campaña de medidas.

1. **Preparación de la cantidad exacta de agua destilada.** En primer lugar se introduce el agua destilada en una probeta de medida para poder conseguir las concentraciones citadas en la tabla 5.1 (ver figura 5.2).
2. **Selección de la cantidad exacta de agar-agar.** En segundo lugar, usando una balanza de precisión se prepara la cantidad de agar-agar necesario para poder conseguir la concentración adecuada (ver figura 5.3).
3. **Preparación del material emulador de dispersores.** En este punto se describe el proceso para la preparación de los dispersores que serán posteriormente insertados en la matriz de agar-agar. Tras realizar una búsqueda en el mercado de elementos que pudieran servirnos para emular los dispersores se decidió usar *molecular sieves* de la casa Sigma-Aldrich. Los *molecular sieves* seleccionados son pequeñas piezas con tamaño circular que por su bajo peso permiten ser insertadas en la matriz de agar-agar, previamente a su solidificación, sin riesgo de que precipiten al fondo de la muestra. Tras buscar varios proveedores, sólo nos servían envases de *molecular sieves* con tamaños comprendidos entre 0,4-0,8 mm y entre 1-2 mm. La figura 5.4 muestra la

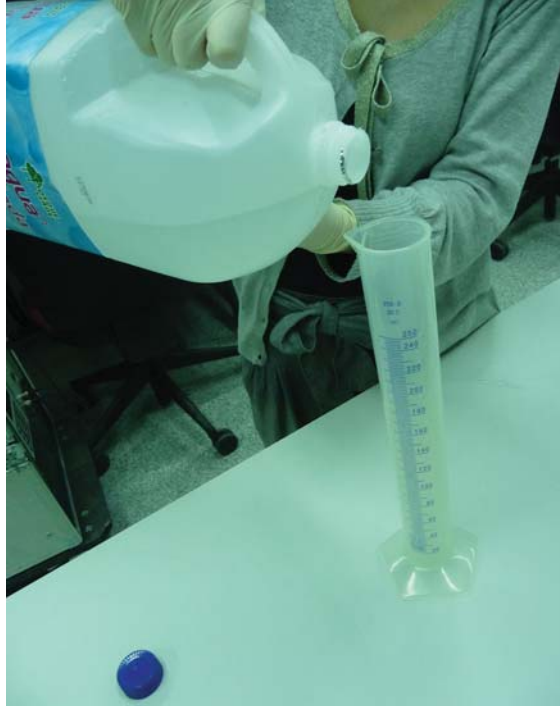


Figura 5.2: Preparando las piezas de test: midiendo la cantidad de agua destilada.

forma en que se sirven los *molecular sieves*, imágenes 5.4.a y 5.4.c, así como un detalle de la forma y tamaño de éstos, imágenes 5.4.b y 5.4.d. Vista la falta de alternativas, se decidió adquirir éstos pero en este caso sólo teníamos posibilidad de realizar probetas emuladores de dos tipos de materiales: matrices de agar-agar con dispersores de diámetro medio pequeño (entre 0,4-0,8 mm) o grande (1-2 mm). Con el fin de aplicar la cantidad de categorías de materiales a caracterizar era necesario dar un paso más allá.

4. **Proceso de tamizado de los dispersores.** Los *molecular sieves* fueron separados en cuatro categorías usando tamices de laboratorio (ver figuras 5.5.a y 5.5.b). Concretamente, se usó un tamiz con diámetro de apertura de 0,6 mm (ver figura 5.5.c) para separar la primera clase de *molecular sieves* (diámetros comprendidos entre 0.4-0.8 mm) obteniendo así dos clases de dispersores con  $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$  y  $\bar{D} = 0,7 \text{ mm}$ . Por otro lado, se usó un tamiz de diámetro 1,6 mm (ver figura 5.5.d) para separar la segunda clase de *molecular sieves* (diámetros comprendidos entre 1-2 mm), obteniendo así dos clases de dispersores con  $\bar{D} = 1,3 \text{ mm}$  y  $\bar{D} = 1,8 \text{ mm}$ .
5. **Construcción de las probetas.** Finalmente se añade al agua destilada la

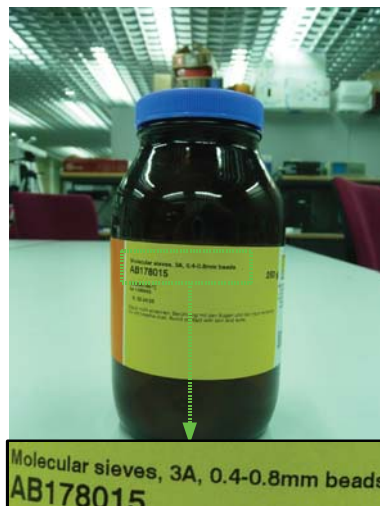


(a)



(b)

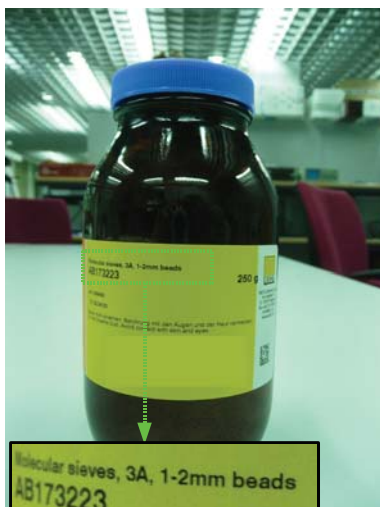
Figura 5.3: Preparando las piezas de test: agar-agar. (a) Bote de agar-agar; (b) Midiendo la concentración adecuada.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.4: Uso de molecular sieves para emular dispersores: (a) Bote de molecular sieves 0,4-0,8 mm; (b) Molecular sieves 0,4-0,8 mm; (c) Bote de molecular sieves 1-2 mm; (d) Molecular sieves 1-2 mm.



(a)



(b)

|                        |                 |
|------------------------|-----------------|
| NºSERIE/SERIAL NUMBER: | 49235/1         |
| NORMA/STANDARD:        | UNE 7050-3:1997 |
| ABERTURA/APERTURE:     | 0,600 mm        |
| DIAMETRO/DIAMETER:     | 200MMØ          |
| MODELO/MODEL:          | STANDARD        |

(c)

|                        |                 |
|------------------------|-----------------|
| NºSERIE/SERIAL NUMBER: | 49235/2         |
| NORMA/STANDARD:        | UNE 7050-3:1997 |
| ABERTURA/APERTURE:     | 1,6 mm          |
| DIAMETRO/DIAMETER:     | 200MMØ          |
| MODELO/MODEL:          | STANDARD        |

(d)

Figura 5.5: Proceso de tamizado de molecular sieves: (a) Tamiz de laboratorio; (b) Tamizando; (c) Tamiz tipo apertura 0,6 mm; (d) Tamiz tipo apertura 1,6 mm.

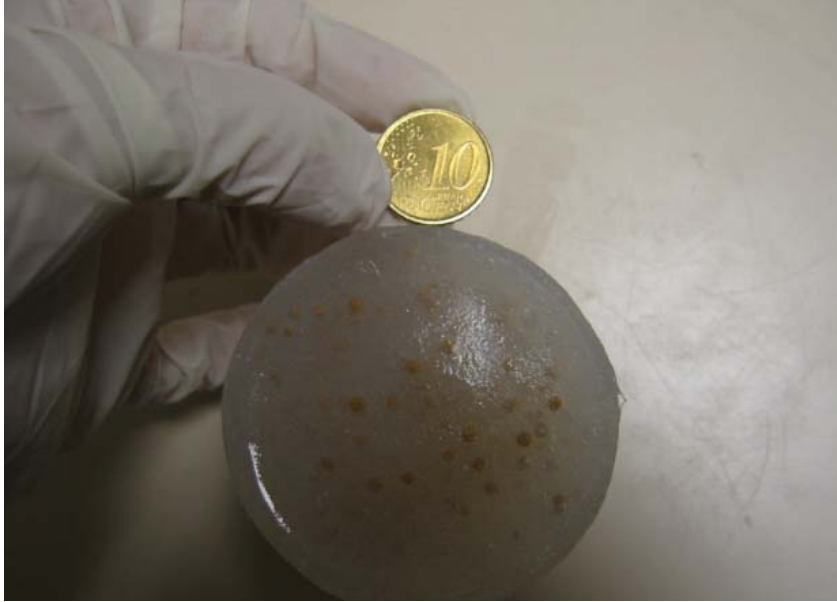


Figura 5.6: *Aspecto de una pieza de test conteniendo 1000 molecular sieves de tamaño 1,3 mm.*

cantidad de sal adecuada, tarando las proporciones mediante una báscula de precisión de la misma forma que se han calculado para el agar-agar (ver figura 5.3.b). Al añadir sal al agua destilada se consigue aumentar la atenuación por absorción de la matriz homogénea de agar-agar, [54]. Al agua destilada más sal se le añade el agar-agar y se lleva la mezcla justo al punto de ebullición. Se mezcla bien y se deja reposar. La probeta va gelificando lentamente conforme disminuye su temperatura. Minutos antes de su solidificación (aproximadamente dos horas y media después, a temperatura ambiente) se insertan los dispersores y se mezcla todo bien de forma que éstos queden uniformemente distribuidos en toda la pieza. Este proceso ha de repetirse para cada una de las ocho piezas que compusieron el juego. La figura 5.6 muestra el aspecto de una pieza de test, concretamente una pieza conteniendo 1000 *molecular sieves* de tamaño 1,3 mm.

### 5.2.3. Equipamiento y proceso de medida

#### Equipamiento de medida

El equipo de medida está compuesto por un PC con una tarjeta de ultrasonidos IPR-100 (Physical Acoustics) trabajando en modo pulso-eco con 400V de voltage de ataque, con un amplificador receptor de 40 dB y una impedancia de amortiguamiento de 2000 Ohms. La frecuencia del transductor elegido es de 1 Mhz, concretamente se usó un transductor modelo K1SC (Krautkramer & Branson).

La señal recibida fue adquirida por un osciloscopio Tektronix 3000 con frecuencia de muestreo de  $f_s=50$  M Muestras/s.

#### Proceso de medida

Antes de medir cada probeta se aplica al transductor una pequeña capa de gel de alta densidad de forma que se consiga mayor adaptación entre la impedancia acústica del aire y la del material a medir. La impregnación con gel mejora la adaptación y permite eliminar posibles reflexiones que nos hagan perder energía del pulso de entrada al material.

En la figura 5.7.a se muestra el proceso de aplicación del gel al transductor y en la figura 5.7.b se muestra el momento de medición de una pieza de test. Notar la forma cilíndrica de las piezas. En adelante denotaremos como cara *A* a una de las caras del cilindro y cara *B* a su opuesta.

Cada probeta fue medida de manera individual por ambas caras obteniendo diez A-scans para la cara *A* y diez A-scans para la cara *B*. Usando el espectrograma a través de la transformada corta de Fourier (ver capítulo 2 sección 2.3) se obtuvo un diagrama tiempo frecuencia individual para cada uno de los veinte A-scans. Finalmente, se promediaron los veinte TFRs procedentes de los veinte A-scans y se obtuvo un TFR para cada pieza. Después del binarizado del TFR (en los casos en que corresponda) se aplicaron los estimadores citados en el capítulo 3 a cada una de las probetas.

Una vez explicado el proceso para la construcción de las piezas y expuesto el modo de llevar a cabo el proceso de medida para la obtención de datos a partir de éstas, en la siguiente sección se muestran los resultados de aplicación del conjunto de estimadores y se discute la validez de éstos para la caracterización del tipo de materiales emulados.

## 5.3. Resultados obtenidos

El conjunto de ocho piezas fue dividido en dos subconjuntos: el subconjunto impar (compuesto por las piezas 1, 3, 5 y 7) y el subconjunto par (compuesto por las piezas 2, 4, 6 y 8) (ver tabla 5.1). Ambos subconjuntos fueron medidos





(a)



(b)

Figura 5.7: *Proceso de medida. (a) Aplicación de capa de gel de alta densidad para aumentar la adaptación transductor/probeta. (b) Ejemplo de medición de una pieza.*

de manera separada de cara a comparar el resultado obtenido para cada uno de ellos. Los parámetros y gráficas obtenidas después de procesar cada subconjunto fueron similares, por esta razón todos los parámetros y gráficas representados en esta sección son el resultado del promedio de los resultados obtenidos para los subconjunto par e impar, obteniendo un único valor para cada uno de los parámetros en función del valor del parámetro  $\bar{D}$ .

En la tabla 5.3 se muestran resumidos el conjunto de parámetros probados en este capítulo y se hace referencia además a las figuras y la tabla donde se muestran los resultados para cada uno de los estimadores probados.

| Estimador                             | Resultados mostrados en: |
|---------------------------------------|--------------------------|
| $\omega_{max}$ y $\omega_{max}^{mod}$ | figura 5.8               |
| $BW\%$ y $BW\%^{mod}$                 | figura 5.9               |
| $\omega_c$ y $\omega_c^{mod}$         | figura 5.10              |
| area                                  | tabla 5.4                |
| orientacion                           | tabla 5.4                |
| excentricidad                         | tabla 5.4                |
| signature del contorno (SC)           | figura 5.11              |

Tabla 5.3: Resumen de los estimadores probados en esta sección y referencia a la figura o tabla donde se muestran los resultados.

Los códigos de color usados en las leyendas son los mismos para todas las figuras que se muestran en este capítulo. En todas ellas la línea roja con “\*” representa la evolución, con respecto a la profundidad o ángulo (según el caso), del estimador que corresponda en la evaluación de las piezas que contienen dispersores de diámetro medio  $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$ . La línea verde con “o” representa la evolución del estimador para las piezas que contienen dispersores con diámetro medio  $\bar{D} = 0,7 \text{ mm}$ . La línea azul con “ $\Delta$ ” hace referencia a la evaluación de piezas cuya estructura dispersiva está formada por dispersores cuyo diámetro medio es de  $\bar{D} = 1,3 \text{ mm}$  y la línea negra punteada (sin marcador) hace referencia a piezas cuyo diámetro medio de dispersor es de  $\bar{D} = 1,8 \text{ mm}$ .

Tanto la figura 5.8 como la figura 5.9 y 5.10 contienen dos gráficas, la gráfica (a) muestra la evolución con la profundidad del estimador computado de la manera convencional y la gráfica (b) los mismos resultados pero en este caso de aplicación del estimador correspondiente en su versión modificada.

A continuación se procede a discutir los resultados de cada uno de los estimadores que se han ensayado en este capítulo.

En cuanto a la evolución de la frecuencia central, si nos centramos en la figura 5.8 podemos observar que:

- Ninguno de los dos estimadores (ni  $\omega_{max}$  ni  $\omega_{max}^{mod}$ ) permite clasificar con precisión las cuatro piezas en función del tamaño del diámetro.
- Si nos centramos en la figura 5.8.a observamos que el estimador  $\omega_{max}$  no permite la clasificación de las piezas en las citadas categorías, sólo permite

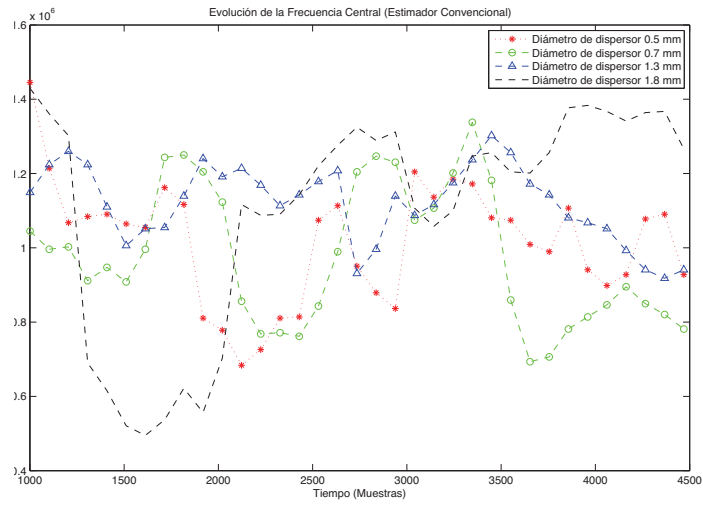
intuir cierta tendencia aproximadamente a partir de la muestra 3400. Este dato permitiría clasificar las probetas en dos clases de diámetro (entre 0,5 a 0,7 mm o bien diámetro mayor, entre 1,3 y 1,8 mm) sólo en el caso de que las posibles categorías fueran conocidas a priori.

- Si nos centramos en la figura 5.8.b el comportamiento del estimador  $\omega_{max}^{mod}$  es similar a lo expuesto para el convencional (ver punto anterior). La versión modificada del estimador presenta menor varianza y amplía el rango donde el estimador es capaz de hacer la clasificación burda. Concretamente, a partir de la muestra 2100 es posible hacer una distinción burda entre las dos clases (diámetro entre 0,5 a 0,7 mm o bien diámetro mayor entre 1,3 y 1,8 mm).
- Podemos concluir que, para el caso de materiales dispersivos blandos con fondo homogéneo y estructura dispersiva variable, la aplicación del estimador frecuencia central no permite la clasificación de las citadas piezas en cuanto al tamaño medio de dispersor. Sólo permite intuir cierto comportamiento y separación en dos categorías en un rango acotado de muestras. La versión modificada del estimador tampoco se puede proclamar como válida para el objetivo perseguido pero sí que presenta menos varianza y amplía el rango de muestras para las cuales es posible intuir esta tendencia.

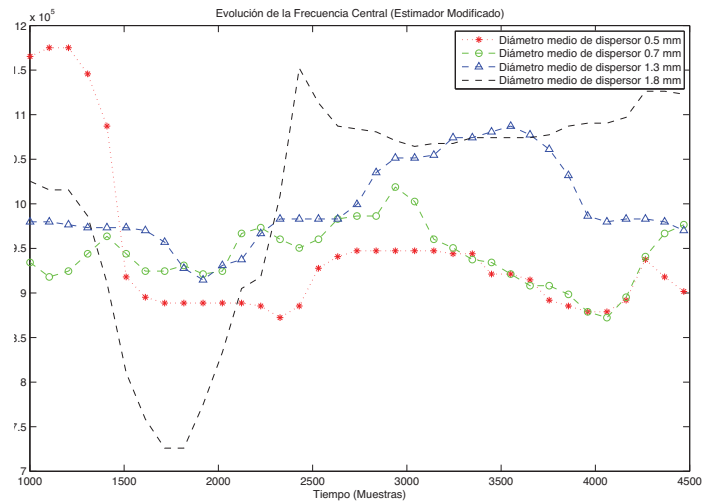
En lo que respecta al cómputo del ancho de banda fraccional a -3 dB, acorde con lo mostrado en la figura 5.9 podemos observar que:

- Si analizamos la gráfica 5.9.a podemos apreciar que el estimador  $BW_{\%}$  no es capaz de clasificar materiales en función de las cuatro categorías de diámetro estudiadas. De la observación de la citada gráfica sólo podemos intuir a partir de la muestra 3700 y de manera burda la separación en dos categorías.
- Por otro lado, si analizamos la gráfica 5.9.b se observa que el estimador  $BW_{\%}^{mod}$  tampoco es capaz de clasificar los materiales en función de las cuatro categorías de diámetro medio de dispersor. No obstante, la versión modificada del estimador presenta menos varianza y permite concluir de manera algo más clara cierta tendencia de cara a la separación en dos posibles categorías (tamaño de dispersor grande, entre 1,3 y 1,8 mm, o pequeño entre 0,5 y 0,7 mm). Notar que en los intervalos de muestras 1000-1100, 2000-2700 y a partir de la muestra 3400 es posible observar la tendencia citada anteriormente.
- Al igual que ocurría para el caso del estimador  $\omega_{max}$  y  $\omega_{max}^{mod}$ , el estimador  $BW_{\%}$  y su versión modificada sólo serían verdaderamente útiles en el caso de conocer a priori las posibles categorías objeto del problema.

La tabla 5.4 muestra el resultado de aplicación de los estimadores geométricos: *area*, *orientacion* y *excentricidad* para el análisis de forma de los diagramas tiempo-frecuencia binarizados. A continuación se discuten los resultados que derivan de ésta:

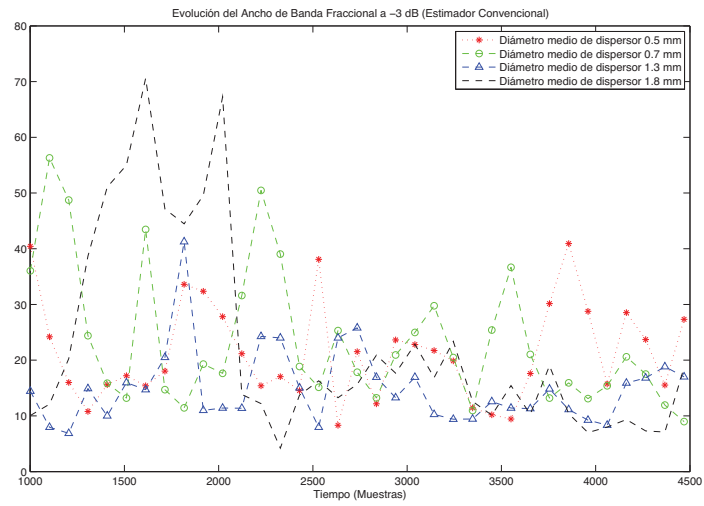


(a)

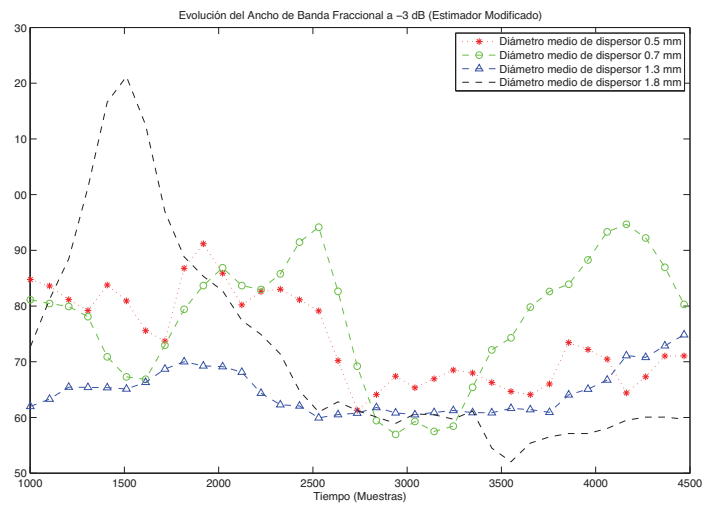


(b)

Figura 5.8: Evolución de la frecuencia central con la profundidad. (a) Estimador convencional; (b) estimador modificado.



(a)



(b)

Figura 5.9: Evolución del ancho de banda fraccional a -3 dB con la profundidad. (a) Estimador Convencional; (b) Estimador Modificado.

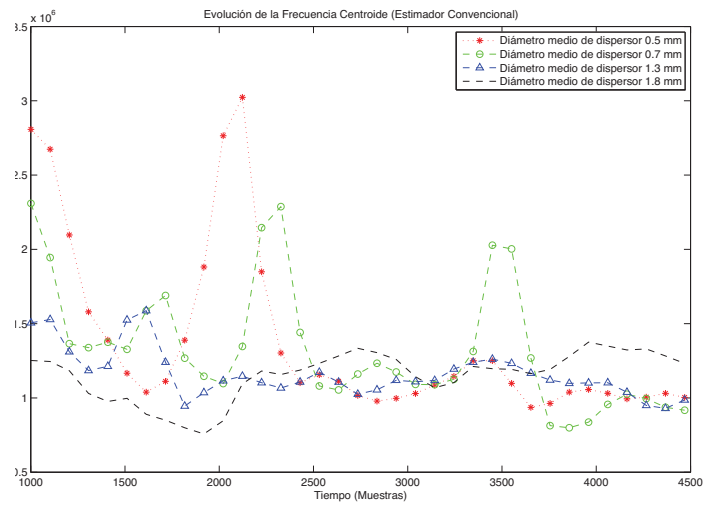
| $\bar{D}$ | Piezas test: | area | orientacion | excentricidad |
|-----------|--------------|------|-------------|---------------|
| 0.5 mm    | 1 y 2        | 651  | -0.0953     | 0.8762        |
| 0.7 mm    | 3 y 4        | 383  | -0.0344     | 0.8329        |
| 1.3 mm    | 5 y 6        | 258  | -0.3297     | 0.6965        |
| 1.8 mm    | 7 y 8        | 279  | -0.1041     | 0.6423        |

Tabla 5.4: Análisis de forma del TFR. Aplicación de descriptores geométricos: area, orientacion y excentricidad.

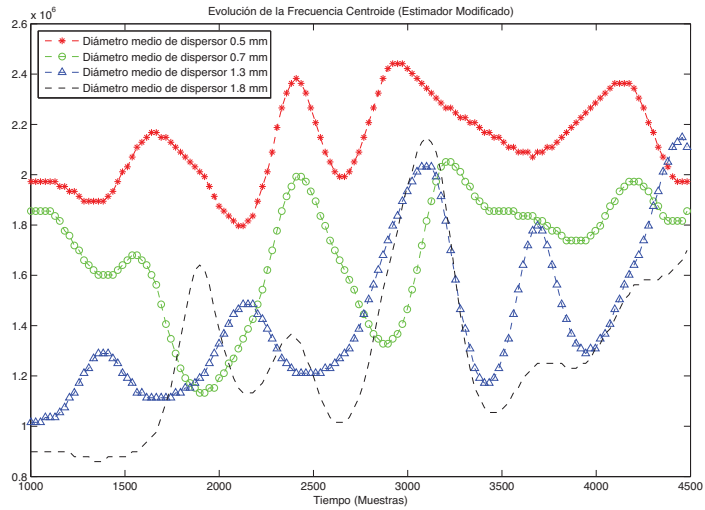
- Los valores para el descriptor *area* obtenidos para el juego de probetas, mostrados en la tabla 5.4, concuerdan con el comportamiento predicho y que fue descrito en el capítulo 3. Podemos observar cómo conforme aumenta el diámetro medio de dispersor se obtienen valores más pequeños para el descriptor *area*. Esta tendencia se mantiene de manera abrupta para todos los posibles valores del parámetro  $\bar{D}$ .
- Los valores para el descriptor *orientacion* presentados en la tabla 5.4 concuerdan con el comportamiento esperado de las ecuaciones (2.13), (2.14) y (2.15). Además corroboran los resultados de las simulaciones presentados en el capítulo anterior (ver figuras 4.8 y 4.15), ya que preciden una inclinación con respecto al eje horizontal conforme aumenta el valor del parámetro  $\bar{D}$ . La explicación física se basa en el hecho de que conforme aumenta el valor del parámetro  $\bar{D}$  mayor es la atenuación de la energía ultrasónica a altas frecuencias. Como resultado, cuanto mayor es el valor de  $\bar{D}$  se obtienen mayores pendientes (con respecto al eje horizontal). El estimador *orientacion* permite también distinguir de manera burda entre piezas con diámetro medio de dispersor pequeño ( $\bar{D} = 0,5$  y  $0,7$  mm) y grande ( $\bar{D} = 1,3$  and  $1,8$  mm).
- Los valores para el descriptor *excentricidad* mostrados en la tabla 5.4 ponen de manifiesto que cuanto mayor es el valor del parámetro  $\bar{D}$  menor es el valor obtenido por este estimador. Este comportamiento también concuerda con lo desarrollado en el capítulo 3 y permite clasificar de manera precisa todas las piezas de test.

Por otro lado, la figura 5.10 representa la evolución de la frecuencia centroide con la profundidad. Esta figura contiene dos gráficas, la primera muestra dicha evolución usando el estimador  $\omega_c$  (gráfica 5.10.a) y la segunda muestra el resultado de aplicación del estimador  $\omega_c^{mod}$  (gráfica 5.10.b), anteriormente descritos en el capítulo 3. Al igual que los resultados mostrados en la tabla 5.4 la gráfica muestra los resultados promedio obtenidos del procesado de los subconjuntos par e impar. De la observación de la figura 5.10 es importantes destacar que:

- Ambos estimadores deben de obtener resultados del mismo orden de magnitud, y así puede corroborarse mediante comparación de las gráficas 5.10.a y 5.10.b.



(a)



(b)

Figura 5.10: Evolución de la frecuencia centroide con la profundidad. (a) Estimador convencional; (b) Estimador modificado.

- Cómo ya se ha explicado a lo largo del desarrollo de esta tesis, el pulso ultrasónico se atenúa conforme penetra en la matriz de agar-agar (valores de tiempo crecientes) mientras que por otro lado el ruido de observación permanece constante. Este fenómeno produce que para la obtención de correctos resultados en las últimas muestras temporales (cuando el pulso ha penetrado mucho a lo largo del material y ha sufrido el efecto de atenuación) se requieran estimadores con menos varianza, para ser capaces de distinguir entre diferentes categorías (dadas para diferentes valores del parámetro  $\bar{D}$ ).
- La gráfica 5.10.a muestra cómo el estimador  $\omega_c$  sólo permite distinguir entre las diferentes categorías en las primeras muestras temporales (desde la muestra 1000 a la 1150). Conforme el pulso va perdiendo energía y va predominando cada vez más la energía del ruido de observación el estimador no puede ofrecer estimas adecuadas.
- Por otro lado, la gráfica 5.10.b muestra como el estimador  $\omega_c^{mod}$  proporciona estimas acertadas en un mayor rango de valores (desde la muestra 1000 hasta la 1750). Podemos incluso afirmar que la tendencia mostrada en las primeras muestras se puede adivinar en prácticamente todo el rango, incluidas las últimas muestras.
- Este experimento no sólo selecciona al estimador  $\omega_c^{mod}$  como candidato a formar parte de la tradicional firma ultrasónica, sino que además confirma la superior aplicabilidad, en términos de sesgo y varianza, con respecto al estimador  $\omega_c$ . De esta manera se confirman, mediante el procesado de probetas reales, los resultados mostrados mediante simulación en el capítulo 4 (ver figuras 4.16.c, 4.17.c, 4.18.c y 4.19.c).

Finalmente la figura 5.11 muestra resultados prometedores. Esta figura muestra los resultados de aplicación del estimador  $SC$ . Éste parámetro fue descrito en el capítulo 3 y computa la distancia euclídea del centroide de una región al borde ésta, en función del ángulo. Notar que el valor de la amplitud obtenida de la aplicación del estimador  $SC$  aumenta conforme decrece el valor del parámetro  $\bar{D}$ . Este resultado concuerda además con el resultado mostrado para el estimador *excentricidad*, en la tabla 5.4 se puede observar que las piezas con menor valor de  $\bar{D}$  tienen mayor *excentricidad* y por lo tanto la distancia del centroide al borde aumenta. Es fácilmente observable que el estimador *signature del contorno*, permite distinguir claramente las cuatro categorías de materiales.

## 5.4. Conclusiones

En este capítulo se ha mostrado el resultado de aplicar los descriptores geométricos así como los descriptores convencionales derivados de la frecuencia y sus versiones modificadas (ver capítulo 3) a una batería de ocho piezas diferentes fabricadas en un entorno de laboratorio. Dicha batería de piezas emula materiales dispersivos



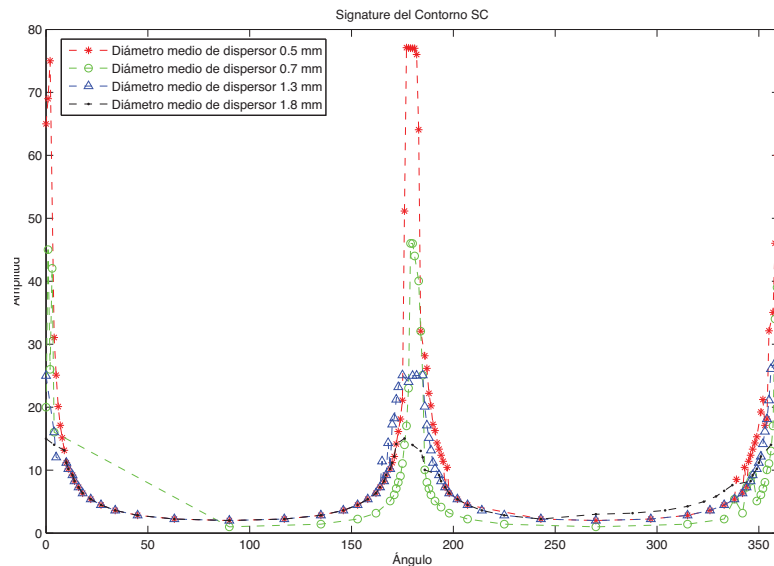


Figura 5.11: Resultados de aplicación del estimador signature del contorno.

con fondo atenuante homogéneo y se compone de diferentes probetas en las que se ha ido variando el diámetro medio de los dispersores que las componen.

Se ha presentado el proceso para la fabricación de las citadas piezas así como el proceso de medida y el equipamiento utilizado para este fin.

Los resultados se muestran en la tabla y figuras que se detallan en la tabla 5.3.

Podemos resaltar que los estimadores geométricos *area* y *orientacion* permiten clasificar las piezas de test en dos categorías (tamaño de dispersor pequeño y grande). Por otro lado, los estimadores geométricos *excentricidad* y *SC* proporcionan mejores resultados ya que permiten distinguir las cuatro categorías en cuanto al valor del parámetro  $\bar{D}$ .

Con respecto a los estimadores derivados de la frecuencia, en el capítulo 4 no pudimos asegurar la superioridad del estimador  $\omega_{max}^{mod}$  con respecto al estimador  $\omega_{max}$  y el mismo caso ocurrió con el estimador  $BW_{\%}^{mod}$  con respecto al estimador  $BW_{\%}$ . En este capítulo se ha visto que, aunque ninguno de los estimadores permiten clasificar de manera precisa materiales blandos con atenuación del fondo homogéneo y estructura dispersiva variable, sí que permiten adivinar ciertas tendencias de cara a hacer una clasificación burda de éstos y que además las versiones modificadas presentan menor varianza y amplían el rango de valores para los cuales es posible apreciar dicha tendencia.

Cabe finalmente destacar la operatividad del parámetro  $\omega_c^{mod}$  ya que supone

una clara mejora con respecto a la versión convencional y además permite realizar una clasificación precisa en base a los cuatro posibles valores del parámetro  $\bar{D}$ .

## Capítulo 6

# Aplicación a materiales dispersivos blandos con tamaño de dispersor fijo y atenuación del fondo variable

### 6.1. Presentación

En el capítulo anterior se presentó el resultado de aplicar el conjunto de estimadores descritos en el capítulo 3 a un juego de probetas generadas en un entorno de laboratorio y que emulan materiales dispersivos blandos, con fondo homogéneo y estructura dispersiva variable.

En este capítulo se presenta el resultado de aplicar el mismo grupo de estimadores a dos juegos de probetas también generadas en el laboratorio. El nuevo conjunto de probetas pretende simular materiales dispersivos con estructura dispersiva similar para todas las piezas pero con atenuación del fondo (o matriz base del material) variable.

En la primera sección se muestra el equipamiento de medida y se describe la parte del proceso de medida que es común para todos los tipos de piezas que se presentan en este capítulo.

En la segunda sección se muestra el resultado de aplicación de los estimadores geométricos y derivados de la frecuencia a un conjunto de matrices de agar-agar conteniendo igual concentración de dispersores (*molecular sieves*) del mismo diámetro en los que se ha ido variando la composición de la matriz base del mate-

rial.

En la tercera sección el conjunto de parámetros geométricos es aplicado a un juego de probetas también generadas en el laboratorio pero empleando burbujas de aire como elementos dispersores en lugar de *molecular sieves* de tamaño conocido y gelatina alimentaria en lugar de agar-agar.

Finalmente se muestran las conclusiones más importantes que derivan de los resultados presentados en las secciones segunda y tercera.

## 6.2. Equipamiento de medida

El equipamiento de medida utilizado para la medición de todas las piezas de este capítulo es el mismo que el usado para la adquisición de resultados del capítulo anterior.

La frecuencia del transductor elegido ha sido nuevamente de 1 *Mhz*, y se ha usado el mismo transductor modelo K1SC (Krautkramer & Branson). Antes de medir las piezas es importante aplicar una capa de gel de alta densidad al transductor de cara a mejorar la adaptación del pulso de entrada.

Al igual que en el capítulo anterior todas las piezas usadas en este capítulo tienen forma cilíndrica y fueron medidas por ambas caras obteniendo diez A-scans para cada una de éstas. Para cada uno de los A-scans se obtuvo un diagrama tiempo-frecuencia usando el espectrograma (ver capítulo 2 sección 2.3). EL TFR procesado finalmente fue el resultado de promediar los veinte TFRs correspondientes a cada uno de los veinte A-scans.

## 6.3. Aplicación a matrices heterogéneas de agar-agar

Presentamos en esta sección el resultado de aplicación de los parámetros descritos en el capítulo 3 a un tipo de material dispersivo blando.

Cabe recordar que en el capítulo anterior se presentaron los resultados de aplicación del mismo conjunto de parámetros a un conjunto de probetas que emulan cuerpos blandos con diferente estructura dispersiva y se estudió de qué manera la variación del parámetro  $\bar{D}$  afecta a la forma del TFR así como al comportamiento del registro ultrasónico en el dominio de la frecuencia.

En el nuevo caso que ahora se aborda, el juego de probetas se ha generado para modelar el efecto de la atenuación por absorción de manera aislada. Para tal fin, se ha generado una colección de probetas compuestas por seis piezas. Todas las probetas están compuestas por una matriz uniforme de agar-agar en la que se ha insertado la misma distribución de dispersores, tanto en número como en tamaño. Con el fin de estudiar qué cambios se producen en la forma o comportamiento en

| Pieza test | Concentración agar-agar | Dispersores $n^\circ / \bar{D}$ | Concentración sal |
|------------|-------------------------|---------------------------------|-------------------|
| 1 y 2      | 2%                      | 1000/0,5 mm                     | 0%                |
| 3 y 4      | 2%                      | 1000/0,5 mm                     | 1%                |
| 5 y 6      | 2%                      | 1000/0,5 mm                     | 2%                |

Tabla 6.1: Resumen de composición de las matrices heterogéneas de agar-agar.

frecuencia del TFR conforme aumenta la atenuación del fondo se ha ido variando la concentración de sal de las diferentes piezas.

### 6.3.1. Preparación de las probetas

El proceso de creación de las piezas así como los materiales que se dispusieron para realizar las medidas son los mismos que se utilizaron en el capítulo anterior. La única diferencia es que en este caso sólo se usaron *molecular sieves* de un tamaño dado y se fueron variando las concentraciones de sal. El resumen de la composición de las piezas se muestra en la tabla 6.1. En la primera columna aparece el nombre que recibe la pieza, en la segunda columna se muestra la concentración de agar-agar (en agua destilada), la tercera columna muestra el número de dispersores y tamaño medio de éstos (notar que es el mismo para todas las piezas) y en la cuarta columna se muestra la concentración de sal que se ha añadido a la matriz de fondo.

En la tabla 6.1 se observa que las seis piezas de test representan en realidad dos subconjuntos que podríamos dividir en el subconjunto par (piezas 2, 4 y 6) y subconjunto impar (piezas 1, 3, y 5). Al igual que en el capítulo anterior y con el objeto de comprobar la repetibilidad del proceso se midieron nuevamente cada uno de los dos subconjuntos de manera aislada. Una vez comprobado que el comportamiento de ambos era similar se promedió el resultado obtenido para cada uno de los subconjuntos, por lo que los resultados presentados en esta sección son el promedio de los valores obtenidos de ambos subconjuntos.

En el siguiente punto se muestran y discuten los resultados obtenidos.

### 6.3.2. Resultados obtenidos

La tabla 6.2 muestra un resumen del conjunto de estimadores que han sido ensayados en esta sección así como una referencia a la figura o tabla donde podemos consultar los resultados.

Para todas las figuras el código de colores utilizado ha sido el mismo. La línea roja con marcador “\*” representa la evolución del estimador para el promedio de las piezas 1 y 2 (probetas sin sal); la línea verde con marcador “o” representa la evolución del estimador correspondiente para el caso de las piezas 3 y 4 (probetas con concentración del 1% de sal) y la línea azul con marcador “ $\Delta$ ” representa la evolución del estimador que corresponda pero en este caso para las piezas 4 y 5

| Estimador                             | Resultados mostrados en: |
|---------------------------------------|--------------------------|
| $\omega_{max}$ y $\omega_{max}^{mod}$ | figura 6.1               |
| $BW_{\%}$ y $BW_{\%}^{mod}$           | figura 6.2               |
| $\omega_c$ y $\omega_c^{mod}$         | figura 6.3               |
| <i>area</i>                           | tabla 6.3                |
| <i>orientacion</i>                    | tabla 6.3                |
| <i>excentricidad</i>                  | tabla 6.3                |
| <i>signature del contorno (SC)</i>    | figura 6.4               |

Tabla 6.2: Resumen de los estimadores probados en esta sección y referencia a la figura o tabla donde se muestran los resultados.

(concentraciones de sal del 2 %).

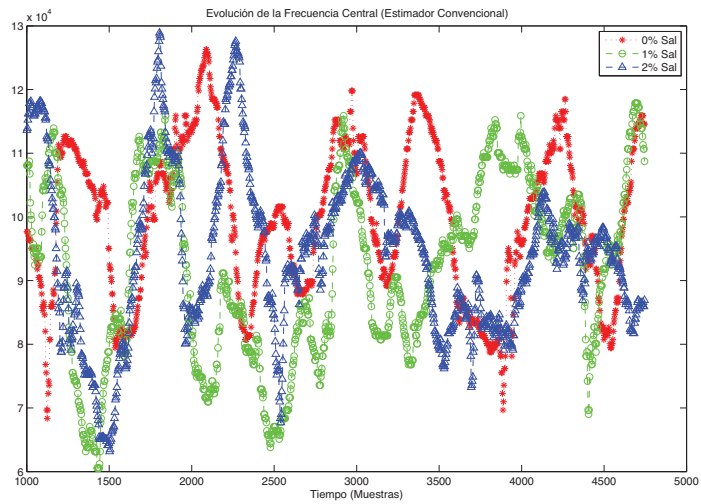
Las figuras 6.1, 6.2 y 6.3 muestran la evolución de la frecuencia central, el ancho de banda fraccional a -3 dB y la frecuencia centroide, respectivamente. Las tres figuras muestran dos gráficas, la primera muestra los resultados de aplicación del estimador que corresponda en su versión convencional y la segunda en su versión modificada.

De la observación de las figuras citadas en el párrafo anterior podemos extraer las siguientes conclusiones:

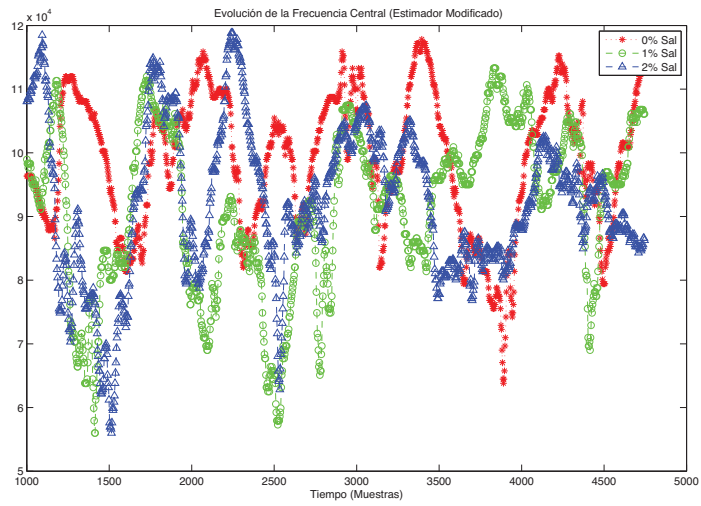
- Ni el estimador  $\omega_{max}$  ni su versión modificada ( $\omega_{max}^{mod}$ ) proporcionan información válida de cara a la caracterización de materiales blandos con estructura dispersiva similar pero atenuación del fondo cambiante.
- En cuanto a los estimadores  $BW_{\%}$  y  $BW_{\%}^{mod}$  los resultados tampoco permiten la clasificación de las diferentes probetas en función de la cantidad de sal (atenuación del fondo). Notar que el estimador  $BW_{\%}^{mod}$  consigue una mejor separación de las clases que el estimador  $BW_{\%}$ , ya que éste último muestra las gráficas prácticamente superpuestas, pero en cualquier caso ninguno de los dos estimadores permite la clasificación de las piezas.
- En cuanto al estudio de la evolución de la frecuencia centroide con la profundidad los estimadores  $\omega_c$  y  $\omega_c^{mod}$  no solamente no permiten la clasificación sino que ambas gráficas (6.3.a y 6.3.b) muestran cómo la frecuencia central apenas varía con la profundidad y se mantiene en torno a la frecuencia nominal del transductor utilizado (1 Mhz).
- Los estimadores derivados de la frecuencia no son sensibles al problema planteado. Ninguno de los estimadores presentados permite la clasificación de las piezas en cuanto a la composición del fondo de éstas.

A continuación pasamos a analizar la respuesta de los estimadores geométricos *area*, *orientacion*, *excentricidad* y *SC* (descritos en el capítulo 3) y discutiremos su utilidad de cara a caracterizar el tipo de materiales presentados en esta sección.

La tabla 6.3 muestra los resultados promedio del procesado de las piezas del subconjunto par e impar. Concretamente muestra la evolución de los descriptores

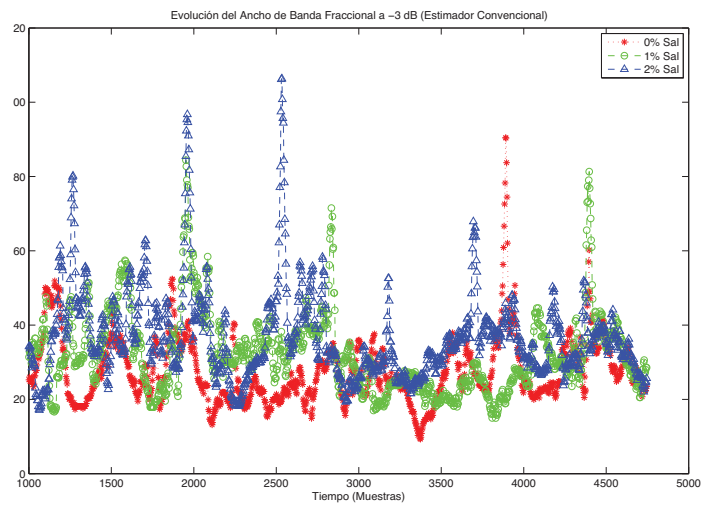


(a)

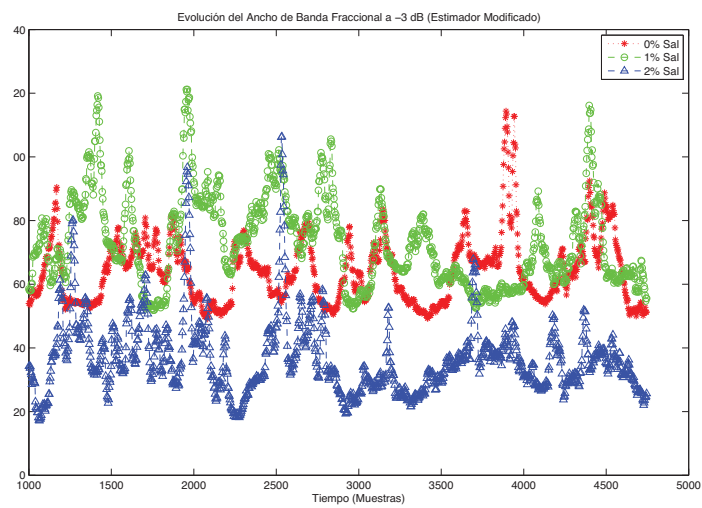


(b)

Figura 6.1: Evolución de la frecuencia central con la profundidad. (a) Estimador convencional; (b) Estimador modificado.



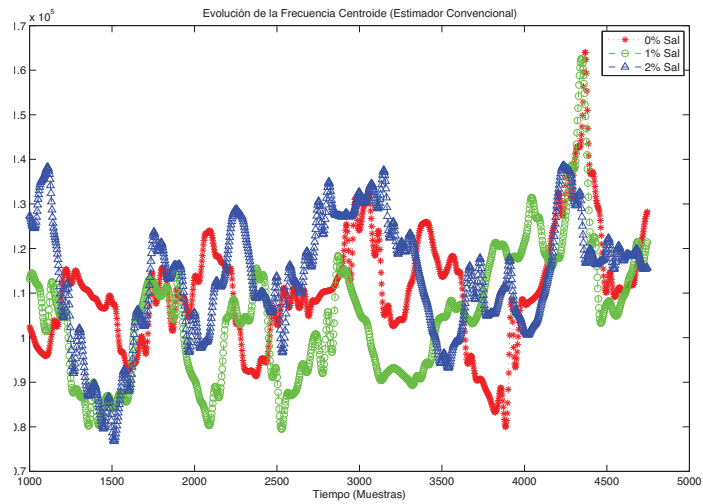
(a)



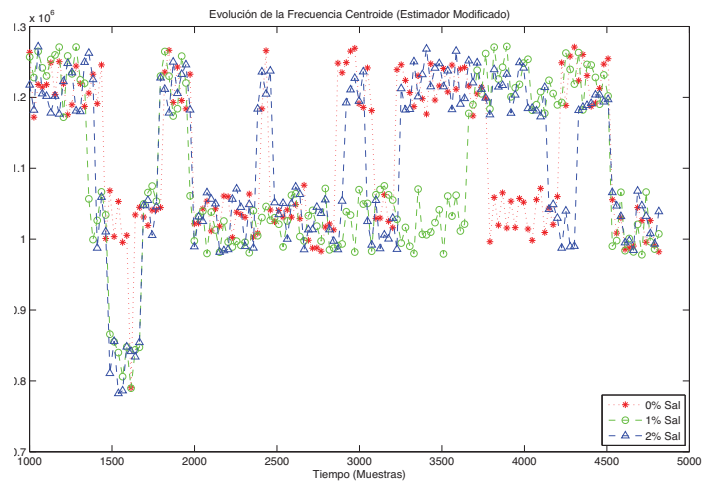
(b)

Figura 6.2: Evolución del ancho de banda fraccional a -3 dB con la profundidad. (a) Estimador convencional; (b) Estimador modificado.





(a)



(b)

Figura 6.3: Evolución de la frecuencia centroide con la profundidad. (a) Estimador convencional; (b) Estimador modificado.

| Concentración sal | Piezas test: | area | orientacion | excentricidad |
|-------------------|--------------|------|-------------|---------------|
| 0 % sal           | 1 y 2        | 320  | 0.0036      | 0.7627        |
| 1 % sal           | 3 y 4        | 226  | 0.0026      | 0.5936        |
| 2 % sal           | 5 y 6        | 178  | -0.2554     | 0.4951        |

Tabla 6.3: Análisis de forma del TFR. Aplicación de descriptores geométricos: area, orientacion y excentricidad.

geométricos *area*, *orientacion* y *excentricidad* conforme aumenta la cantidad de sal en las piezas.

A partir de la observación de los resultados de la tabla 6.3 es importante hacer énfasis en los siguientes aspectos:

- El estimador geométrico *area* permite clasificar de manera precisa las tres categorías de piezas presentadas. Se observa cómo al aumentar la concentración de sal el valor del *area* disminuye. El resultado es acorde con lo dispuesto en el capítulo 3 donde se discutió la dependencia del valor del *area* conforme aumenta la atenuación. Este resultado también es acorde con los resultados mostrados en el capítulo 5 donde el aumento del valor de  $\bar{D}$  (que en definitiva también produce un aumento de la atenuación de la onda ultrasónica) también se veía reflejado en una disminución del valor del *area*.
- Con respecto al estimador geométrico *excentricidad* observamos que éste permite también la clasificación de las tres categorías de piezas, disminuyendo su valor conforme aumenta la atenuación del fondo del material (aumento de la concentración de sal en la pieza). Este resultado concuerda también con lo dispuesto en el capítulo 3. Además la tendencia mostrada por el estimador *excentricidad* es coherente con los resultados obtenidos en el capítulo anterior donde al aumentar el valor  $\bar{D}$  también disminuía el valor de la *excentricidad*.
- Con respecto al estimador geométrico *orientacion* también podemos observar su validez para la clasificación de las piezas en las tres categorías, en cuanto a atenuación del fondo se refiere. Además la tendencia del estimador al aumentar la atenuación concuerda también con la ya mostrada mediante los resultados del capítulo 5.

Finalmente, observamos la figura 6.4 que muestra los resultados de aplicación del estimador geométrico *SC*. Podemos apreciar una vez más la utilidad del análisis de forma para clasificar de manera precisa las tres categorías de piezas medidas. Acorde con lo expuesto en el capítulo 3, el estimador *SC* proporciona mayores valores de amplitud para aquellas probetas menos atenuantes. Esta tendencia también es coherente con lo mostrado en el capítulo 5 (ver figura 5.11) donde para aquellos materiales más atenuantes la amplitud del *SC* era menor.

## 6.4. Aplicación a matrices heterogéneas de gelatina

En la sección anterior se demostró que los estimadores derivados de la frecuencia no son muy sensibles a la hora de estimar cambios que no dependen de la microestructura del material sino del material base que compone la pieza.

En esta sección se presenta un conjunto de cuatro probetas que simulan el mismo tipo de materiales que las probetas medidas en la sección anterior. En

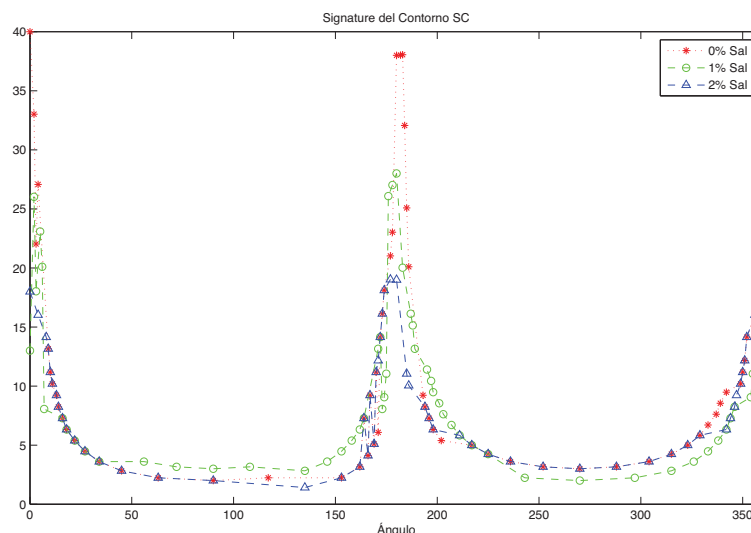


Figura 6.4: Descriptor signature del contorno

este nuevo experimento el material que compone la matriz base está compuesto por gelatina más sal y la microestructura del material dispersivo está compuesta por burbujas de aire. De esta manera variando la composición de sal se fueron generaron matrices de gelatina con una composición de fondo variable.

#### 6.4.1. Preparación de las probetas

La forma de crear las piezas de gelatina es similar a la creación de piezas de agar-agar pero en este caso es necesario usar concentraciones de gelatina más elevadas. Al igual que en el caso de uso de agar-agar, es necesario llevar la mezcla de agua destilada y sal hasta el punto de ebullición y una vez insertada la gelatina hay que dejar la pieza enfriar y gelificar. Antes de la solidificación de la pieza y cuando la matriz es suficientemente viscosa se generan burbujas de aire mediante un proceso de agitación mecánica. El proceso de agitación mecánica si se realiza usando el mismo agitador y las probetas se encuentran en el mismo punto de gelificación permite la generación de burbujas de aire de tamaños más o menos controlados. No obstante, los materiales probados en esta sección constituyen un experimento menos controlado que el mostrado en la sección anterior puesto que no podemos cuantificar de manera exacta ni los tamaños ni la cantidad de burbujas.

Para presentar los resultados de esta sección se generó un juego de 4 piezas de test, dos de ellas con concentración de sal al 0% (pieza 1 y 2) y otras dos piezas con concentración de sal al 3.5% (pieza 3 y 4). La tabla 6.4 muestra un resumen de la denominación así como las concentraciones de gelatina y sal de cada una de

| Pieza test | Concentración gelatina | Concentración sal |
|------------|------------------------|-------------------|
| 1 y 2      | 6 % en agua destilada  | 0 %               |
| 3 y 4      | 6 % en agua destilada  | 3,5 %             |

Tabla 6.4: Resumen de composición de las matrices de gelatina.

| Concentración sal | Piezas test: | area | orientacion | excentricidad |
|-------------------|--------------|------|-------------|---------------|
| 0 % sal           | Pieza 1      | 339  | 0.03        | 0.60          |
| 0 % sal           | Pieza 2      | 396  | 0.15        | 0.79          |
| 3.5 % sal         | Pieza 3      | 205  | -0.34       | 0.38          |
| 3.5 % sal         | Pieza 4      | 213  | -0.10       | 0.47          |

Tabla 6.5: Análisis de forma del TFR. Aplicación de descriptores geométricos: area, orientacion y excentricidad.

las probetas medidas en esta sección.

La capacidad de solidificación de la gelatina es menor que para el caso del agar-agar, por esta razón fue necesario el uso de un soporte para la medida de las piezas de gelatina ya que por su fragilidad había alto riesgo de que se agrietaran al ser manipuladas.

En la figura 6.5 se pueden ver imágenes del proceso de medida de las piezas que se presentan en esta sección. La figura 6.6 muestra además una imagen de una de las piezas ensayadas así como un detalle de la microestructura dispersiva formada por burbujas de aire.

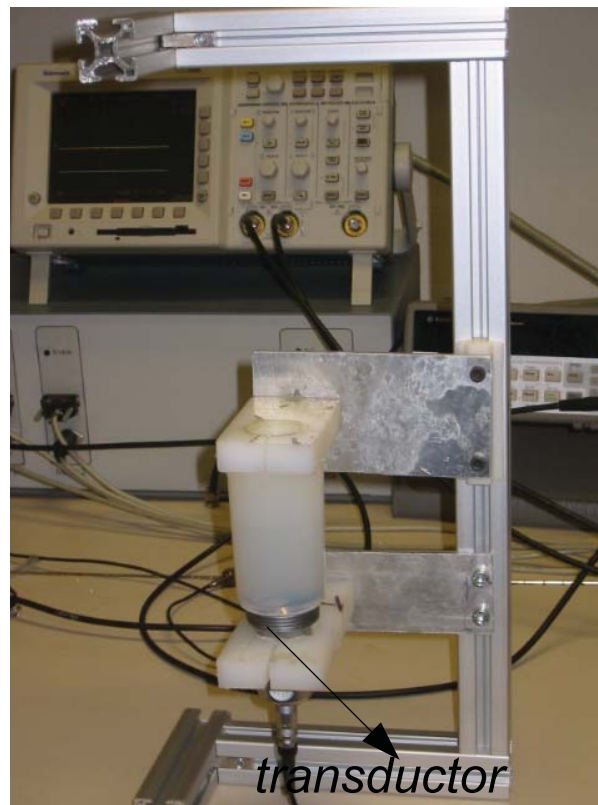
### 6.4.2. Resultados obtenidos

En esta sección sólo se muestra el comportamiento de los estimadores geométricos ya que los estimadores derivados de la frecuencia no proporcionan resultados satisfactorios.

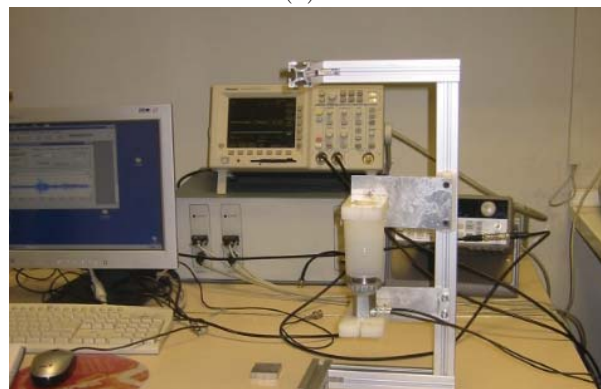
La tabla 6.5 muestra el resultado de aplicación de los estimadores geométricos area, orientacion y excentricidad.

De la observación de resultados de la tabla 6.5 se pueden resaltar los siguientes aspectos:

- Todos los estimadores permiten clasificar entre los dos tipos de piezas.
- Los resultados obtenidos para la pieza 1 son similares a los obtenidos para la pieza 2 ya que estas piezas han sido fabricadas en idénticas condiciones. Lo mismo para las piezas 3 y 4.
- Las probetas generadas en la sección anterior permitían un experimento controlado donde se conoce exactamente el tamaño y distribución de los *molecular sieves*. El cambiar los *molecular sieves* por burbujas de aire supone



(a)



(b)

Figura 6.5: *Proceso de medida. Ejemplos de medición de una pieza de gelatina.*



(a)



(b)

Figura 6.6: (a) Pieza de gelatina; (b) Detalle de la microestructura de la pieza formada por burbujas de aire.

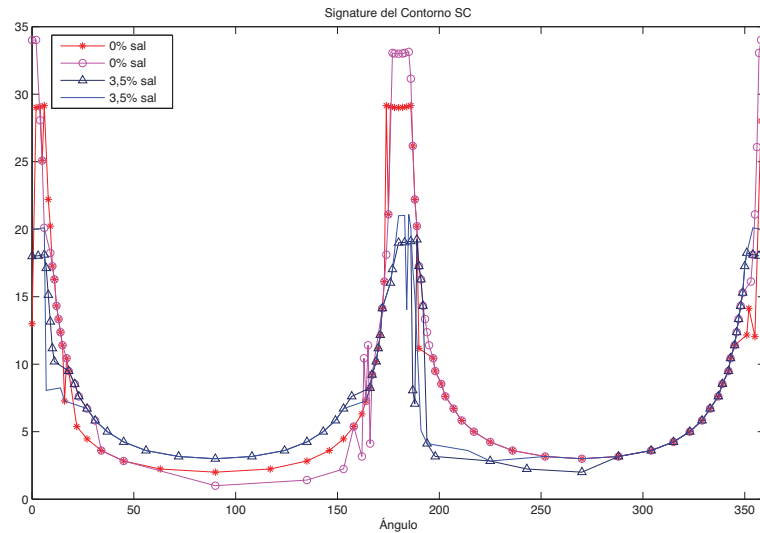


Figura 6.7: *Descriptor signature del contorno*

cierta pérdida de control acerca de los tamaños y la distribución concreta de los dispersores que componen la microestructura del material. Aún así, en esta sección se ha demostrado cómo los descriptores geométricos mantienen el mismo patrón de evolución que el mostrado para el caso del experimento anterior. Se puede afirmar que los dos juegos de piezas presentados en este capítulo, aunque se hayan generado con materiales diferentes, son afines al modelo presentado en el capítulo 2.

Finalmente, la figura 6.7 muestra el descriptor  $SC$ . La línea roja con marcador “\*” y la línea rosa con marcador “o” muestran la evolución del estimador  $SC$  para las probetas sin sal. La línea azul oscuro con marcador “ $\Delta$ ” y la línea azul claro sin marcador muestran la evolución del mismo estimador pero en este caso para las piezas con concentración de sal del 3,5%. Podemos también observar cómo el estimador es capaz de distinguir claramente entre las diferentes piezas en función de la concentración de sal, o en definitiva en función de si la probeta es más o menos atenuante.

## 6.5. Conclusiones

En este capítulo se han evaluado dos juegos diferentes de materiales. Ambos juegos emulan materiales dispersivos blandos con microestructura dispersiva similar en los que se ha ido variando la cantidad de sal que componía el fondo

de las piezas para simular diferentes valores de la atenuación debida al efecto de absorción.

Se ha mostrado un ejemplo donde los estimadores derivados de la frecuencia (ver capítulo 3) no permiten la caracterización del material bajo test. Por lo tanto, para llevar a cabo la tarea de clasificación de este tipo de materiales es necesario el uso de otro tipo de estimadores, diferentes a los tradicionales.

Por otro lado se ha demostrado que los descriptores geométricos *area*, *orientacion*, *excentricidad* y *SC* sí que permiten la correcta clasificación de todos los materiales medidos en este capítulo. Además, los citados descriptores proporcionan resultados prometedores incluso para aquellos materiales cuya microestructura dispersiva se ha generado de manera menos controlada (matrices de gelatina conteniendo burbujas de aire).

Por lo anteriormente comentado, podemos afirmar que el uso de los descriptores geométricos proporciona una clara alternativa en aquellos casos donde los estimadores tradicionales no permiten la correcta caracterización del material.

En definitiva, y enlazando con lo ya expuesto en el capítulo anterior, se puede concluir que los estimadores geométricos presentados en esta tesis son válidos para clasificar materiales dispersivos blandos. Bien sea materiales con diferente valor de atenuación del fondo y microestructura dispersiva fija o bien sea materiales dispersivos con atenuación del fondo fija y microestructura dispersiva variable.



## Capítulo 7

# Conclusiones y líneas futuras

### 7.1. Presentación

En esta tesis se ha presentado un modelo matemático de la inspección ultrasónica de un material dispersivo blando. A partir de este modelo, se ha formulado en el dominio de la frecuencia las ecuaciones que permiten relacionar parámetros físicos del material con parámetros extraídos de los registros ultrasónicos. Se ha realizado un estudio de diferentes tipos de transformadas tiempo-frecuencia para poder abordar el análisis espectral de la señal registrada y se han propuesto una serie de algoritmos para la mejor interpretación de este tipo de transformadas.

Se ha retomado el concepto de firma ultrasónica y se han estudiado algunos estimadores que han compuesto de manera tradicional la citada firma ultrasónica y que han sido utilizados a lo largo de los años en muchas de las aplicaciones en las que trabaja el Grupo de Tratamiento de Señal. Se han propuesto algunas modificaciones de los citados estimadores convencionales y se ha contrastado la utilidad de dichas modificaciones en base a señales simuladas acordes al modelo matemático presentado.

Tradicionalmente el conjunto de parámetros que componen la firma ultrasónica se obtienen mediante procesado del registro ultrasónico o del diagrama tiempo-frecuencia de la señal registrada. Si se cambia la perspectiva tradicional y el diagrama tiempo-frecuencia es interpretado como una imagen, se pueden obtener una serie de parámetros relacionados con la geometría o la forma de dichos diagramas.

De esta manera, se han presentado un conjunto de descriptores geométricos y de forma como candidatos a formar parte de la tradicional firma ultrasónica. Se ha contrastado en la práctica la utilidad de dichos estimadores mediante su aplicación para la caracterización de dos tipos de materiales dispersivos blandos:

materiales dispersivos blandos con microestructura dispersiva variable y atenuación de la matriz del fondo fija y por otro lado materiales dispersivos blandos con microestructura dispersiva fija y atenuación de la matriz del fondo variable.

A continuación se realiza un resumen de las principales tareas ordenadas por capítulos así como de las conclusiones más relevantes que se obtiene de cada uno de los capítulos que forman la presente tesis. Se muestra además una reflexión acerca de las futuras líneas de trabajo que puedan derivar de esta tesis.

## 7.2. Conclusiones

### ▪ Capítulo 1:

En el primer capítulo de esta tesis se ha realizado una introducción acerca de los ensayos no destructivos por ultrasonidos y se han sentado las bases y definido los principales conceptos con el objetivo de introducir al lector en la temática general del presente trabajo. En este capítulo se ha presentado además una pequeña guía que resume los principales aspectos que se desarrollan en cada uno de los capítulos que preceden a éste introductorio.

### ▪ Capítulo 2:

En la primera parte del capítulo 2 se han descrito las ecuaciones que modelan en el dominio temporal y frecuencial la señal registrada mediante inspección ultrasónica. Centrándonos en el dominio de la frecuencia, la envolvente del pulso ultrasónico ha sido modelada por una envolvente gaussiana. Tomando como caso ejemplo los materiales dispersivos blandos se ha modelado y parametrizado, usando leyes de potencia, los efectos sobre el citado pulso ultrasónico debidos por un lado a la atenuación por absorción y por otro a la dispersión estocástica. Se han llegado a una serie de relaciones útiles que definen la amplitud, ancho de banda y pulsación central del pulso ultrasónico en dependencia con el valor de penetración del pulso en el material. Se ha contrastado además mediante simulación el bajo error que se produce en el modelado del citado pulso usando una envolvente gaussiana. Es importante resaltar la utilidad de desarrollar un modelo teórico ya que éste nos aporta la capacidad de generar modelos de material cuyas características (parámetros) son conocidos, así como la flexibilidad de generar señales que simulan diferentes tipos de materiales mediante la variación de dichos parámetros.

En la segunda parte del capítulo 2 se ha realizado una revisión del actual estado de la técnica y se han descrito los métodos más comúnmente utilizados para llevar a cabo el análisis espectral no estacionario de la señal registrada. Se decide usar el espectrograma por su simplicidad y debido a que el objetivo de la presente tesis es el de comparar diferentes diagramas tiempo-frecuencia. No obstante en aquellas aplicaciones que se desarrollan en el grupo, como es el caso de procesamiento de señales submarinas donde es crítica la resolución espacio-temporal, es necesario el uso de otro tipo de transformadas con más resolución. La distribución Wigner Ville es un tipo de transformada que

presenta una gran resolución espacio-temporal a la vez que presenta gran cantidad de términos interferentes que en muchos casos dificultan la correcta interpretación del TFR, por esta razón de manera paralela al desarrollo de la tesis se ha investigado en esta línea obteniendo un método innovador con el objetivo de eliminar artefactos en transformadas ruidosas. Al final de este apartado se muestran las conclusiones que derivan de este estudio el cual ha sido presentado en el apéndice A.

■ **Capítulo 3:**

Sentadas las bases del modelo con el que vamos trabajar, en el capítulo 3 se ha presentado el método que ha sido utilizado para la extracción de características a partir de diagramas tiempo-frecuencia. Se ha presentado y formulado una colección de parámetros geométricos y descriptores de forma que, aplicados a la imagen correspondiente al TFR, permiten obtener parámetros que están relacionados con ciertas características físicas del material bajo prueba. Se ha demostrado matemáticamente, usando a modo de ejemplo el estimador *area*, cómo un descriptor geométrico tan sencillo se relaciona directamente con parámetros del modelo que a su vez se relacionan con aspectos físicos de un material. Algunos de los descriptores presentados se calculan a partir de la imagen correspondiente al TFR binarizada, es por esto que en la primera parte del capítulo se han presentado diferentes opciones para la binarización de este tipo de diagramas, concluyendo en la utilidad de usar un umbral mixto con la profundidad. Se concluye que el umbral mixto ha de ser variable, con la profundidad, en aquellas zonas donde el nivel de señal es mayor al del ruido y fijo para niveles de señal comparables al ruido con el objetivo de eliminar el *jitter* que aparece por efecto del ruido en el proceso de binarización de la imagen.

Además de los descriptores presentados para analizar la forma del TFR, se han presentado un conjunto de estimadores derivados de la frecuencia que se han venido usando de manera convencional en el GTS. Se han propuesto también ciertas modificaciones, usando técnicas sencillas de tratamiento de imagen, con el objetivo de disminuir la vulnerabilidad de los descriptores convencionales frente al ruido de observación.

■ **Capítulo 4:**

En el capítulo 4 se ha presentado un simulador que ha sido programado con la intención de contrastar en base a señales simuladas la funcionalidad, en términos de sesgo y varianza, del conjunto de estimadores derivados de la frecuencia convencionales en comparación con sus versiones modificadas. Variando diferentes parámetros del modelo se han generado señales que simulan dos tipos de materiales dispersivos blandos: en primer lugar se han simulado materiales dispersivos blandos en los que se ha mantenido fijo el valor de atenuación de la matriz base del material y en los que se ha ido variando el tamaño medio de los dispersores que componen la microestructura del material y en segundo lugar se han simulado materiales dispersivos blandos en los que se ha mantenido fijo el tamaño medio de dispersor variando la

atenuación del fondo. Además, las simulaciones han sido llevadas a cabo en diferentes condiciones de ruido de observación. En base a los resultados de este capítulo no se puede asegurar una mejora generalizada de los estimadores  $\omega_{max}^{mod}$  y  $BW_{\%}^{mod}$  con respecto a sus correspondientes convencionales ya que aunque sí que se aprecia cierta reducción de la varianza y el sesgo, en muchos casos no se puede generalizar dicha mejora para todos los tipos de materiales probados. Por otro lado, se ha demostrado que el estimador  $\omega_c^{mod}$  sí que aporta una clara mejora con respecto al estimador  $\omega_c$ .

De esta forma, en el capítulo 4 se concluye la necesidad de contrastar los resultados presentados en base a señales procedentes de piezas reales.

■ **Capítulos 5 y 6:**

Por lo comentado en el último párrafo del punto anterior, en el capítulo 5 se muestran los resultados de aplicación del conjunto de estimadores presentados en el capítulo 3 a un conjunto de materiales dispersivos blandos con atenuación del fondo fija y tamaño de dispersor variable. En la misma línea, en el capítulo 6 se muestran los resultados de aplicación del conjunto de parámetros pero en este caso sobre materiales dispersivos blandos donde se ha mantenido fijo el tamaño de los dispersores que componen la microestructura del material y se ha variado la atenuación del fondo. Tanto en el capítulo 5 como en el capítulo 6 se describe el equipamiento del que se ha dispuesto para la medición de las piezas así como el proceso completo para la creación del conjunto de probetas a evaluar.

A partir de los resultados del capítulo 5 se puede corroborar la mejora del estimador  $\omega_c^{mod}$  con respecto a su equivalente convencional y se puede resaltar la utilidad de los resultados proporcionados por el estimador modificado para la caracterización de los materiales en las cuatro categorías evaluadas. Con respecto al resto de estimadores derivados de la frecuencia se muestra cómo los estimadores  $BW_{\%}^{mod}$  y  $\omega_{max}^{mod}$  presentan menos varianza que sus equivalentes  $BW_{\%}$  y  $\omega_{max}$ , respectivamente. Se ha concluido que los resultados de la aplicación de estimadores  $\omega_{max}$  y  $BW_{\%}$  no son satisfactorios a la hora de poder clasificar los materiales en diferentes categorías en cuanto a tamaño medio de dispersor se refiere. No obstante, las versiones modificadas, a pesar de no poder realizar la clasificación en todas las categorías propuestas permiten intuir de manera más clara una clasificación burda de las probetas bajo análisis. Con respecto a los resultados obtenidos de la aplicación del conjunto de estimadores geométricos y de forma es importante resaltar que los estimadores *area* y *orientacion* permiten clasificar de manera clara las piezas de test en dos categorías (tamaño medio de dispersor pequeño y grande). Por otro lado, los estimadores *excentricidad* y *SC* proporcionan mejores resultados ya que permiten distinguir las cuatro categorías evaluadas en cuanto al valor del parámetro  $\bar{D}$ .

En el capítulo 6 se han evaluado dos juegos diferentes de materiales dispersivos blandos. Ambos juegos emulan materiales dispersivos blandos con microestructura dispersiva similar en los que se ha ido variando el valor de la atenuación del fondo. El primer juego constituye un experimento controlado

puesto que se conoce exactamente la distribución de tamaños y cantidad de dispersores que se han mantenido fijo en todas las piezas. El segundo juego constituye un experimento menos controlado puesto que, aunque se ha intentado mantener fija la distribución de dispersores de todas las piezas, los dispersores fueron emulados mediante burbujas de aire generadas mediante un proceso de agitación mecánica. Se ha mostrado un ejemplo en el que los estimadores clásicos derivados de la frecuencia no permiten la correcta caracterización del tipo de materiales bajo análisis. En contraste, de los resultados que se muestran en este capítulo se concluye que los descriptores geométricos *area*, *orientacion*, *excentricidad* y *SC* permiten la correcta clasificación de todos los materiales procesados. Además, los citados descriptores proporcionan resultados prometedores incluso para aquellos materiales cuya microestructura dispersiva se ha generado de manera menos controlada.

A partir de lo expuesto para los capítulos 5 y 6 se puede concluir que el conjunto de descriptores geométricos y de forma presentados en esta tesis son válidos para clasificar materiales dispersivos blandos. Bien sea materiales con diferente valor de atenuación del fondo y microestructura dispersiva fija o bien sea materiales dispersivos con atenuación del fondo fija y microestructura dispersiva variable.

#### ■ Apéndice A:

Finalmente en el apéndice A se han presentado dos métodos que se basan en el uso de operadores morfológicos con el objetivo de eliminar artefactos en distribuciones tiempo-frecuencia ruidosas. La validez de ambos métodos se ha contrastado en base a señales sintéticas y señales reales de aplicaciones en las que el GTS está trabajando actualmente. Además se ha contrastado la funcionalidad de ambos métodos en comparación con otras técnicas propuestas en el mismo campo. El primero de los métodos, al que hemos llamado RCCR, se basa en la reconstrucción por dilatación geodésica y proporciona buenos resultados siempre y cuando las señales procesadas no contengan términos muy próximos en el espacio tiempo-frecuencia. Con el objetivo de eliminar la limitación de éste primer método se introduce el método  $\lambda$ -RCCR que se basa en la reconstrucción por  $\lambda$ -dilatación geodésica. Ha quedado demostrado mediante diferentes ejemplos que este método abarca el caso anterior puesto que para valores de  $\lambda=0$  su operación es la misma que la de la reconstrucción por dilatación geodésica. Se ha presentado además un método para obtener el valor de  $\lambda_{optimo}$  partiendo de señales sintéticas y se concluye que usando un valor de  $\lambda = \lambda_{optimo}$  el método es capaz de reducir interferencias de manera correcta incluso en aquellos casos donde el ruido solapa o interfiere con los términos de señal. También se ha demostrado la utilidad del método  $\lambda$ -RCCR para eliminar ruido e interferencias de otros tipos de distribuciones tales como la Choi Williams o la Margenau Hill.

### 7.3. Líneas futuras

- En cuanto al modelo matemático que se define en el capítulo 2 se podría ampliar y generalizar éste de forma que abarque también el caso de materiales dispersivos no blandos. Este modelo más general recogería todo el rango de aplicaciones que actualmente se desarrollan en el GTS. De esta forma, mediante simulación se podría validar la utilidad de los nuevos descriptores presentados para dar respuesta a un mayor abanico de problemas. Como paso posterior a este último se podría ampliar la fase de pruebas a señales reales procedentes de otro tipo de materiales tales como cerámicas arqueológicas o pastas de hormigón, entre otras.
- En cuanto a la aplicación a materiales dispersivos blandos, diferentes a los generados en un entorno de laboratorio, se podría trabajar en la caracterización de diferentes compuestos tales como emulsiones ya que éstas son afines al modelo descrito en la presente tesis. La mayoría de las emulsiones múltiples aceite/agua/aceite y agua/aceite/agua encuentran aplicaciones en cosmética, farmacia e industria alimenticia, constituyendo tanto la medicina como la tecnología de alimentos campos claros de aplicaciones potenciales [55, 56].
- Finalmente resaltar una vez más los resultados que derivan del apéndice A como una prometedora línea de trabajo. Esta línea de trabajo ha quedado abierta y sería de gran utilidad su profundización en futuros estudios. Se ha constatado en la práctica [33, 35] la utilidad de las técnicas propuestas para la limpieza de diagramas en diferentes aplicaciones recientemente abordadas por el GTS; citar a modo de ejemplo el estudio y caracterización de señales submarinas en colaboración con la Ciudad de las Artes y las Ciencias (Oceanográfico) de Valencia.

## Capítulo 8

# Publicaciones

En el presente capítulo se presentan las principales publicaciones así como las contribuciones en congresos que se han realizado durante el desarrollo de la presente tesis.

En la primera sección se muestran las publicaciones en la temática que se relaciona directamente con el contenido de la tesis.

En la segunda sección se presentan otras publicaciones que se han realizado de manera paralela al desarrollo de la tesis dentro de las líneas de investigación que se desarrollan en el GTS.

### 8.1. Publicaciones más relevantes para el desarrollo de la tesis

#### 8.1.1. Revistas

- L. Vergara, R. Miralles, J. Gosálbez, I. Bosch, S. Gómez, J. Moragues y A. Serrano. Firma ultrasónica: un concepto de procesado de señal para la caracterización de materiales. *Boletín Informativo END*, Volumen 40, páginas 26-38. 2007.
- J. Gosálbez, J. Moragues, A. Salazar y S. Gómez. Modelado digital del pulso ultrasónico para la caracterización de roca ornamental. *Revista Mundo eléctrico*, páginas 4. 2007.
- V. Naranjo, J. Angulo, A. Albiol, J. M. Mossi, Al. Albiol, y S. Gómez. Gradual transition detection for video partitioning using morphological operators. *Image Analysis and Stereology*, volumen 6, número 2, páginas 51-99. 2007
- S. Gómez, R. Miralles, V. Naranjo y I. Bosch. Geometrical feature extraction from ultrasonic time frequency responses: An Application to Nondestructive

Testing of Materials. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, volumen 2010, article ID 706732, 10 páginas, 2010.

- S. Gómez, V.Naranjo y R. Miralles. Removing interference components in time-frequency representations using morphological operators. *Journal of Visual Communication and Image Representation Elsevier*, 20 páginas. Enviado. Julio de 2010.

### 8.1.2. Congresos internacionales

- S. Gómez, V.Naranjo, A. Albiol y J.M Mossi. Extracting random vibration components from global motion vectors. *5th International Conference on Visualization, Imaging and Image Processing*. Benidorm (España), 2005.
- S. Gómez, V. Naranjo y R. Miralles. An application of morphologic filters to remove non-linear distortions from time-frequency representations of acoustic signals. *19th International Congress on Acoustics (ICA07)*. Madrid (España), 2007.
- R. Miralles, S. Gómez, V. Naranjo y A. Salazar. Geometrical feature extraction from ultrasonic time frequency images: an application to nondestructive testing of materials. *16th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2008)*. Lausanne, 2008.
- I. Bosch, S. Gómez, R. Molina y R. Miralles. Object discrimination by infrared image processing. *3rd International Work-Conference on the Interplay between Natural and Artificial Computation (IWINAC 2009)*. Santiago de Compostela (España), 2009.

## 8.2. Otras publicaciones

### 8.2.1. Revistas

- I. Bosch, S. Gómez and L. Vergara. A ground system for early forest fire detection based on infrared signal processing. *International Journal of Remote Sensing*. ISSN: 1366-5901 (Electronic) 0143-1161 (Paper). Aceptado pendiente de publicación. Mayo 2010.

### 8.2.2. Congresos

- S. Gómez y V. Naranjo. Movie Restorer: Herramienta software para la restauración de películas antiguas. *XX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio(URSI 2005)*. Gandía (España) 2005.



- 
- V.Naranjo, S. Gómez, A. Albiol y J. M. Mossi. Grain noise reduction using human visual system characteristics. *14th European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2006)*. Florencia (Italia) 2006.
  - I. Bosch, S. Gómez, L. Vergara y J. Moragues. Infrared image processing and its applications to forest fire surveillance. *IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance*. Londres, 2007.
  - I. Bosch, S. Gómez y L. Vergara. Automatic forest surveillance based on infrared sensors. *International Conference on Sensor Technologies and Applications*. Valencia (España), 2007.



## Apéndice A

# Reducción de artefactos en diagramas tiempo-frecuencia usando morfología matemática

### A.1. Presentación

Tal y como se documentó en el capítulo 2, concretamente en el apartado 2.3, en la presente tesis se han estudiado y desarrollado técnicas para eliminar interferencias en un diagrama tiempo-frecuencia usando operadores morfológicos.

Hay transformadas tiempo-frecuencia, como es el caso de la transformada Wigner Ville que además de satisfacer interesantes propiedades matemáticas [29, 31, 32, 57, 58, 59] presentan gran selectividad en tiempo y frecuencia (simultáneamente). El problema de esta transformada es la presencia de gran cantidad de componentes cruzadas interferentes cuando es aplicada a señales multicomponente.

El principal objetivo de este anexo es describir el proceso para conseguir un tipo de representación, sin componentes cruzadas (como es el caso del espectrograma) y que a la vez pueda ser preciso y selectivo en el espacio tiempo-frecuencia (como es el caso de la transformada Wigner Ville). En este anexo se presenta un método innovador para la eliminación de componentes cruzadas que preserva la resolución tiempo-frecuencia del diagrama bajo análisis. Para conseguir este fin se realiza un postprocesado de la TFR, que se basa en el uso de operadores morfológicos.

## A.2. Estado de la técnica

Como ya se comentó en el capítulo 2 la estructura de interferencias de la distribución Wigner Ville, así como sus propiedades, han sido objeto de numerosos estudios [59, 60].

Diferentes estudios, en el campo de la eliminación de interferencias de la WVD han supuesto un enorme beneficio a la hora de trabajar con señales multicomponente.

Debido a que los términos de interferencia son componentes oscilatorias, estudios previos en este campo están orientados al uso de operadores de suavizado (*smoothing*). Estos estudios se basan en la convolución de la WVD con un núcleo o ventana de suavizado 2-D [60, 61]. La clase de Cohen abre una importante línea de trabajo para el suavizado de la WVD aunque el diseño de un núcleo adecuado es una tarea compleja. Muchos artículos científicos han sido publicados en esta línea con el objetivo de atenuar las componentes de la citada distribución intentando preservar tanto las resoluciones espacio temporales como las propiedades matemáticas de la transformada. A modo de ejemplo se puede citar [62] donde la selección del núcleo más adecuado se consigue procesando la imagen correspondiente a la función de ambigüedad. Otras propuestas relacionadas con el diseño del núcleo adecuado para realizar la convolución se recogen en [63] y [64]. El principal problema de este tipo de técnicas es que la selección de la ventana depende de las características de cada tipo de señal.

El método presentado en [65], reduce las componentes cruzadas combinando la expansión de la serie de Fourier-Bessel con la distribución Wigner Ville. La expansión de Fourier-Bessel descompone una señal multicomponente en diferentes señales monocomponente, de esta forma la distribución Wigner Ville puede ser aplicada a cada una de las señales monocomponente por separado. Por este motivo, el método presentado en el citado artículo representa una herramienta potente para eliminar componentes de la distribución Wigner Ville (recordar que los términos de interferencia se producían debido a los productos cruzados en señales multicomponente). No obstante, el método tiene una restricción y es la asunción acerca de la separación espacio-temporal de las componentes, que se supone satisfactoria. Si esta separación no es suficiente el método no funcionará correctamente, tal y como se verá en el apartado A.4.2 de este anexo.

Otros métodos alternativos para reducción de componentes cruzadas y que se basan en el uso de tratamiento digital de imagen son [66] y [67], los cuales asumen un conocimiento previo de la geometría de las interferencias.

En este anexo se presenta también un método útil para la eliminación de componentes cruzadas de la Wigner Ville [35, 33] y otras distribuciones con diferente geometría de interferencia [35]. En el método presentado se mejora la principal desventaja del método [65] de forma que también se eliminan componentes cruzadas en aquellos casos en que éstas se solapan con las componentes de señal (por ejemplo cuando las componentes no están suficientemente separadas en frecuencia). Se introducen operadores morfológicos para eliminar componentes de interferencia y

también compararemos los resultados de nuestro método con los presentados en [65].

### A.3. Operadores morfológicos

La idea básica del método propuesto es la aplicación de operadores morfológicos a imágenes correspondientes a TFRs ruidosos con la intención de reducir las componentes interferentes o ruidosas de éstos, preservando la resolución del diagrama original. La idea es recuperar sólo las componentes de señal que aparecen en el diagrama tiempo-frecuencia de la transformada con mayor resolución (la Wigner Ville por ejemplo) y también están presentes en el espectrograma. Nuestro método se basa en un operador morfológico geodésico denominado reconstrucción por  $\lambda$ -dilatación geodésica. Para describir este operador y nuestro método completo comenzaremos por presentar brevemente unas nociones básicas de la morfología matemática, a continuación pasaremos a definir el operador base de nuestro método y finalizaremos presentando el método completo.

#### A.3.1. Operadores morfológicos básicos

La morfología matemática es un procesado no lineal basado en los operadores máximo (o supremo) y mínimo (o ínfimo) [68, 69].

Antes de pasar a definir los operadores básicos de la morfología, vamos a presentar una serie de notaciones necesarias. Aunque la morfología matemática se inició con imágenes binarias utilizando definiciones de teoría de conjuntos, posteriormente fue extendida para imágenes de grises. Dada la mayor simplicidad de la notación utilizada para este tipo de imágenes y la mayor generalidad de las definiciones (ya que una imagen binaria puede verse como una imagen de gris con tan sólo dos niveles), pasaremos a enunciar los operadores morfológicos para imágenes de grises.

Así pues denotamos una imagen de gris como  $f$  ( $f \in \mathcal{F}\{E, \mathcal{T}\}$ ) tal que

$$f(\mathbf{x}) : E \rightarrow \mathcal{T}$$

donde  $\mathbf{x} \in E$  es la posición del píxel y  $\mathcal{T} \subset \mathbb{Z}$  or  $\mathbb{R}$  representa el nivel de gris de cada píxel (generalmente para imágenes de 8 bits tenemos que  $\mathcal{T} = \{0..,255\}$ ).

Definamos ahora un elemento estructurante,  $B_{\mathbf{x}}$ , centrado en el píxel  $\mathbf{x}$  donde  $B$  es un subconjunto de  $\mathbb{Z}^2$ .

En este momento podemos pasar a definir los operadores morfológicos básicos: la erosión y la dilatación. Ambos operadores son transformaciones definidas en  $\mathcal{F}(E, \mathcal{T}) \rightarrow \mathcal{F}(E, \mathcal{T})$  de la siguiente forma:

- Erosión:

$$\varepsilon_B(f)(\mathbf{x}) = \{f(\mathbf{y}) : f(\mathbf{y}) = \inf[f(\mathbf{z})], \mathbf{z} \in B_{\mathbf{x}}\}.$$

El operador calcula el mínimo nivel de gris (ínfimo) para cada píxel  $\mathbf{x}$  de la imagen  $f$  dentro de la ventana de observación definida por  $B$ , y centrada en el punto  $\mathbf{x}$ .

- Dilatación:

$$\delta_B(f)(\mathbf{x}) = \{f(\mathbf{y}) : f(\mathbf{y}) = \sup[f(\mathbf{z})], \mathbf{z} \in B_{\mathbf{x}}\}.$$

El operador calcula el máximo nivel de gris (supremo) para cada píxel  $\mathbf{x}$  de la imagen  $f$  dentro de la ventana de observación definida por  $B$ , y centrada en el punto  $\mathbf{x}$ .

Las anteriores definiciones son ciertas si consideramos un elemento estructurante plano, es decir, sólo nos interesará su forma y tamaño actuando como sonda en el entorno del píxel a analizar siendo determinante en la operación concreta a realizar.

Introducidos el operador dilatación y erosión, estamos en condiciones de definir los operadores cierre y apertura, respectivamente, de la forma:  $\varphi_B = \varepsilon_B(\delta_B(f))$  y  $\gamma_B = \delta_B(\varepsilon_B(f))$ .

Los operadores cierre y apertura suavizan funciones de manera no lineal. Cuando aplicamos el operador apertura a una imagen, los objetos claros o partes claras de objetos donde no cabe el elemento estructurante,  $B$ , son eliminados. El cierre es el operador dual de la apertura, es decir, funciona de la misma forma que la apertura pero sobre zonas oscuras de la imagen. Un ejemplo que ilustra el funcionamiento de la apertura aparece en la figura A.1.a y A.1.b. El operador apertura ha sido aplicado a una imagen usando como elemento estructurante un cuadrado de tamaño  $11 \times 11$ . Si observamos las citadas figuras podemos apreciar que los círculos, pequeños objetos claros con tamaño inferior al cuadrado de lado 11, han sido eliminados. En el caso opuesto, aquellos objetos claros donde el elemento estructurante sí ha cabido no han sido eliminados, sin embargo su forma original no se ha preservado después de aplicar el operador morfológico.

Nuestro interés se centra sin embargo en eliminar aquellos objetos claros, indicados por el elemento estructurante (componentes interferentes), pero preservando la forma original del diagrama (autocomponentes).

Para este fin se introducen los operadores reconstrucción por dilatación geodésica y  $\lambda$ -dilatación geodésica. Estos dos nuevos operadores que presentaremos en la sección siguiente, pertenecen a un tipo de transformaciones llamadas geodésicas [68, 69, 70, 71]. Una transformación geodésica es la aplicación de un operador morfológico, por ejemplo la dilatación (o la erosión), a una imagen  $g$  llamada imagen marcador forzando además a que el resultado permanezca menor (o mayor) a una imagen  $f$  llamada de referencia (o máscara).

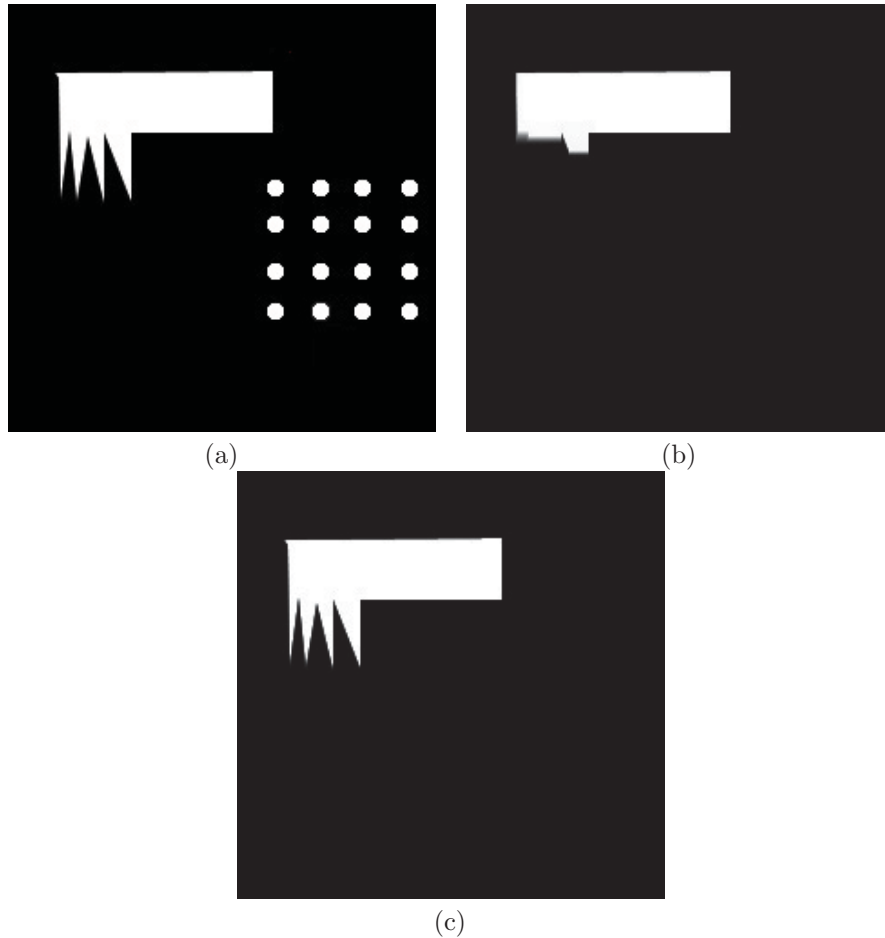


Figura A.1: (a) Imagen Original. (b) Resultado de aplicar la apertura usando como elemento estructurante un cuadrado de lado 11; (c) Resultado de aplicar la reconstrucción morfológica por dilatación usando como máscara la figura a y como marcador la figura b.

### A.3.2. La reconstrucción morfológica por dilatación geodésica

Sea  $f$  la imagen de referencia y  $g$  la imagen marcador ( $f$  y  $g \in \mathcal{F}\{E, \mathcal{T}\}$  y además  $g \leq f$ ). La dilatación geodésica unitaria de la imagen marcador  $g$  con respecto a la imagen de referencia  $f$  se denota como  $\delta_f^{(1)}(g)$  y se define como el mínimo punto a punto entre la imagen de referencia y la dilatación unitaria  $\delta^{(1)}$ , que consiste en una dilatación con la bola unitaria en la trama discreta (4 u 8 vecinos) de la imagen marcador [71]:

$$\delta_f^{(1)}(g) = \delta^{(1)}(g) \wedge f.$$

La dilatación geodésica de tamaño  $n$  de la imagen marcador  $g$  con respecto a la imagen de referencia  $f$  se obtiene calculando  $n$  dilataciones geodésicas sucesivas de  $g$  con respecto a  $f$ :

$$\delta_f^{(n)}(g) = \delta_f^{(1)}[\delta_f^{(n-1)}(g)],$$

con  $\delta_f^{(0)}(g) = g$ .

La reconstrucción morfológica por dilatación geodésica de la imagen de referencia  $f$  desde el marcador  $g$ , es la dilatación geodesica de  $g$  con respecto a  $f$  hasta la convergencia, esto es:

$$R_f(g) = \delta_f^{(k)}(g),$$

donde  $k$  es tal que  $\delta_f^{(k)}(g) = \delta_f^{(k+1)}(g)$ .

La reconstrucción morfológica por dilatación geodésica reconstruye de la imagen de referencia aquellos objetos claros que son tocados en algún punto por la imagen marcador. Dichos objetos reconstruidos preservan en la imagen resultado la misma forma que tenían en la imagen original.

De la misma manera puede ser definido el operador dual, la reconstrucción morfológica por erosión geodésica, definiendo la erosión geodésica (usando erosiones en lugar de dilataciones y el máximo punto a punto entre el marcador erosionado y la referencia).

Vamos a usar la imagen de test del apartado anterior para mostrar el funcionamiento de este operador. La reconstrucción morfológica por dilatación ha sido aplicada usando la imagen A.1.a como máscara (imagen de referencia) y la imagen A.1.b como marcador, obteniendo el resultado que se aprecia en la figura A.1.c. Con este sencillo ejemplo, se puede apreciar cómo si seleccionamos el marcador adecuado, los objetos pequeños pueden ser eliminados (círculos) y no perdemos la geometría de los objetos que queremos preservar.

En la siguiente sección, sección A.4, se muestra un ejemplo de aplicación de este operador a la limpieza de interferencias presentes en la distribución Wigner Ville.

### A.3.3. La reconstrucción morfológica por $\lambda$ -dilatación geodésica

Tomando nuevamente  $f$  y  $g$  dos imágenes, la imagen de referencia y la imagen marcador respectivamente, que cumplen que  $g \leq f$ , denotamos la  $\lambda$ -dilatación geodésica unitaria de la imagen marcador  $g$  con respecto a la imagen de referencia  $f$  como  $\delta_{f,\lambda}^{(1)}(g)$  y la definimos como el mínimo punto a punto entre la imagen de referencia y la dilatación unitaria no plana  $\delta_\lambda^{(1)}$  de la imagen marcador, es decir:



$$\delta_{f,\lambda}^{(1)}(g) = \delta_{\lambda}^{(1)}(g) \wedge f$$

La dilatación unitaria  $\delta_{\lambda}^{(1)}$  representa la dilatación con una función estructurante unitaria no plana,  $b(\mathbf{x})$ , que es una función de grises  $b(\mathbf{x}) \in \mathcal{F}\{E, T\}$  donde todos sus elementos tienen el valor  $-\lambda$ , sobre el soporte  $B$ , es decir

$$b(\mathbf{x}) = \begin{cases} -\lambda & \mathbf{x} \in B \\ -\infty & \mathbf{x} \notin B \end{cases}$$

de tal forma que la dilatación  $\delta_{\lambda}^{(1)}$  está definida mediante la expresión:

$$\delta_{\lambda}^{(1)}(f) = \{f(\mathbf{y}) : f(\mathbf{y}) = \sup[f(\mathbf{z}) - \lambda], \mathbf{z} \in B_{\mathbf{x}}\}.$$

De la misma forma que en el apartado anterior, definimos ahora la  $\lambda$ -dilatación geodésica de tamaño  $n$  de la imagen marcador  $g$  con respecto a la imagen de referencia  $f$ , la cual se obtiene calculando  $n$   $\lambda$ -dilataciones geodésicas sucesivas de  $g$  con respecto a  $f$ :

$$\delta_{\lambda,f}^{(n)}(g) = \delta_{f,\lambda}^{(1)}[\delta_{f,\lambda}^{(n-1)}(g)],$$

con  $\delta_{f,\lambda}^{(0)}(g) = g$ .

La reconstrucción morfológica por  $\lambda$ -dilatación geodésica [72] de la imagen de referencia  $f$  desde el marcador  $g$ , es la  $\lambda$ -dilatación geodésica de  $g$  con respecto a  $f$  hasta la convergencia, esto es:

$$R_{f,\lambda}(g) = \delta_{f,\lambda}^{(k)}(g),$$

donde  $k$  es tal que  $\delta_{f,\lambda}^{(k)}(g) = \delta_{f,\lambda}^{(k+1)}(g)$ .

La diferencia entre la reconstrucción morfológica por dilatación geodésica y la reconstrucción morfológica por  $\lambda$ -dilatación geodésica es que en la primera, como vimos anteriormente, todas las zonas claras que son tocadas en algún punto por el marcador son reconstruidas totalmente (se reconstruyen con el nivel máximo del marcador en dicha zona), en cambio, en el caso de la segunda, sólo los píxeles que son tocados por el marcador serán reconstruidos con el valor máximo del marcador. Los píxeles conectados a los tocados por el marcador serán también reconstruidos pero con un nivel de intensidad que irá decreciendo con la distancia y con una pendiente igual a  $\lambda$  [73, 72].

De la misma manera puede definirse el operador dual reconstrucción morfológica por  $\lambda$ -erosión geodésica, la cual se comportará de la misma forma que la reconstrucción morfológica por  $\lambda$ -dilatación geodésica sobre las zonas oscuras de la

imagen. En nuestra aplicación será la reconstrucción por  $\lambda$ -dilatación geodésica el operador básico de nuestro sistema.

Vamos a usar ahora dos imágenes de test para mostrar de manera básica el funcionamiento del operador reconstrucción por  $\lambda$ -dilatación geodésica. Los resultados son los mostrados en las figuras A.2 y A.3. Ambas figuras pretenden mostrar cómo el operador puede eliminar interferencias de diagramas ruidosos donde los términos de señal y de interferencia no se solapan, pero además también sirve para eliminar interferencias de aquellos diagramas donde sí que existe tal solape. Ambas imágenes están compuestas por líneas rectas y líneas en zigzag. Consideramos las líneas en zigzag como interferencias y las líneas rectas como las autocomponentes de un diagrama ficticio. Además cuando los términos de interferencia (líneas zigzag) se solapan con los de señal (líneas rectas) el resultado que obtenemos de la reconstrucción dependerá del valor de  $\lambda$  elegido.

En la figura A.2 las líneas en zigzag no se solapan con las líneas rectas. Por contra, en la figura A.3 las líneas en zigzag sí que se solapan con las líneas rectas.

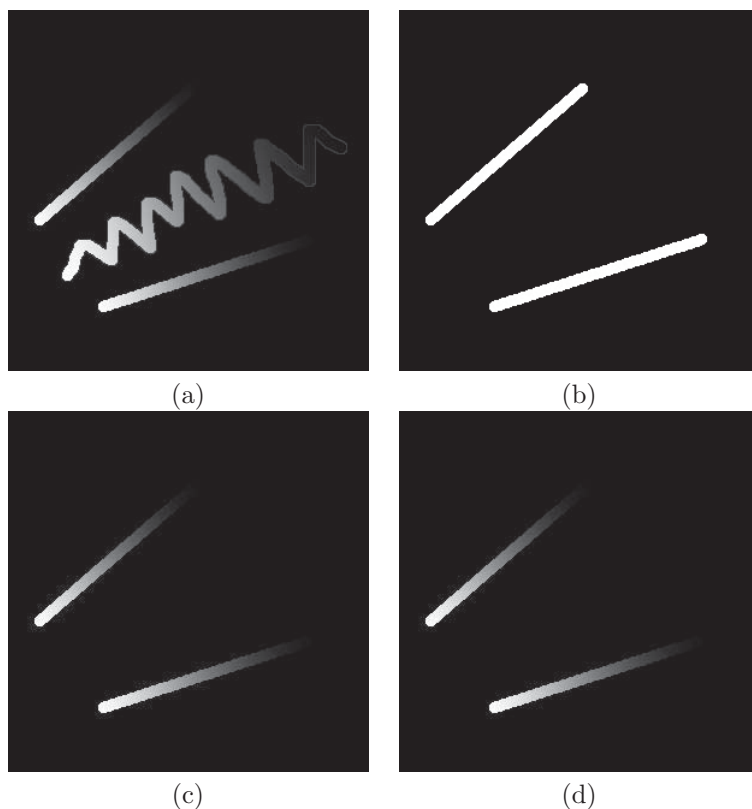


Figura A.2: (a) Imagen de referencia (máscara). (b) Marcador. (c) Resultado de la reconstrucción por dilatación geodésica ( $\lambda = 0$ ). (d) Resultado de la reconstrucción por  $\lambda$ -dilatación geodésica con  $\lambda = 15$ .

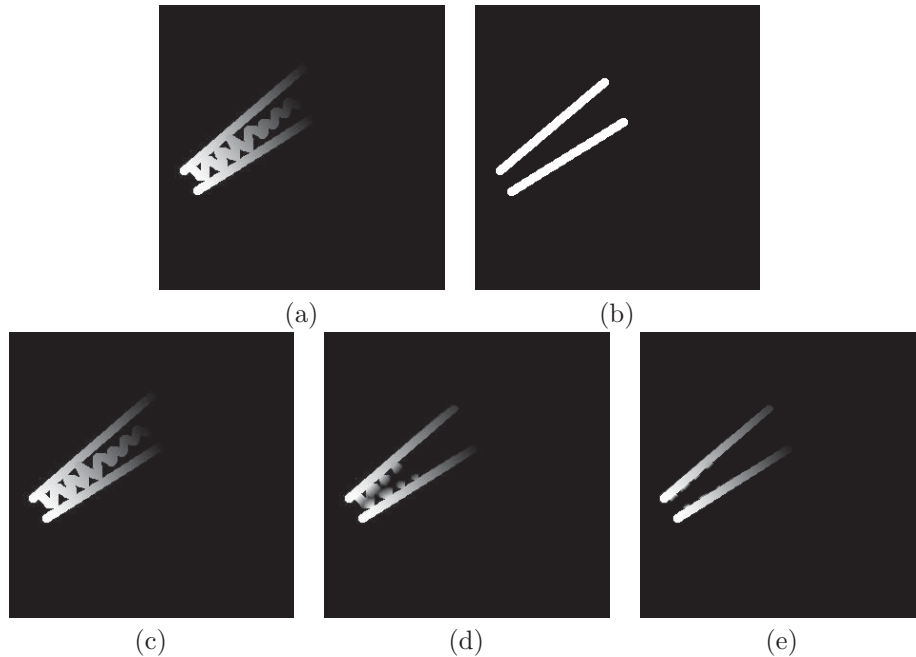


Figura A.3: (a) Imagen de referencia (máscara). (b) Marcador. (c) Resultado de la reconstrucción por dilatación geodésica ( $\lambda = 0$ ). (d) Resultado de la reconstrucción por  $\lambda$ -dilatación geodésica con  $\lambda = 15$ . (e) Resultado de la reconstrucción por  $\lambda$ -dilatación geodésica con  $\lambda = 30$ .

Si nos fijamos en la figura A.2, se puede observar como el operador es capaz de reconstruir sólo las líneas deseadas (líneas rectas). La imagen A.2.b ha sido usada como marcador para la reconstrucción morfológica aplicada sobre la imagen A.2.a. Las imágenes A.2.c y A.2.d han sido obtenidas usando el operador reconstrucción por  $\lambda$ -dilatación con valores de  $\lambda=0$  y  $\lambda=15$ , respectivamente. De la observación de estas figuras, figuras A.2.c y A.2.d, se puede concluir que cuando los términos de señal no interfieren con los de interferencia el resultado es independiente del valor de  $\lambda$  usado para realizar la reconstrucción. De hecho, ambos operadores de reconstrucción por dilatación geodésica coinciden cuando  $\lambda=0$ .

Si nos centramos en la figura A.3, ahora las líneas en zigzag sí que se solapan con las líneas rectas. La imagen A.3.b ha sido usada como marcador de la reconstrucción morfológica que se ha llevado a cabo sobre la imagen A.3.a. Usamos ahora la reconstrucción por  $\lambda$ -dilatación geodésica con valores de  $\lambda = 0$ ,  $\lambda = 15$  y  $\lambda = 30$  obteniendo, respectivamente, las imágenes que se pueden ver en las figuras A.3.c, A.3.d y A.3.e.

Podemos ver como el uso del operador reconstrucción por  $\lambda$ -dilatación geodésica con valores de  $\lambda = 0$  (es decir el operador reconstrucción por dilatación geodésica) no proporciona resultados satisfactorios ya que no consigue separar los términos de señal de las interferencias si las componentes se solapan. Sin embargo, si aumen-

tamos el valor de  $\lambda$  sí que somos capaces de eliminar las interferencias que solapan a los términos deseados, y que además conforme crece el valor de  $\lambda$  la intensidad de las interferencias disminuye. Más adelante se verá que existe una solución de compromiso en el valor de  $\lambda$ , ya que al aumentarlo para eliminar más componente interferente correremos el riesgo de perder también componentes deseadas de señal.

Si consideramos los dos ejemplos anteriores podemos concluir que: cuando los términos de señal y de interferencia no se solapan el resultado es independiente del valor de  $\lambda$  usado. Sin embargo, si existe solape entre el ruido y la señal el valor de  $\lambda$  debe aumentar. La correcta selección del valor de  $\lambda$  influirá decisivamente en la calidad de los resultados obtenidos.

En la sección A.4 se mostrarán los resultados de la aplicación de los operadores definidos para eliminar interferencias en diagramas procedentes de distribuciones ruidosas, WVD y otras, y además se discutirá acerca de la selección del valor de  $\lambda$  adecuado.

## A.4. Aplicación de operadores morfológicos a la reducción de artefactos en diagramas tiempo-frecuencia

### A.4.1. Aplicación de la reconstrucción por dilatación geodésica para eliminación de componentes interferentes de la transformada Wigner Ville

Una primera solución propuesta es el uso del operador reconstrucción por dilatación geodésica ( $R_f(g)$ ) para limpieza de diagramas procedentes del cálculo de la distribución Wigner Ville, tal y como se observa en la figura A.4, que presenta el diagrama de bloques del método que hemos llamado RCCR (del inglés *Reconstruction for Cross Component Removal*).

Tal y como se ha comentado en la sección anterior, las imágenes de partida del método son dos, la imagen de referencia  $f(\mathbf{x})$  y el marcador  $g(\mathbf{x})$  tal que  $(g(\mathbf{x}) \leq f(\mathbf{x}))$ . El bloque que calcula el ínfimo entre el marcador y la referencia asegura el cumplimiento de la citada desigualdad.

La resolución tiempo-frecuencia del espectrograma es menor que la de la distribución Wigner Ville pero las autocomponentes están centradas en la misma posición (comparando ambas transformadas), además el espectrograma no sufre de componentes cruzadas. Por esta razón usamos el espectrograma como marcador, de forma que así podamos reconstruir, a partir de la distribución Wigner Ville, sólo aquellas regiones, de la imagen correspondiente al diagrama, que no sean interferencias eliminando las componentes indeseadas porque no están presentes en la imagen usada como marcador.

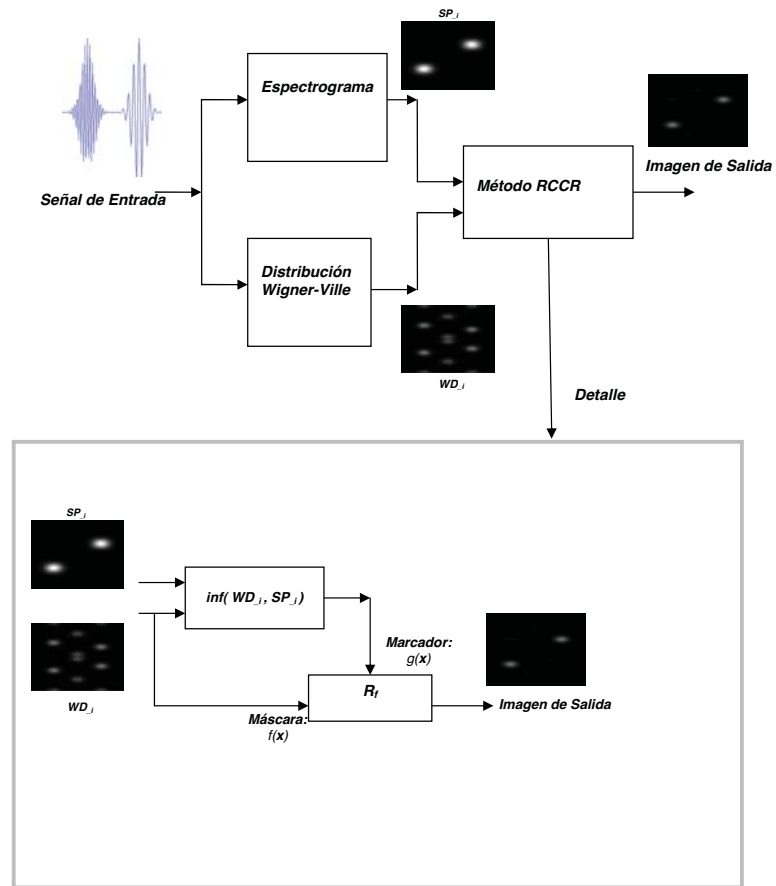


Figura A.4: Diagrama de bloques del método de limpieza de diagramas tiempo-frecuencia (método RCCR).

Recordar que la geometría de las autocomponentes se preservará al usar el operador reconstrucción (ver ejemplo de la figura A.1.c).

### Resultados de aplicación del método RCCR a limpieza diagramas interferentes.

Se presentan en este apartado algunos resultados interesantes. Se han seleccionado tres señales representativas con el fin de validar la operatividad del método propuesto: una señal chirp, una señal doppler y una señal submarina correspondiente al sonido producido por la hélice de un barco.

La expresión analítica de la señal de chirp es la siguiente:

$$CS = \prod((t - td)/T) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot [f_0 \cdot (t - td) + 0,5 \cdot K \cdot (t - td)^2]) + \\ + \prod((t - td_1)/T) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot [f_0 \cdot (t - td_1) + 0,5 \cdot K \cdot (t - td_1)^2]),$$

con las siguientes características: longitud del pulso chirp  $T = t_d = 6 \text{ ms}$ ,  $t_{d1} = 17.6 \text{ ms}$ , frecuencia central  $f_0 = 10 \text{ KHz}$ , chirp rate  $K = B/T$  y ancho de banda del pulso de  $B = 4000 \text{ Hz}$ .

Las imágenes correspondientes al espectrograma y WVD,  $SP_i$  y  $WD_i$ , se presentan en las figuras A.5.a y A.5.b, respectivamente. Si comparamos la figura A.5.c con la figura A.5.b es fácil observar que sólo las autocomponentes de la imagen  $WD_i$  han sido reconstruidas ya que éstas estaban presentes en la imagen usada como marcador,  $SP_i$ . Sin embargo los términos debidos al aliasing y las componentes cruzadas han desaparecido, ya que no estaban presentes en  $SP_i$ . No obstante, si se hubiera usado la señal analítica al calcular la WVD, los términos de aliasing no hubieran estado presentes.

Consideramos ahora una señal doppler de 256 puntos, frecuencia de muestreo de  $50 \text{ Hz}$ , frecuencia del blanco de  $13 \text{ Hz}$ , velocidad del blanco de  $200 \text{ m/s}$  y distancia desde el blanco al observador de 10 metros. Las imágenes  $SP_i$  y  $WD_i$  son las que se muestran en las figuras A.6.a y A.6.b, respectivamente.

Comparando la figura A.6.c con la figura A.6.b, se puede observar que las componentes cruzadas de la imagen  $WD_i$  han sido también correctamente eliminadas y que además se ha conservado la geometría original de las autocomponentes de la imagen  $WD_i$ .

Finalmente, se ha procesado la señal submarina correspondiente al sonido producido por la hélice de un barco. Las imágenes correspondientes con el espectrograma y la WVD,  $SP_i$  y  $WD_i$ , han sido representadas en las figuras A.7.a y A.7.b. En este caso los términos de interferencia se solapan con los términos de señal, por esta razón el operador apertura con reconstrucción no consigue un resultado óptimo y no puede eliminar las interferencias de forma correcta de la imagen  $WD_i$ . Comparando ahora las figuras A.7.c and A.7.b se puede observar cómo los términos de señal (autocomponentes) se pueden distinguir pero no se han podido

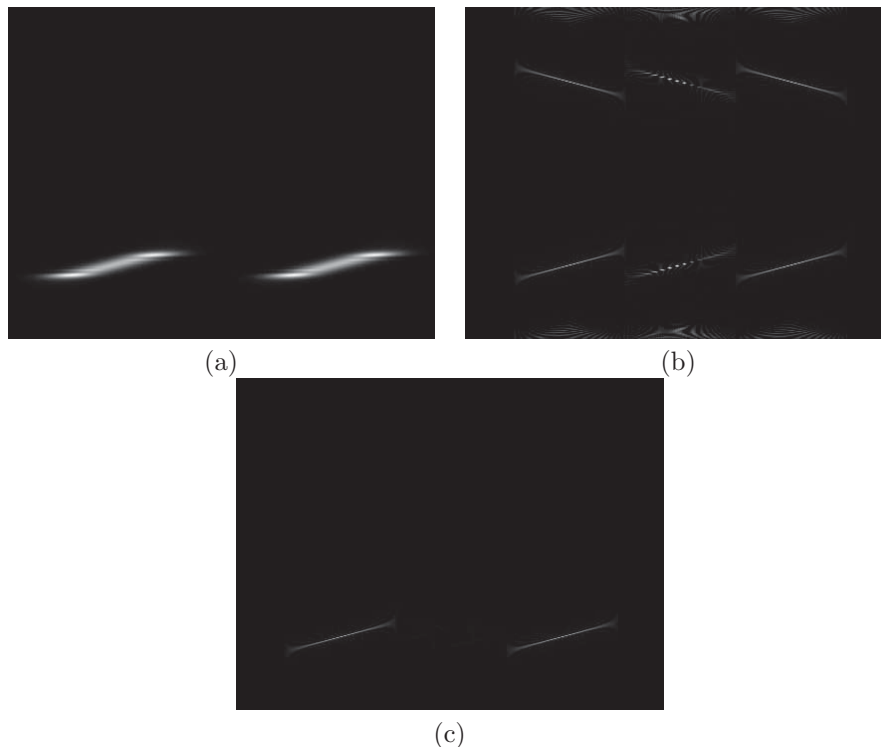


Figura A.5: (a)  $SP_i$  de CS. (b)  $WD_i$  de CS. (c) Resultado de aplicar la reconstrucción por dilatación geodésica a la señal CS.

eliminar completamente los términos de interferencia que se solapaban con los de señal.

Los resultados anteriormente expuestos demuestran la utilidad del operador analizado para eliminar interferencias de diagramas tiempo frecuencia interferentes. Además, puesto que la reconstrucción por dilatación geodésica es un operador independiente de la geometría de las interferencias, es predecible que funcione de manera idónea a la hora de eliminar interferencias de otro tipo de transformadas. Como contrapartida, los resultados no son tan alentadores cuando los términos interferentes se solapan con los de señal.

En el siguiente punto se presenta otro método, éste usa la reconstrucción por  $\lambda$ -dilatación geodésica como operador base. Se mostrará como éste elimina precisamente la desventaja del método anterior, puesto que permite eliminar interferencias incluso en aquellos casos donde los términos de señal y las interferencias se solapan. Además, se mostrará también la utilidad de éste operador para eliminar interferencias de otro tipo de transformadas diferentes de la WVD.

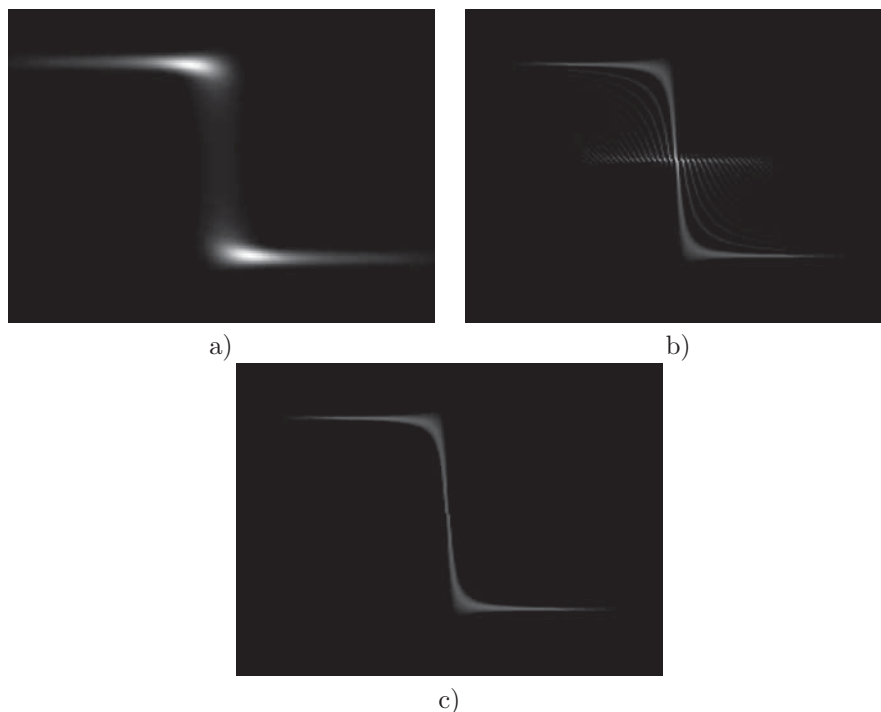


Figura A.6: (a)  $SP_i$  de la señal doppler. (b)  $WD_i$  de la señal doppler. (c) Resultado de aplicar la reconstrucción por dilatación geodésica a la señal doppler.

#### A.4.2. Aplicación de la reconstrucción por $\lambda$ -dilatación para la eliminación de componentes interferentes de diferentes tipos de transformadas.

El método para la limpieza de diagramas ruidosos, el cual hemos llamado  $\lambda$ -RCCR, es el que puede verse en la figura A.8. Este esquema se centra nuevamente en la idea de recuperar solamente los términos de señal de aquellas representaciones tiempo-frecuencia que presentan componentes ruidosas o interferentes. Nuevamente, una imagen binaria es obtenida a partir del diagrama correspondiente al espectrograma para asegurar la inclusión en el marcador de sólo aquellas componentes deseadas. En este caso se ha preprocesado el marcador para mejorar la selectividad del método. Con este fin vamos a usar el esqueleto del espectrograma como marcador (en lugar del espectrograma directamente) y la imagen correspondiente a la WVD (u otra distribución ruidosa) como imagen de referencia.

Para calcular el esqueleto del espectrograma se utiliza el esqueleto homotópico asociado a la iteración de la transformación morfológica de adelgazamiento de imágenes binarias (o *thinning*) [69, 71]. Esta transformación está basada en las transformaciones llamadas Hit-or-miss, las cuales eliminan puntos de un conjunto binario de acuerdo a un conjunto de plantillas pero preservando la homotopía



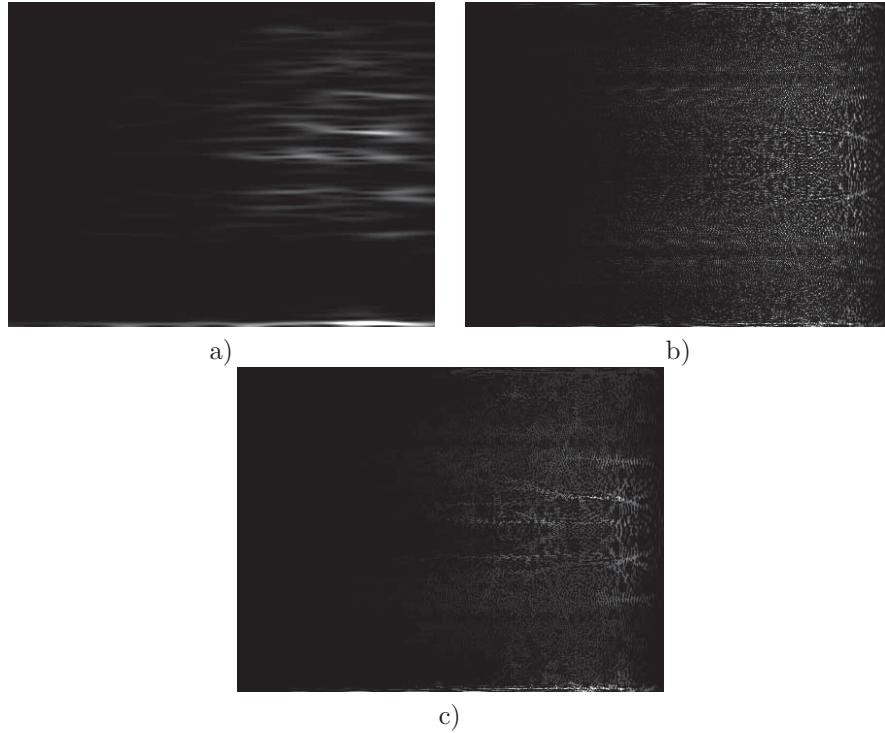


Figura A.7: (a)  $SP_i$  de la señal submarina. (b)  $WD_i$  de la señal submarina. (c) Resultado de aplicar la reconstrucción por dilatación geodésica a la señal submarina.

del conjunto. Este algoritmo de obtención del esqueleto no requiere parámetros adicionales.

Así pues, el esqueleto del espectrograma, obtenido de esta forma, contiene la mínima cantidad de información, suficiente para localizar cada punto no interferente de la señal, tanto en frecuencia como en tiempo, [68, 69, 74]. El esqueleto es una buena selección para ser usado como marcador ya que la resolución espacio-temporal del espectrograma es algo pobre, pero sin embargo sus componentes están localizadas en el mismo lugar que las componentes que nos interesa reconstruir de la WVD y otros tipos de transformadas ruidosas.

El método, acorde con el diagrama de la figura A.8, viene dado por el siguiente algoritmo:

- Se calcula el espectrograma de la señal de entrada obteniendo la imagen  $SP_i$ , también llamada en el diagrama,  $g_i(\mathbf{x})$ .
- Se calcula la transformada de la señal de entrada, por ejemplo la WVD y se obtiene la imagen  $WD_i$ , o imagen de referencia  $f(\mathbf{x})$ .
- La señal  $g_i(\mathbf{x})$  es preprocesada calculando el esqueleto homotópico del es-



$$error(\lambda_i) = \frac{|\sum_{\mathbf{x}} g(\mathbf{x}) - \sum_{\mathbf{x}} f_{r\lambda_i}^{skel}(\mathbf{x})|^2}{\sum_{\mathbf{x}} f_{r\lambda_i}^{skel}(\mathbf{x})} \quad (\text{A.1})$$

Cuando el diagrama ruidoso es reconstruido usando  $\lambda = \lambda_{optimo}$  el esqueleto del espectrograma es bastante similar al esqueleto del diagrama reconstruido. Esto es debido a que cuando se procesa el diagrama ruidoso con el  $\lambda$  adecuado desaparecerán todos los términos de interferencia los cuales no formarán parte del esqueleto de la señal restaurada. Por otro lado si la reconstrucción es correcta las componentes de señal permanecerán en su original posición contribuyendo al esqueleto de la señal restaurada de la misma manera que las componentes de señal contribuyen al espectrograma.

Cuando el diagrama ruidoso es reconstruido con un valor de  $\lambda < \lambda_{optimo}$  muchos términos interferentes seguirán apareciendo después de realizar la reconstrucción y esos términos interferentes contribuirán al esqueleto de la imagen reconstruida incrementando el valor de la función de error. Por otro lado, es predecible, que cuando la distribución ruidosa sea reconstruida con un valor de  $\lambda > \lambda_{optimo}$  todas las componentes interferentes serán eliminadas y éstas no contribuirán tampoco al esqueleto de la restaurada. Sin embargo, al aumentar  $\lambda$ , se introducirá un efecto secundario perjudicial, ya que también se eliminará información útil de señal que puede desaparecer del esqueleto del diagrama reconstruido incrementando nuevamente el valor de la función de error.

Para comprobar lo anteriormente comentado, vamos a usar tres señales para calcular numéricamente el valor de  $\lambda_{optimo}$ . Se calculará la WVD de cada una de estas señales y se aplicará el método  $\lambda$ -RCCR, según el esquema de la figura A.8, para diferentes valores de  $\lambda$  en el intervalo entre 0 y 100. Con el resultado obtenido se evaluará la función de error para cada uno de los diagramas reconstruidos con cada uno de los diferentes valores (ver ecuación (A.1)). El esqueleto del diagrama,  $f_{r\lambda_i}^{skel}(\mathbf{x})$ , que minimice la función de error nos proporcionará el  $\lambda_i = \lambda_{optimo}$ .

Las señales que se han usado han sido las siguientes:

- $x_3(t)$ : compuesta por dos modulaciones en frecuencia sinusoidales con frecuencias cercanas, es decir los términos de señal y los de interferencia se solaparán al aplicar la WVD. La primera modulación es una señal de  $N = 128$  puntos, con menor frecuencia normalizada de 0,25, mayor frecuencia normalizada de 0,35, periodo de 100, referencia de tiempo para la fase  $t_0 = 1$ , frecuencia normalizada para  $t_0$  de 0,25 y dirección en  $t_0$  de  $-1$ . La segunda modulación es la misma señal en la que la menor frecuencia normalizada es de 0,35, la mayor 0,45, con frecuencia normalizada en  $t_0$  de 0,35.
- $x_4(t)$  y  $x_5(t)$ : son dos señales acuáticas. La primera,  $x_4(t)$ , corresponde al sonido emitido por una beluga y la segunda es el ruido producido por las hélices de un barco y ya fue usada como ejemplo en el apartado A.4.1.

La figura A.9 muestra la evolución del error con  $\lambda$  al aplicar el método  $\lambda$ -RCCR a cada una de las señales descritas anteriormente y computando el error según la

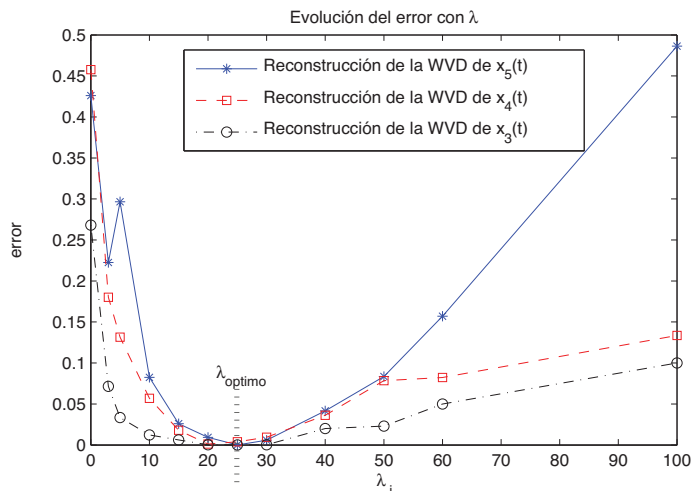


Figura A.9: Evaluando la función de error para diferentes valores de  $\lambda$

ecuación (A.1). La línea azul con “\*” corresponde a la evaluación de la función de error al aplicar el método  $\lambda$ -RCCR para la limpieza la WVD de la señal  $x_5(t)$ ; la línea roja con “□” corresponde a la evaluación de la función de error al aplicar el método  $\lambda$ -RCCR para la eliminación de interferencias de la WVD de la señal  $x_4(t)$  y la línea negra con “o” contiene la misma información pero en este caso para la señal  $x_3(t)$ .

Varias simulaciones han sido llevadas a cabo sobre diferentes señales de la misma naturaleza que las aquí presentadas y todas corroboran los resultados mostrados, proporcionando valores para  $\lambda_{optimo}$  cercanos a 25, y ese valor coincide con el obtenido de procesar las señales  $x_3(t)$ ,  $x_4(t)$  y  $x_5(t)$ . Por esta razón asumimos y generalizamos el valor  $\lambda_{optimo}=25$  para procesar este tipo de señales y generalizamos su uso a todas las señales que sean procesadas en este anexo.

En los siguientes puntos, se muestran varios ejemplos representativos de la aplicación del método  $\lambda$ -RCCR sobre un conjunto de señales de sintéticas y submarinas (reales), para eliminar interferencias de diagramas procedentes de la WVD y otras transformadas. Además también se comparan los resultados del método propuesto con aquellos obtenidos usando el método presentado en [65], que también trata de eliminar interferencias en diagramas procedentes del cálculo de la transformada Wigner Ville.

### Comparación del método del método $\lambda$ -RCCR con otros métodos.

El método propuesto en [65] ha sido probado para comparar los resultados propuestos por el autor con los obtenidos usando el método  $\lambda$ -RCCR. El método reduce componentes cruzadas combinando la expansión de Fourier-Bessel con

la distribución Wigner Ville. La expansión Fourier-Bessel descompone una señal multicomponente en un número de señales monocomponente [75], de forma que la WVD es aplicada a cada una de las señales monocomponente de manera independiente. En analogía con el método propuesto en [33] y los resultados mostrados en la sección A.4.1, el método que se propone en [65] es una herramienta muy potente cuando las componentes de señal están bien diferenciadas en tiempo y/o frecuencia, en caso contrario, el método no funciona de manera correcta tal cual se verá en éste apartado.

Para discutir este punto se muestran tres ejemplos representativos que usan las tres señales que se describen brevemente a continuación:

- $x_1(t)$ : compuesta por dos modulaciones lineales en frecuencia, cuyas componentes frecuenciales están suficientemente separadas. Concretamente, la primera modulación lineal es una señal de  $N = 128$  puntos con frecuencias inicial y final normalizadas de 0 y 0,2 respectivamente. La segunda modulación tiene el mismo número de puntos y como frecuencias inicial y final normalizadas de 0,35 y 0,45. Ambas señales tienen un tiempo de referencia para la fase de  $\frac{N}{2}$ .
- $x_2(t)$ : compuesta por dos modulaciones lineales en frecuencia, cuyas componentes frecuenciales son próximas. la primera modulación lineal es una señal de  $N = 128$  puntos con frecuencias inicial y final normalizadas de 0 y 0,4 respectivamente. La segunda modulación tiene el mismo número de puntos y como frecuencias inicial y final normalizadas de 0,2 y 0,5. Ambas señales tienen un tiempo de referencia para la fase de  $\frac{N}{2}$ .
- $x_3(t)$ : es la misma señal que se ha usado con el mismo nombre en el apartado A.4.2.

Las figuras A.10, A.11 y A.12 representan los resultados obtenidos de procesar las señales  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  y  $x_3(t)$ , respectivamente. En ellas se representan tanto los resultados del método propuesto en [65] como los resultados del método  $\lambda$ -RCCR.

Las figuras A.10.a, A.11.a, A.12.a representan los coeficientes de Fourier-Bessel de las tres señales,  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  y  $x_3(t)$ , respectivamente. Notar como aparentemente las dos componentes de cada una de las señales pueden ser correctamente diferenciadas. Una vez las dos principales componentes de cada una de las señales son separadas, podemos recuperar cada una de estas componentes por separado y calcular la WVD de cada una de ellas.

Las figuras A.10.c y A.10.d; A.11.c y A.11.d, y A.12.c y A.12.d, muestran la WVD de cada una de las dos componentes de manera separada.

Para el caso de aplicar el estudio sobre  $x_1(t)$  la figura A.10.e representa la suma de las dos imágenes A.10.c y A.10.d. En la misma línea, y ahora para  $x_2(t)$ , la figura A.11.e representa la suma de las dos imágenes A.11.c y A.11.d. Finalmente, para el caso de  $x_3(t)$ , la figura A.12.e representa la suma de las imágenes A.12.c y A.12.d.

Si observamos la figura A.10.e se puede comprobar el correcto funcionamiento del método [65] cuando es aplicado a  $x_1(t)$ , cuyas componentes están suficientemente espaciadas.

Por otro lado, cuando las componentes no están suficientemente espaciadas, ver figuras A.11.e y A.12.e, el citado método [65] no proporciona resultados satisfactorios, puesto que es difícil realizar de manera correcta la separación de componentes, y no se puede aplicar bien la WVD a cada componente de manera aislada.

Las figuras A.10, A.11 y A.12, (b, f, g, y h), muestran las imágenes que se usan y obtienen aplicando el método  $\lambda$ -RCCR. En las figuras A.10.b, A.11.b y A.12.b se representa el espectrograma de las tres señales  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  y  $x_3(t)$ , es decir  $g_{i1}(\mathbf{x})$ ,  $g_{i2}(\mathbf{x})$ , y  $g_{i3}(\mathbf{x})$ , respectivamente. Las figuras A.10.f, A.11.f y A.12.f representan el esqueleto de  $g_{i1}(\mathbf{x})$ ,  $g_{i2}(\mathbf{x})$ , y  $g_{i3}(\mathbf{x})$ , respectivamente, es decir representan  $g_1(\mathbf{x})$ ,  $g_2(\mathbf{x})$  y  $g_3(\mathbf{x})$  (los marcadores). Las figuras A.10.g, A.11.g y A.12.g representan  $f_1(\mathbf{x})$ ,  $f_2(\mathbf{x})$  y  $f_3(\mathbf{x})$ , respectivamente, es decir las imágenes de referencia para la operación morfológica, y que son las imágenes que corresponden a la WVD de las señales  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$  y  $x_3(t)$ . Finalmente las figuras A.10.h, A.11.h y A.12.h representan el resultado de aplicar el método  $\lambda$ -RCCR (usando  $\lambda=25$ ), es decir representan las imágenes reconstruidas de la distribución WVD y que llamaremos  $f_r^{WV1}(\mathbf{x})$ ,  $f_r^{WV2}(\mathbf{x})$  y  $f_r^{WV3}(\mathbf{x})$ .

Notar que las tres imágenes reconstruidas de la WVD, A.10.h, A.11.h y A.12.h, usando el método  $\lambda$ -RCCR contienen sólo la información deseada de esta distribución, preservando la resolución tiempo-frecuencia y sin términos interferentes. Por esta razón se pueden enfatizar la satisfacción de resultados usando el operador morfológico y el citado valor de  $\lambda$ , independientemente de la localización de las componentes de señal e incluso en aquellos casos donde el ruido interfiere con la señal a recuperar.

### Resultados de aplicación del método $\lambda$ -RCCR a la eliminación de interferencias de la WVD: aplicación a señales submarinas.

En esta sección se muestran los resultados de aplicar el método  $\lambda$ -RCCR para la eliminación de interferencias de la WVD de dos señales reales submarinas, ya descritas anteriormente, una señal del sonido emitido por una beluga,  $x_4(t)$ , y una señal procedente del sonido emitido por la hélice de un barco,  $x_5(t)$ .

Las figuras A.13.a y A.14.a son las imágenes correspondientes al espectrograma de las señales  $x_4(t)$  y  $x_5(t)$ , respectivamente. Las figuras A.13.b y A.14.b son los esqueletos de los diagramas correspondiente a dichos espectrogramas y que son usados como marcadores,  $g_4(\mathbf{x})$  y  $g_5(\mathbf{x})$ . Las figuras A.13.c y A.14.c representan la WVD de  $x_4(t)$  y  $x_5(t)$ , respectivamente. Las imágenes reconstruidas,  $f_r^{WV4}(\mathbf{x})$  y  $f_r^{WV5}(\mathbf{x})$ , son las representadas en las figuras A.13.d y A.14.d, respectivamente.

De los dos ejemplos descritos en el párrafo anterior (ver figuras A.13 y A.14)

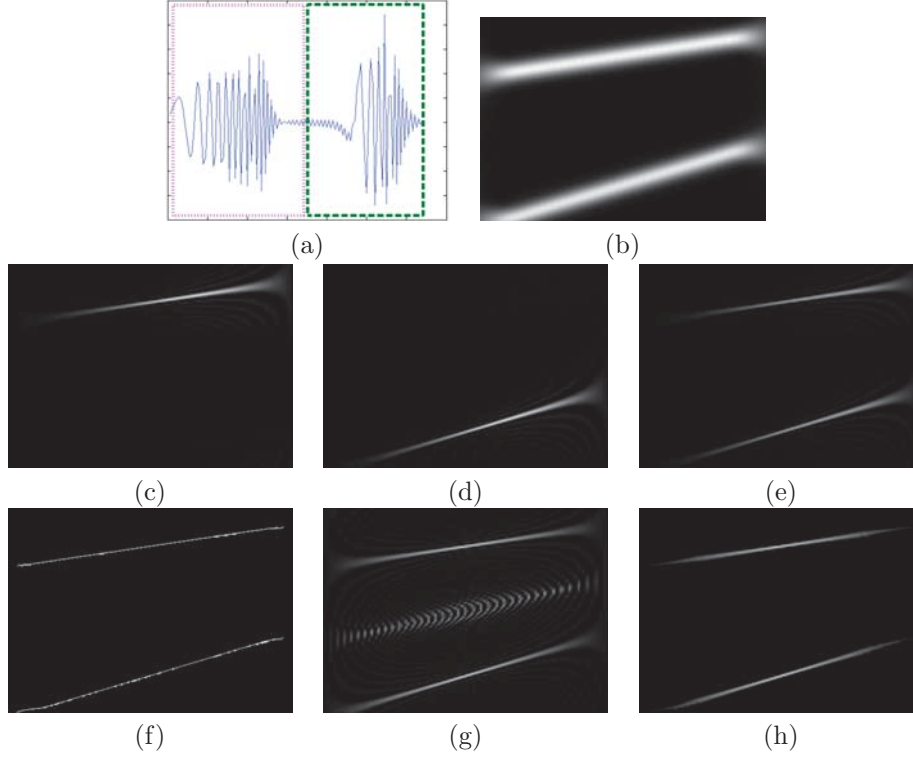


Figura A.10: (a) Coeficientes de Fourier-Bessel de  $x_1(t)$ . (b) Espectrograma de  $x_1(t)$ ,  $g_{i1}(\mathbf{x})$ . (c) WVD de la monocomponente 1. (d) WVD de la monocomponente 2. (e) Suma de las imágenes de las figuras c y d; (f) Marcador  $g_1(\mathbf{x})$ . (g) WVD de  $x_1(t)$ ,  $f_1(\mathbf{x})$ . (h) Imagen reconstruida  $f_r^{WV1}(\mathbf{x})$ .

podemos resaltar que el método  $\lambda$ -RCCR obteniendo resultados satisfactorios al ser aplicado sobre señales submarinas. Además la figura A.14.d no solamente resalta este hecho, sino que corrobora lo que se puso de manifiesto en la sección A.4.1 y en la figura A.7.c, puesto que soluciona el principal inconveniente del método RCCR ya que este último no fue capaz de ofrecer resultados satisfactorios al ser aplicado en esta señal en concreto, ya que los términos interferentes y los de señal se solapaban haciendo el diagrama WVD casi ininteligible.

#### Resultados de aplicación del método $\lambda$ -RCCR a la eliminación de interferencias en otro tipo de transformadas.

En esta sección se muestran los resultados de aplicar el método  $\lambda$ -RCCR para limpieza de diagramas procedentes de otras distribuciones: la distribución Margenau Hill (MHD) y la distribución Choi Williams (CWD). Ambas transformadas tienen diferente tipo de geometría de interferencias, en comparación con la WVD [29].

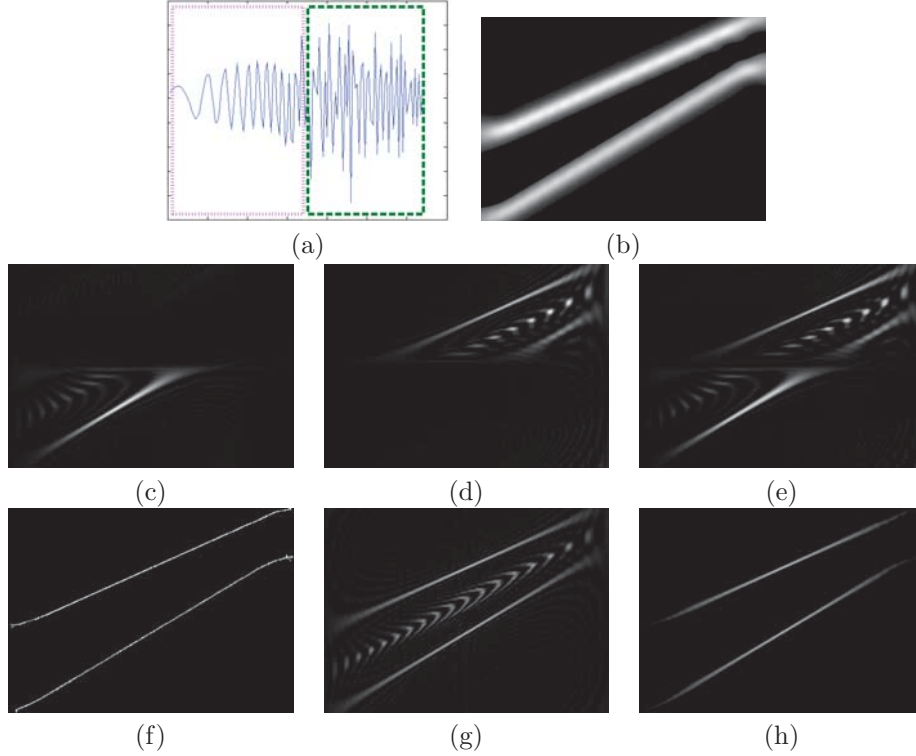


Figura A.11: (a) Coeficientes de Fourier-Bessel de  $x_2(t)$ . (b) Espectrograma de  $x_2(t)$ ,  $g_{i2}(\mathbf{x})$ . (c) WVD de la monocomponente 1. (d) WVD de la monocomponente 2. (e) Suma de las imágenes de las figuras c y d. (f) Marcador  $g_2(\mathbf{x})$ . (g) WVD de  $x_2(t)$ ,  $f_2(\mathbf{x})$ . (h) Imagen reconstruida  $f_r^{WV2}(\mathbf{x})$ .

Las señales que se usan en esta sección son dos señales ya descritas anteriormente,  $x_3(t)$  y  $x_4(t)$ . Las imágenes usadas como marcadores para la reconstrucción por  $\lambda$ -dilatación geodésica son las mismas que se usaron en la sección A.4.2. El marcador usado para aplicar el método a la señal  $x_3(t)$ ,  $g_3(\mathbf{x})$ , es el representado en la figura A.12.b; de la misma manera el marcador  $g_4(\mathbf{x})$  es el representado en la figura A.13.b.

Las figuras A.15.a y A.16.a representan, respectivamente, la imagen correspondiente a la transformada Choi Williams de ambas señales de entrada. Estas imágenes han sido usadas como imágenes de referencia para la aplicación del método  $\lambda$ -RCCR. Las figuras A.15.b y A.16.b representan  $f_r^{CW1}(\mathbf{x})$  and  $f_r^{CW2}(\mathbf{x})$  es decir, las imágenes reconstruidas de A.15.a y A.16.a aplicando el método propuesto a la CWD.

De la misma manera, las figuras A.15.c y A.16.c representan la transformada Margenau Hill de ambas señales de entrada y éstas son usadas como imágenes de referencia. Las figuras A.15.d y A.16.d muestran las imágenes reconstruidas tras aplicar el método,  $f_r^{MH1}(\mathbf{x})$  y  $f_r^{MH2}(\mathbf{x})$  a la MHD.



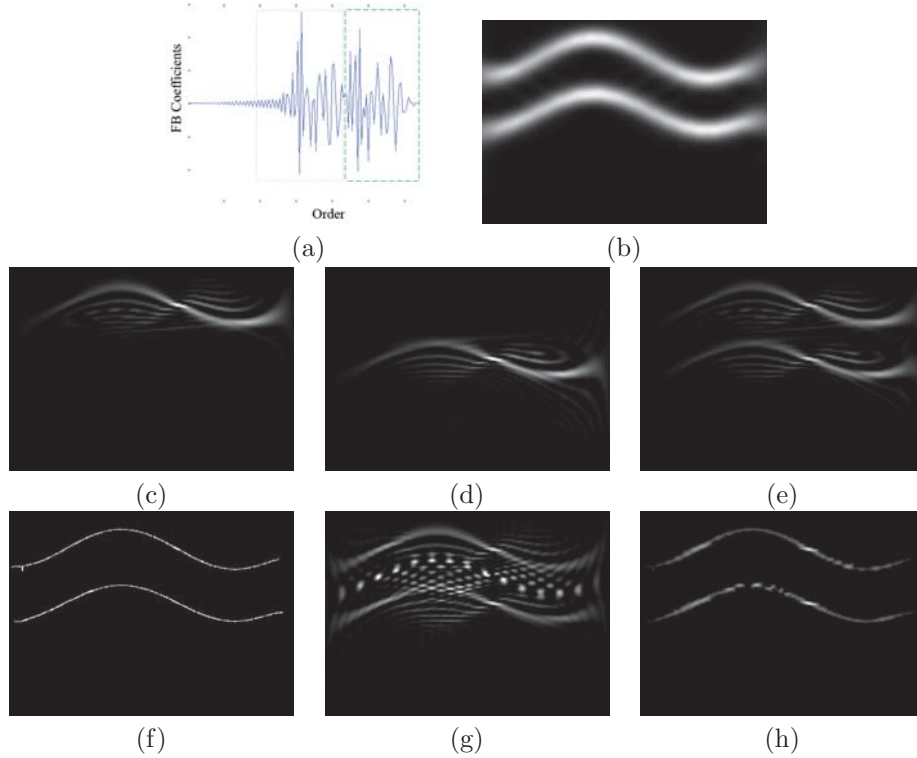


Figura A.12: (a) Coeficientes de Fourier-Bessel de  $x_3(t)$ . (b) Espectrograma de  $x_3(t)$ . (c) WVD de la monocomponente 1. (d) WVD de la monocomponente 2. (e) Suma de las imágenes de las figuras c y d. (f) Marcador  $g_3(\mathbf{x})$ . (g) WVD de  $x_3(t)$ . (h) Imagen reconstruida  $f_r^{WV3}(\mathbf{x})$ .

Así, las figuras A.15.b, A.15.d, A.16.b y A.16.d muestran el buen funcionamiento del método  $\lambda$ -RCCR y su posible aplicación a otro tipo de transformadas con diferente geometría de interferencias. Además se puede observar que no solamente reduce notablemente las componentes cruzadas de este tipo de transformadas sino que preserva la resolución tiempo-frecuencia de la imagen tomada como referencia en la operación morfológica.

## A.5. Conclusiones

En este anexo se han presentado dos métodos, basados en dos operadores morfológicos, para la eliminación de componentes cruzadas en distribuciones tiempo-frecuencia ruidosas. Se ha validado su funcionamiento no solamente sobre señales sintéticas sino también sobre señales de aplicaciones en las que el GTS está trabajando.

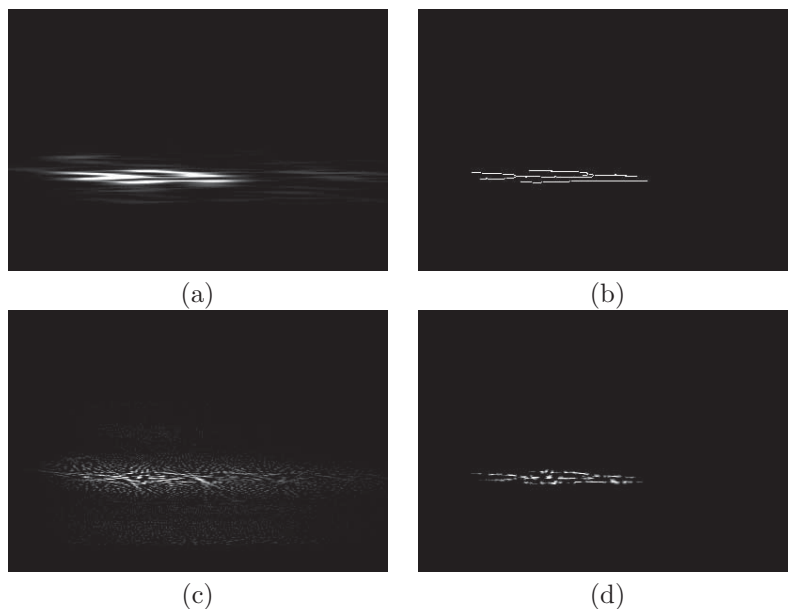


Figura A.13: (a) Espectrograma de  $x_4(t)$ . (b) Marcador  $g_4(\mathbf{x})$ ; (c) WVD de  $x_4(t)$ . (d) Imagen reconstruida  $f_r^{WV4}(\mathbf{x})$ .

En comparación con otras técnicas en el mismo campo, el método RCCR, basado en la reconstrucción por dilatación geodésica, proporciona buenos resultados siempre y cuando estas señales no contengan términos muy próximos en el espacio tiempo-frecuencia.

Cuando las señales contienen términos cercanos se produce un efecto de solapamiento entre los términos de interferencia y los de señal por lo que el método RCCR no funciona de manera correcta. Para tal fin se introduce el método  $\lambda$ -RCCR que se basa en la reconstrucción por  $\lambda$ -dilatación geodésica, se ha demostrado mediante diferentes ejemplos que este método abarca el caso anterior puesto que para valores de  $\lambda=0$  su operación es la misma que la de la reconstrucción por dilatación geodésica. Se ha presentado un método para obtener el valor de  $\lambda_{optimo}$  partiendo de señales sintéticas y se ha demostrado además que usando un valor de  $\lambda=\lambda_{optimo}$  el método es capaz de reducir interferencias de manera correcta incluso en aquellos casos donde el ruido solapa o interfiere con los términos de señal.

Se ha demostrado además la utilidad del método  $\lambda$ -RCCR para eliminar ruido e interferencias de otros tipos de distribuciones tales como la CWD o la MHD, también mediante aplicación a señales tanto sintéticas como submarinas.

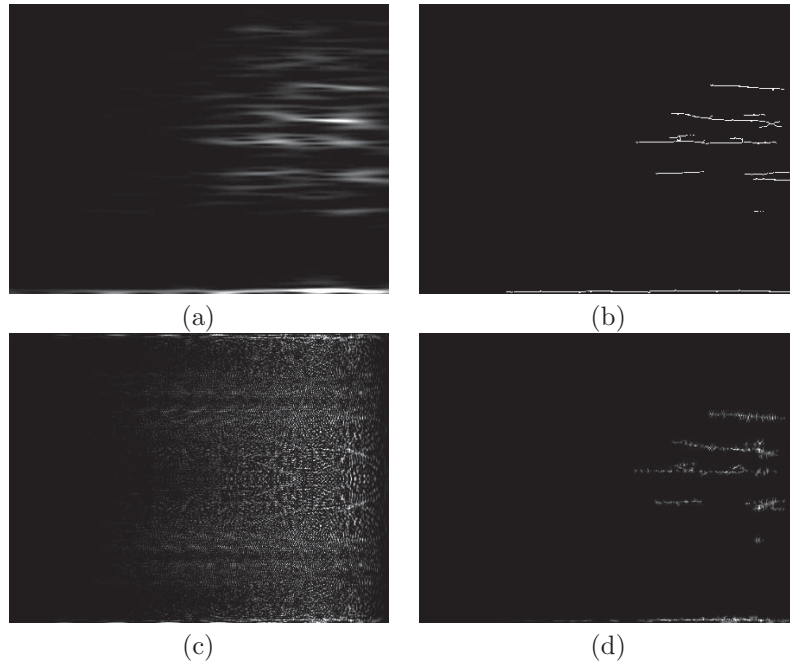


Figura A.14: (a) Espectrograma  $x_5(t)$ . (b) Marcador  $g_5(\mathbf{x})$ . (c) WVD de  $x_5(t)$ . (d) Imagen reconstruida  $f_r^{WV5}(\mathbf{x})$ .

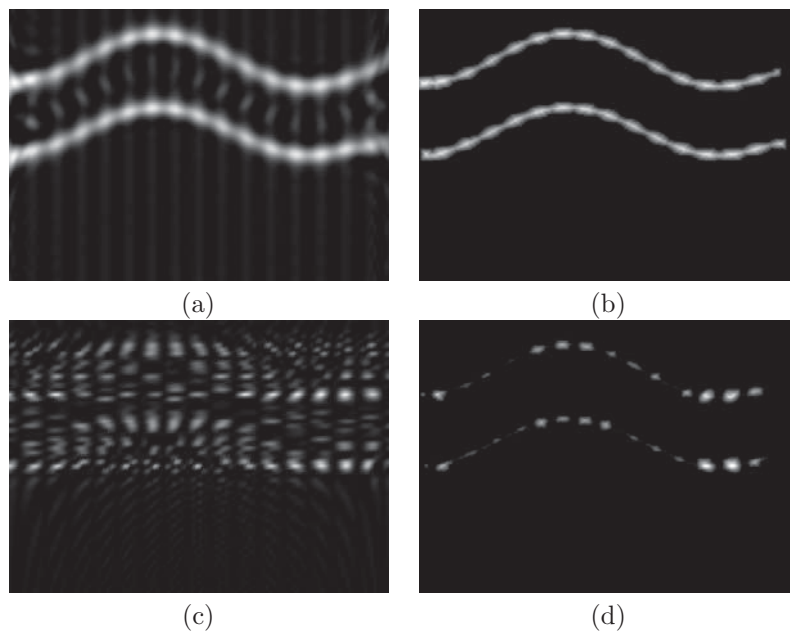


Figura A.15: (a) CWD de  $x_3(t)$ . (b) Imagen reconstruida  $f_r^{CW1}(\mathbf{x})$ . (c) MHD de  $x_3(t)$ . (d) Imagen reconstruida  $f_r^{MH1}(\mathbf{x})$ .

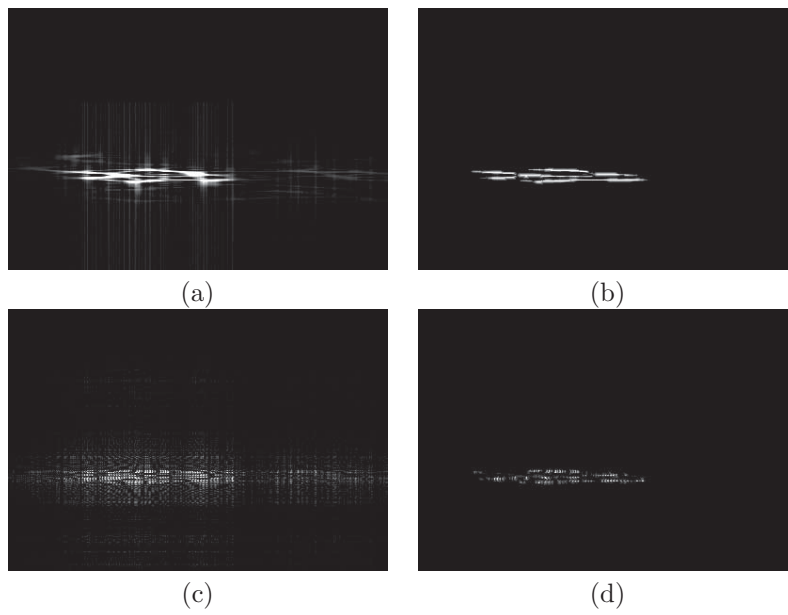


Figura A.16: (a)  $CWD$  de  $x_4(t)$ . (b) Imagen reconstruida  $f_r^{CW2}(\mathbf{x})$ . (c)  $MHD$  de  $x_4(t)$ . (d) Imagen reconstruida  $f_r^{MH2}(\mathbf{x})$ .

# Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| 1.1. Esquema de medida ultrasónico. (a) Transmisión-Recepción; (b) Pulso-Eco. . . . .   | 2  |
| 1.2. Esquema de medida ultrasónico en modo pulso-eco. Ejemplo de inspección de un material con una grieta interna. . . . .  | 3  |
| 1.3. Esquema de medida ultrasónico en modo pulso-eco. Ejemplo de inspección de un material con pequeños dispersores internos. . . . .   | 4  |
| 1.4. Modelo lineal variante en el tiempo (LTV). . . . .   | 5  |
| 1.5. Diferentes secciones de un mismo material. Efecto conjunto de atenuación y dispersión al viajar el pulso a lo largo de un material. . . . .  | 6  |
| 1.6. Esquema general para la extracción de la firma ultrasónica. . . . .  | 10 |
| 2.1. Modelo de trabajo en el dominio temporal. . . . .  | 17 |
| 2.2. Máximo error cometido, normalizado en amplitud, en la aproximación gaussiana en función de $Y$ . . . . .   | 20 |
| 2.3. TFR simulados teniendo en cuenta el efecto de atenuación por absorción. Superpuesto se representa la evolución con la profundidad de la frecuencia central y el ancho de banda del pulso. Los parámetros para la simulación del pulso ultrasónico fueron: $f_0=500$ KHz, $B=75\%$ (inicial), $\bar{D}=1$ mm y $\alpha_0$ variable. (a) $\alpha_0=1e-9$ . (b) $\alpha_0=1e-10$ . (c) $\alpha_0=0.5e-10$ . . . . .                                   | 22 |
| 2.4. TFR simulados teniendo en cuenta el efecto de atenuación debida a la dispersión estocástica. Superpuesto se representa la evolución con la profundidad de la frecuencia central y el ancho de banda del pulso. Los parámetros para la simulación del pulso ultrasónico fueron: $f_0=500$ KHz, $v_p=1500$ m/s, $B=75\%$ (inicial), $\alpha_{S0}=1e-5$ , $\bar{D}$ variable. (a) $\bar{D}=1.5$ mm. (b) $\bar{D}=1$ mm. (c) $\bar{D}=0.5$ mm. . . . . | 24 |
| 2.5. Representación 2D: Geometría de las interferencias de la transformada Wigner Ville de una señal compuesta por dos átomos gaussianos. . . . .   | 30 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.6. | Representación 3D: Geometría de las interferencias de la transformada Wigner Ville de una señal compuesta por dos átomos gaussianos.   | 31 |
| 2.7. | (a) Espectrograma correspondiente a dos átomos gaussianos poco distantes en el plano frecuencial, tamaño de ventana temporal de 33 puntos. (b) Espectrograma correspondiente a 2 átomos gaussianos alejados en el plano frecuencial, tamaño de ventana temporal de 33 puntos. . . . .  | 32 |
| 2.8. | (a) Transformada Wigner Ville de 2 átomos gaussianos poco distantes en el plano frecuencial. (b) Transformada Wigner Ville de dos átomos gaussianos alejados en el plano frecuencial. . . . .  | 33 |
| 3.1. | Obtención de una imagen a partir de la representación en tiempo-frecuencia del registro de señal bajo test. . . . .  | 38 |
| 3.2. | Esquema general del método para la extracción de la firma ultrasónica basado en tratamiento digital de imagen. . . . .   | 39 |
| 3.3. | TFR de una señal simulada acorde con modelo presentado en la ecuación (2.6) ( $Y = 2$ ). TFR procedente de la señal sin contaminar con ruido, binarizado con umbral fijo (línea continua) y TFR procedente de la misma señal contaminada con AWGN de varianza 0.17 (línea punteada), la zona gris delimita el área de incertidumbre al umbralizar con el mismo umbral fijo la señal contaminada. . . .     | 41 |
| 3.4. | Corte de un TFR a una profundidad fija. Posicionamiento del umbral en el punto de máxima pendiente. . . . .  | 42 |
| 3.5. | TFR de una señal simulada acorde con modelo presentado en la ecuación (2.6) ( $Y = 2$ ). TFR procedente de la señal sin contaminar con ruido, binarizado con umbral variable (línea continua) y TFR procedente de la misma señal contaminada con AWGN de varianza 0.17 (línea punteada), la zona gris delimita el área de incertidumbre al umbralizar con el mismo umbral variable la señal contaminada. . | 43 |
| 3.6. | TFR de una señal simulada acorde con modelo presentado en la ecuación (2.6) ( $Y = 2$ ). TFR procedente de la señal sin contaminar con ruido, binarizado con umbral variable (línea continua) y TFR procedente de la misma señal contaminada con AWGN de varianza 0.17 (línea punteada), la zona gris delimita el área de incertidumbre al umbralizar la señal contaminada con el mismo umbral mixto. . .  | 44 |
| 3.7. | Ejemplo simulado de diagrama binarizado con umbral mixto. Los parámetros de simulación son: $f_c=500$ KHz, AWGN de varianza 0.15 y $\bar{D}=1.5$ mm. . . . .   | 46 |
| 3.8. | Descripción del parámetro <i>orientacion</i> . . . . .   | 48 |
| 3.9. | Descripción de los parámetros <i>signature del contorno (SC)</i> y <i>excentricidad</i> ( $\epsilon$ ). . . . .  | 50 |

|   |    |
|---|----|
| 3.10. Ejemplo del cálculo del estimador <i>signature del contorno</i> . (a) Región circular. (b) Región cuadrada. . . . .   | 50 |
| 3.11. Estimación de la evolución de la <i>frecuencia centroide</i> descomponiendo la imagen binarizada en pequeños rectángulos y calculando su centro de gravedad. . . . .  | 53 |
| 4.1. Estructura del modelo lineal y variante en el tiempo (LTV) usado para llevar a cabo las simulaciones. . . . .  | 58 |
| 4.2. Evolución de la frecuencia central: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$ y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c). . . . .      | 59 |
| 4.3. Evolución de la frecuencia central: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$ y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c). . . . .      | 60 |
| 4.4. Evolución del ancho de banda fraccional: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$ y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c). . . . . | 61 |
| 4.5. Evolución del ancho de banda fraccional: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$ y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c). . . . . | 62 |
| 4.6. Evolución de la frecuencia centroide: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$ y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c). . . . .    | 64 |
| 4.7. Evolución de la frecuencia centroide: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$ y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c). . . . .    | 65 |
| 4.8. TFR binarizado con parámetros $\alpha_0$ y $\alpha_{s0}$ fijos y $\bar{D}$ variable. (a) $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$ ; (b) $\bar{D} = 0,7 \text{ mm}$ ; (c) $\bar{D} = 0,9 \text{ mm}$ ; (d) $\bar{D} = 1,1 \text{ mm}$ ; (e) $\bar{D} = 1,3 \text{ mm}$ ; (f) $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$ . . . . .                     | 67 |

|  |    |
|--|----|
| 4.9. Evolución de la frecuencia central: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\alpha_0 = 0,05 \text{ dB/cm}$ y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c). . . . .  | 70 |
| 4.10. Evolución de la frecuencia central: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\alpha_0 = 0,25 \text{ dB/cm}$ y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c). . . . .   | 71 |
| 4.11. Evolución del ancho de banda fraccional: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\alpha_0 = 0,05 \text{ dB/cm}$ y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c). . . . .  | 72 |
| 4.12. Evolución del ancho de banda fraccional: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\alpha_0 = 0,25 \text{ dB/cm}$ y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c). . . . .  | 73 |
| 4.13. Evolución de la frecuencia centroide: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\alpha_0 = 0,05 \text{ dB/cm}$ y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c). . . . .   | 74 |
| 4.14. Evolución de la frecuencia centroide: valores de curvas teóricas y calculadas usando los estimadores convencionales y sus equivalentes modificados. Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\alpha_0 = 0,25 \text{ dB/cm}$ y AWGN con varianza de: 0 gráfica (a); 0,25 gráfica (b), y 0,5 gráfica (c). . . . .   | 75 |
| 4.15. TFR binarizado con parámetros $\alpha_{s0}$ y $\bar{D}$ fijos, $\alpha_0$ variable. (a) $\alpha_0 = 0,5e-10$ ; (b) $\alpha_0 = 0,75e-10$ ; (c) $\alpha_0 = 1,25e-10$ ; (d) $\alpha_0 = 1,5e-10$ ; (e) $\alpha_0 = 1,75e-10$ ; (f) $\alpha_0 = 2e-10$ . . . . .   | 76 |
| 4.16. Varianza y sesgo de los operadores: (a) <i>frecuencia central</i> ; (b) <i>ancho de banda fraccional a <math>-3 \text{ dB}</math></i> ; (c) <i>frecuencia centroide</i> . Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\bar{D} = 0,5 \text{ mm}$ y AWGN con varianza variando de 0,05 a 0,5. Sesgo (marcador '*' ó 'o') y varianza (barras verticales). . . . . | 78 |
| 4.17. Varianza y sesgo de los operadores: (a) <i>frecuencia central</i> ; (b) <i>ancho de banda fraccional a <math>-3 \text{ dB}</math></i> ; (c) <i>frecuencia centroide</i> . Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\bar{D} = 1,5 \text{ mm}$ y AWGN con varianza variando de 0,05 a 0,5. Sesgo (marcador '*' ó 'o') y varianza (barras verticales). . . . . | 79 |



|  |     |
|--|-----|
| 4.18. Varianza y sesgo de los operadores: (a) <i>frecuencia central</i> ; (b) <i>ancho de banda fraccional a -3 dB</i> ; (c) <i>frecuencia centroide</i> . Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\alpha_0 = 0,05 \text{ dB/cm}$ y AWGN con varianza variando de 0,05 a 0,5. Sesgo (marcador '*' o 'o') y varianza (barras verticales). . . . . | 80  |
| 4.19. Varianza y sesgo de los operadores: (a) <i>frecuencia central</i> ; (b) <i>ancho de banda fraccional a -3 dB</i> ; (c) <i>frecuencia centroide</i> . Los parámetros de simulación para el LTV fueron: $\alpha_0 = 0,25 \text{ dB/cm}$ y AWGN con varianza variando de 0,05 a 0,5. Sesgo (marcador '*' o 'o') y varianza (barras verticales). . . . . | 81  |
| 5.1. A-scan obtenido mediante la inspección ultrasónica de una probeta de agar-agar y proceso para el cálculo de la velocidad de propagación de la onda ultrasónica al viajar a lo largo de ésta. . . . .  | 89  |
| 5.2. Preparando las piezas de test: midiendo la cantidad de agua destilada. . . . .  | 91  |
| 5.3. Preparando las piezas de test: agar-agar. (a) Bote de agar-agar; (b) Midiendo la concentración adecuada. . . . .  | 92  |
| 5.4. Uso de <i>molecular sieves</i> para emular dispersores: (a) Bote de <i>molecular sieves</i> 0,4-0,8 mm; (b) <i>Molecular sieves</i> 0,4-0,8 mm; (c) Bote de <i>molecular sieves</i> 1-2 mm; (d) <i>Molecular sieves</i> 1-2 mm. . . . .   | 93  |
| 5.5. Proceso de tamizado de <i>molecular sieves</i> : (a) Tamiz de laboratorio; (b) Tamizando; (c) Tamiz tipo apertura 0,6 mm; (d) Tamiz tipo apertura 1,6 mm. . . . .   | 94  |
| 5.6. Aspecto de una pieza de test conteniendo 1000 <i>molecular sieves</i> de tamaño 1,3 mm. . . . .   | 95  |
| 5.7. Proceso de medida. (a) Aplicación de capa de gel de alta densidad para aumentar la adaptación transductor/probeta. (b) Ejemplo de medición de una pieza. . . . .  | 97  |
| 5.8. Evolución de la frecuencia central con la profundidad. (a) Estimador convencional; (b) estimador modificado. . . . .  | 100 |
| 5.9. Evolución del ancho de banda fraccional a -3 dB con la profundidad. (a) Estimador Convencional; (b) Estimador Modificado. . . . .   | 101 |
| 5.10. Evolución de la frecuencia centroide con la profundidad. (a) Estimador convencional; (b) Estimador modificado. . . . .   | 103 |
| 5.11. Resultados de aplicación del estimador <i>signature del contorno</i> . . . . .   | 105 |
| 6.1. Evolución de la frecuencia central con la profundidad. (a) Estimador convencional; (b) Estimador modificado. . . . .  | 111 |
| 6.2. Evolución del ancho de banda fraccional a -3 dB con la profundidad. (a) Estimador convencional; (b) Estimador modificado. . . . .   | 112 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 6.3.  | Evolución de la frecuencia centroide con la profundidad. (a) Estimador convencional; (b) Estimador modificado. . . . .  | 113 |
| 6.4.  | Descriptor signature del contorno . . . . .   | 115 |
| 6.5.  | Proceso de medida. Ejemplos de medición de una pieza de gelatina.   | 117 |
| 6.6.  | (a) Pieza de gelatina; (b) Detalle de la microestructura de la pieza formada por burbujas de aire. . . . .  | 118 |
| 6.7.  | Descriptor signature del contorno . . . . .   | 119 |
| A.1.  | (a) Imagen Original. (b) Resultado de aplicar la apertura usando como elemento estructurante un cuadrado de lado 11; (c) Resultado de aplicar la reconstrucción morfológica por dilatación usando como máscara la figura a y como marcador la figura b. . . . .   | 135 |
| A.2.  | (a) Imagen de referencia (máscara). (b) Marcador. (c) Resultado de la reconstrucción por dilatación geodésica ( $\lambda = 0$ ). (d) Resultado de la reconstrucción por $\lambda$ -dilatación geodésica con $\lambda = 15$ . . . . .  | 138 |
| A.3.  | (a) Imagen de referencia (máscara). (b) Marcador. (c) Resultado de la reconstrucción por dilatación geodésica ( $\lambda = 0$ ). (d) Resultado de la reconstrucción por $\lambda$ -dilatación geodésica con $\lambda = 15$ . (e) Resultado de la reconstrucción por $\lambda$ -dilatación geodésica con $\lambda = 30$ .                                    | 139 |
| A.4.  | Diagrama de bloques del método de limpieza de diagramas tiempo-frecuencia (método RCCR). . . . .  | 141 |
| A.5.  | (a) $SP_i$ de CS. (b) $WD_i$ de CS. (c) Resultado de aplicar la reconstrucción por dilatación geodésica a la señal CS. . . . .  | 143 |
| A.6.  | (a) $SP_i$ de la señal doppler. (b) $WD_i$ de la señal doppler. (c) Resultado de aplicar la reconstrucción por dilatación geodésica a la señal doppler. . . . .   | 144 |
| A.7.  | (a) $SP_i$ de la señal submarina. (b) $WD_i$ de la señal submarina. (c) Resultado de aplicar la reconstrucción por dilatación geodésica a la señal submarina. . . . .   | 145 |
| A.8.  | Diagrama de bloques del método de limpieza de diagramas tiempo-frecuencia (método $\lambda$ -RCCR). . . . .   | 146 |
| A.9.  | Evaluando la función de error para diferentes valores de $\lambda$ . . . . .  | 148 |
| A.10. | (a) Coeficientes de Fourier-Bessel de $x_1(t)$ . (b) Espectrograma de $x_1(t)$ , $g_{i1}(\mathbf{x})$ . (c) WVD de la monocomponente 1. (d) WVD de la monocomponente 2. (e) Suma de las imágenes de las figuras c y d; (f) Marcador $g_1(\mathbf{x})$ . (g) WVD de $x_1(t)$ , $f_1(\mathbf{x})$ . (h) Imagen reconstruida $f_r^{WV1}(\mathbf{x})$ . . . . . | 151 |

|  |     |
|--|-----|
| A.11.(a) Coeficientes de Fourier-Bessel de $x_2(t)$ . (b) Espectrograma de $x_2(t)$ , $g_{i2}(\mathbf{x})$ . (c) WVD de la monocomponente 1. (d) WVD de la monocomponente 2. (e) Suma de las imágenes de las figuras c y d. (f) Marcador $g_2(\mathbf{x})$ . (g) WVD de $x_2(t)$ , $f_2(\mathbf{x})$ . (h) Imagen reconstruida $f_r^{WV2}(\mathbf{x})$ . . . . . | 152 |
| A.12.(a) Coeficientes de Fourier-Bessel de $x_3(t)$ . (b) Espectrograma de $x_3(t)$ . (c) WVD de la monocomponente 1. (d) WVD de la monocomponente 2. (e) Suma de las imágenes de las figuras c y d. (f) Marcador $g_3(\mathbf{x})$ . (g) WVD de $x_3(t)$ . (h) Imagen reconstruida $f_r^{WV3}(\mathbf{x})$ .  | 153 |
| A.13.(a) Espectrograma de $x_4(t)$ . (b) Marcador $g_4(\mathbf{x})$ ; (c) WVD de $x_4(t)$ . (d) Imagen reconstruida $f_r^{WV4}(\mathbf{x})$ . . . . .  | 154 |
| A.14.(a) Espectrograma $x_5(t)$ . (b) Marcador $g_5(\mathbf{x})$ . (c) WVD de $x_5(t)$ . (d) Imagen reconstruida $f_r^{WV5}(\mathbf{x})$ . . . . .   | 155 |
| A.15.(a) CWD de $x_3(t)$ . (b) Imagen reconstruida $f_r^{CW1}(\mathbf{x})$ . (c) MHD de $x_3(t)$ . (d) Imagen reconstruida $f_r^{MH1}(\mathbf{x})$ . . . . .   | 155 |
| A.16.(a) CWD de $x_4(t)$ . (b) Imagen reconstruida $f_r^{CW2}(\mathbf{x})$ . (c) MHD de $x_4(t)$ . (d) Imagen reconstruida $f_r^{MH2}(\mathbf{x})$ . . . . .   | 156 |



# Índice de tablas

|   |     |
|---|-----|
| 1.1. Ejemplo de algunos de los parámetros que pueden componer la firma ultrasónica. . . . .   | 9   |
| 5.1. Resumen de composición de las piezas de test. . . . .  | 87  |
| 5.2. Diferentes regiones de dispersión según la relación $\frac{\bar{D}}{\lambda}$ . . . . .  | 88  |
| 5.3. Resumen de los estimadores probados en esta sección y referencia a la figura o tabla donde se muestran los resultados. . . . . | 98  |
| 5.4. Análisis de forma del TFR. Aplicación de descriptores geométricos: <i>area, orientacion y excentricidad</i> . . . . .          | 102 |
| 6.1. Resumen de composición de las matrices heterogéneas de agar-agar. . . . .  | 109 |
| 6.2. Resumen de los estimadores probados en esta sección y referencia a la figura o tabla donde se muestran los resultados. . . . . | 110 |
| 6.3. Análisis de forma del TFR. Aplicación de descriptores geométricos: <i>area, orientacion y excentricidad</i> . . . . .          | 113 |
| 6.4. Resumen de composición de las matrices de gelatina. . . . .  | 116 |
| 6.5. Análisis de forma del TFR. Aplicación de descriptores geométricos: <i>area, orientacion y excentricidad</i> . . . . .          | 116 |



# Bibliografía

- [1] L. Vergara, J. Gosálbez, J.V. Fuente, R. Miralles, and I. Bosch. Measurement of cement porosity by centroid frequency profiles of ultrasonic grain noise. *Signal Processing*, 84(12):2315–2324, Diciembre 2004.
- [2] L. Vergara, J. Gosálbez, J.V. Fuente, R. Miralles, I. Bosch, A. Salazar, A.M. López, and L.E. Domínguez. Ultrasonic non destructive testing on marble rock blocks. *Materials Evaluation*, 62(1):73–78, Enero 2004.
- [3] J. Gosálbez, A. Parra, A. Salazar, and I. Bosch. Ultrasonic non-destructive testing applied to the characterization of archaeological waterlogged wood. Murcia, Septiembre 2004.
- [4] M.A. Rodríguez, L. Vergara, and R. Miralles. Non-destructive evaluation of microcracks in ceramics with controlled probability of false alarm. *Research in Nondestructive Evaluation*, 11(1).
- [5] R. Miralles, L. Vergara, J. Gosálbez, I. Bosch, A. Salazar, and R. Diaz. Performance analysis of a defect detection algorithm in ultrasonic b-scans: An application to foreign bodies detection. *Waves*, 2:10, 2010.
- [6] J. Gosálbez. *Análisis espectral del ruido granular para la extracción de firmas ultrasónicas*. PhD thesis, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Valencia, Junio 2004.
- [7] R. Miralles. *Análisis espectral de orden superior: aplicación a la caracterización ultrasónica de materiales*. PhD thesis, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Valencia, Junio 2000.
- [8] L. Vergara and J.M. Paez. Backscattering grain noise modelling in ultrasonic non-destructive testing. *Waves in random media-IOP (Institute of Physics)*, 1:81–92, 1991.
- [9] J. V. Fuente, L.Vergara, J. Gosálbez, and R. Miralle. Time-frequency analysis of ultrasonics backscattering noise for nondestructive characterization of cement pastes. Barcelona, Junio 2002. 8th ECNDT European Conference on Non-Destructive Testing.

- 
- [10] L. Vergara, R. Miralles, J. Gosálbez, I. Bosch, S. Gómez, J. Moragues, and A. Serrano. Firma ultrasonica: Un concepto de procesado de senyal para la caracterizacion de materiales. *Boletín Informativo END*, 40:26–38, Junio 2007.
- [11] J. Krautkrämer and H. Krautkrämer. *Ultrasonic Testing of Materials*. Berlin, 4 edition, 1990.
- [12] A.S. Birks and R.E. Jr. Green. *Nondestructive Testing Handbook*. 1991.
- [13] L.Vergara, R. Miralles, J.Gosálbez, F.J. Juanes, L.G.Ullate, J.J.Anaya, M.G. Hernández, and M.A.G. Izquierdo. Nde ultrasonic methods to characterize the porosity of mortar. *NDT&E International*, 34(8):557–562, Agosto 2001.
- [14] L. Vergara, J.V. Fuente, J. Gosálbez, R. Miralles, and I. Bosch. Processing of ultrasonic grain noise signals for the estimation of depth-and frequency-dependent attenuation. *Measurement Science Technology*, 14:1018–1024, Julio 2003.
- [15] R. Miralles, L. Vergara, and J. Morales. An industrial application of signal processing: ceramic microcrack detection. In *Proc. IEEE-ICASSP-99*. Phoenix, Arizona, Marzo 1999.
- [16] I.Bosch, L.Vergara, and R. Miralles. New insights and extensions of split-spectrum algorithms from an optimum distributed detection perspective. In *IEEE International Ultrasonic Symposium*, Rotterdam (The Netherlands), Septiembre 2005.
- [17] J. Gosálbez, A. Salazar, I. Bosch, R. Miralles, and L. Vergara. Application of ultrasonic nondestructive testing to the diagnosis of consolidation of a restored dome. *Materials Evaluation*, 64(5):492–497, Mayo 2006.
- [18] R. Miralles, M. Jover-Andreu, and I. Bosch. Processing for echo detection on ultrasonic signals: An application to foreign bodies detection in the alimentary industry. *EUSIPCO 2006*, pages 1–4, Florence, Italy 2006.
- [19] R. Miralles, L. Vergara, and J. Gosálbez. Material grain noise analysis by using higher-order statistics. *Signal Processing*, 84(1):197–205, Enero 2004.
- [20] L. Vergara, J. Gosálbez, R. Miralles, and I. Bosch. On estimating the center frequency of ultrasound pulses. *Ultrasonics*, 42:813–818, Abril 2004.
- [21] I. Bosch. *Algoritmos de detección distribuida en sistemas monosensor*. PhD thesis, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Valencia, Septiembre 2005.
- [22] P. He. Simulation of ultrasound pulse propagation in lossy media obeying a frequency power law. *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 45(1):114–125, Junio 1998.



- 
- [23] R. Demirli and J. Saniie. Model-based estimation of ultrasonic echoes part i: Analysis and algorithms. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 48(3):787–802, May 2001.
- [24] E.P. Papadakis. The inverse problem in materials characterization through ultrasonic attenuation and velocity measurements. *Non Destructive Methods for Material Properties Determination*, (Plenum, New York), pages 151–160, 1984.
- [25] M. Karaoguzt, N. Bilgutay, and B. Onarafi. Modeling of scattering dominated ultrasonic attenuation using power-law function. *IEEE Ultrasonic Symposium*, 1:793–796, October 2000.
- [26] D. Gabor. Theory of communications. *J. Inst. Elec. Eng*, 93(26):429–457, Noviembre 1946.
- [27] E. P. Wigner. On the quantum correction for thermo-dynamic equilibrium. *Physics Review*,, 40:749–759, 1932.
- [28] J. Ville. Théorie et applications de la notion de signal analytique. *Câbles et Transmission*,, 2A:61–74.
- [29] L.Cohen. Time-frequency distributions-a review. *Proc of the IEEE*, 77(7), Julio 1989.
- [30] F. Auger, P. Flandrin, P. Gonçalves, and O. Lemoine. *Time-frequency toolbox*. CNRS (France) Rice University-USA, 1995-1996.
- [31] F. Hlawatsch and G.F Boudreaux-Bartels. Linear and quadratic time-frequency signals representations. *IEEE Signal Proc. Magazine*, 9:21–87,, 1992.
- [32] P. Flandrin. *Temps-fréquence*. Traitement du Signal. 1993.
- [33] S. Gómez, V. Naranjo, and R. Miralles. An application of morphologic filters to remove non-linear distortions from time-frequency representations of acoustic signals. In *19th International Congress on Acoustic*, Madrid, Septiembre 2007.
- [34] M.A R. Carranza and R. Jané. Uso de los términos cruzados de la distribución choi-williams para detectar actividad tardía ventricular. *Revista mexicana de Ingeniería Biomédica*, 20(4):77–96, 1999.
- [35] S. Gómez, V. Naranjo, and R. Miralles. Removing interference components in time-frequency representations using morphological operators. *Enviado a Journal of Visual Communication and Image Representation*, Elsevier, Julio 2010.
- [36] J.Zemp Roger, K.Abbey Craig, and F.Insana Michael. Fundamental performance metrics and optimal image processing strategies for ultrasound systems. *IEEE Ultrasonics symposium*, 2:1769–1772, Octubre 2002.

- 
- [37] I. Pitas. *Digital Image Processing Algorithms*. Prentice Hall international series in acoustics, speech, and signal processing, 1993.
- [38] D. Zhang and G. Lu. Review of shape representation and description techniques. *Pattern recognition*, 37(1):1–19, Enero 2004.
- [39] P. L. Rosin. Measuring shape: ellipticity, rectangularity, and triangularity. *Machine Vision and Applications*, 14:172–184, 2003.
- [40] R. C. Veltkamp and M. Hagedoorn. State of the art in shape matching. *Technical Report UU-CS-1999-27*, Utrecht University, the Netherlands, 1999.
- [41] J. Canny. A computational approach for edge detection. *IEEE Transaction. Pattern Anal. Machine Intell.*, 8(6), 1998.
- [42] O. D. Trier, A. K. Jain, and T. Taxt. Feature extraction methods for character recognition- a survey. *Pattern Recognition*, 29(4):641–662, 1996.
- [43] C. Zheng, D-W. Sun, and L. Zheng. Recent developments and applications of image features for food quality evaluation and inspection- a review. *Food science and technology*, 17:642–655, 2006.
- [44] S. Belongie. Shape matching and object recognition using shape contexts. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 24(24):509–522, Abril 2002.
- [45] A. Vailaya, A. Jain, and H.J. Zhang. On image classification: city images vs. landscapes. *Pattern Recognition*, 31(12):1921–1935, 1998.
- [46] N. N. Bennett and N. Saito. Using edge information in time-frequency representations for chirp parameters estimation. *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 18:186–197, 2005.
- [47] S. Krishnan M.R. Rangayyan. Feature identification in the time-frequency plane by using the hough-radon transform. *Pattern Recognition*, 34:1147–1158, 2001.
- [48] S. Barbarossa and O. Lemoine. Analysis of nonlinear fm signals by pattern recognition of their time-frequency representation.
- [49] L. Rankine, M. Mesbah, and B. Boashash. If estimation for multicomponent signals using image processing techniques in the time-frequency domain. *Signal Processing*, 87:1234–1250, 2007.
- [50] Ch. Vinod, E. Steve, and A. Nguyen. Detection of mines in acoustic images using higher order spectral features. *IEEE Journal on oceanic engineering*, 27(3), Julio 2002.
- [51] I. Pitas. *Digital Image Processing Algorithms and Applications*. Wiley Interscience; 1 edition, February 2000.

- 
- [52] R.C. Gonzalez and R.E. Woods. *Digital Image Processing*. Pearson, Prentice Hall, 2007.
- [53] A.K. Nandi. *Blind Estimation Using Higher-Order Statistics*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999.
- [54] R. E Francois and G. R. Garrison. Sound absorption based on ocean measurements: Part i: pure water and magnesium sulfate contributions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 72(3):896–907, 1982.
- [55] J. Muñoz, M.C Alfaro, and I. Zapata. Avances en la formulación de emulsiones. *Grasas y aceites*, 58(1):64–73, 2007.
- [56] A. Dutta, A. Chengara, A.D. Nikolov, D.T. Wasan, K. Chen, and B. Campbell. Texture and stability of aerated food emulsions effects of buoyancy and ostwald ripening. *Journal of food and engineering*, 62:169–175, 2004.
- [57] T. Claasen and W. Meclenbrauker. The wigner distribution-a tool for time frequency signal analysis-part ii: Discrete time signals. *Philips j. Res.*, 5:276–300, 1980.
- [58] T. Claasen and W. Meclenbrauker. The wigner distribution-a tool for time frequency signal analysis-part iii: Relations with other time-frequency signal transforms. *Philips j. Res.*, 35:372–389, 1980.
- [59] F. Hlawatsch and P. Flandrin. The interference structure of the wigner distribution and related time-frequency signals representations. *Wigner Distribution -Theory and applications in Signal Processing, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier*, 35:372–389, 1997.
- [60] P. Flandrin. Some features of time-frequency representations of multi-component signals. *IEE Int. Conf. Acoust., Speech, Sig. Proc.*, pages 1–27, 1985.
- [61] A.J.E.M Jansen and T.A.C.M. Claasen. On positivity of time-frequency distributions. *IEE Trans. Acoust., Speech, Sig. Proc.*, 33(4):1029–1032, 1985.
- [62] M. E. Tagluk and M.J.English. The analysis of ecg signals using time-frequency techniques. *Proceedings of the 19th Annual International Conference of the IEEE on Engineering in Medicine and Biology society.*, 3:1320–1323, 1997.
- [63] R. G. Baraniuk and D.L Jones. A radial gaussian, signal dependent time-frequency representation. *Signal Proc.*, 32:263–284, 1993.
- [64] D.L Jones and R. G. Baraniuk. An adaptive optimal-kernel time-frequency representation. *IEEE trans. on Signal Proc.*, 43:2361–2371, 1995.
- [65] R. B. Pachori and P. Sircar. A new technique to reduce cross terms in the wigner distribution. *Digital Signal Processing*, 17(2):466–474, 2007.

- 
- [66] D.L Jones and R. G. Baraniuk. Elimination of cross-components of the discrete pseudo wigner distribution via image processin. In *IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Sig. Proc.*, pages 2231–2233, 1989.
- [67] L. Tao and Y. Shao-Quan. Improvement on joint time-frequency representation with application of image processing technique. In *Proc. on Fifth International Conference on Computational Intelligence and Multimedia Applications*, pages 243–248, 2003.
- [68] J. Serra. *Image analysis and mathematical morphology*. Academic Press, 1988.
- [69] J. Serra. *Image analysis and mathematical morphology vol II. Theoretical advances*. Academic Press, 1988.
- [70] J. Serra and P. Salembier. *Connected operators and pyramids.*, 1993.
- [71] P. Soille. *Morphological Image Analysis:Principles and Applications. Second Edition*. Springer, 2002.
- [72] F. Meyer. Alpha-beta flat zones, levelings and flattenings. In *the Proceedings of the 6th international symposium on mathematical morphology*, pages 47–68, 2002.
- [73] V. Naranjo, A. Albiol, J.M Mossi, and Al. Albiol. Morphological lambda-reconstruction applied to restoration of blotches in old films. In *Proceedings of the The 4th IASTED International Conference on Visualisation, Imaging and Image Processing*, 2004.
- [74] L. Ji and J. Piper. Fast homotopy-preserving skeletons using mathematical morphology. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(6):653–664, 1992.
- [75] R. B. Pachori and P. Sircar. Speech analysis using fourier-bessel expansion and discrete energy separation algorithm. *Digital Signal Processing Workshop, 12th - Signal Processing Education Workshop*, 4:423–428, 2006.



