



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
ELÉCTRICA – PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

ANÁLISIS LINEAL Y NO LINEAL PARA DETERMINAR DAÑO EN MATERIAL  
CEMENTICO UTILIZANDO ULTRASONIDO

TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ING. KARINA ARACELI LUGO CATALÁN

TUTOR PRINCIPAL  
DRA. LUCÍA MEDINA GÓMEZ

MÉXICO, D. F. ENERO 2014

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. ESCALANTE RAMÍREZ BORIS  
Secretario: DR. PÉREZ ALCÁZAR PABLO ROBERTO  
1 er. Vocal: DRA. MEDINA GÓMEZ LUCÍA  
2 do. Vocal: DR. PŠENIČKA BOHUMIL  
3 er. Vocal: DR. SOLÍS NÁJERA SERGIO ENRIQUE

Ciudad Universitaria México D.F

**TUTOR DE TESIS:**

DRA. LUCÍA MEDINA GÓMEZ



---

**FIRMA**

# Índice general

<b>Introducción</b>	<b>VIII</b>
<b>1. Fundamentos básicos de propagación de ondas</b>	<b>1</b>
1.1. Propagación de ondas mecánicas . . . . .	2
1.1.1. Propiedades generales . . . . .	4
1.1.2. Ondas acústicas . . . . .	6
1.1.3. Reflexión, refracción y difracción . . . . .	7
1.2. Generación del ultrasonido . . . . .	9
1.2.1. Efecto piezoeléctrico . . . . .	10
1.2.2. Transductores . . . . .	10
<b>2. Metodos de detección y localización de fracturas</b>	<b>14</b>
2.1. Correlación . . . . .	14
2.1.1. Autocorrelación . . . . .	15
2.2. Análisis espectral de potencia (DEP) . . . . .	16
2.3. Transformada Wavelet (TW) . . . . .	17
2.3.1. Transformada wavelet continua . . . . .	17
2.4. Transformada de Hilbert-Huang (THH) . . . . .	24
2.4.1. Descomposición en modo empírico (DME) . . . . .	24
2.5. Análisis de Componentes Principales . . . . .	28
2.5.1. Reducción al mínimo de residuos de proyección . . . . .	29

2.5.2. Maximización de varianza . . . . .	31
<b>3. Diseño experimental para la adquisición de señales</b>	<b>34</b>
3.1. Handy Scope HS3 . . . . .	35
3.2. Amplificador . . . . .	36
3.3. Transductores ultrasónicos . . . . .	37
3.3.1. Tiempo de respuesta . . . . .	37
3.3.2. Respuesta en frecuencia . . . . .	38
3.3.3. Ancho de banda . . . . .	39
3.4. Base para fijar los transductores . . . . .	40
3.5. Elaboración de probetas . . . . .	41
3.5.1. Procedimiento . . . . .	42
3.6. Despliegue gráfico . . . . .	44
<b>4. Resultados</b>	<b>48</b>
4.1. Caracterización del transductor . . . . .	48
4.1.1. Ancho de banda . . . . .	48
4.1.2. Respuesta del transductor a distintos pulsos de excitación . . . . .	49
4.2. Propagación de pulsos en campo lejano . . . . .	52
4.3. Detección de microfracturas . . . . .	55
4.3.1. Acondicionamiento de la señal . . . . .	55
4.3.2. Detección por el método de Autocorrelación . . . . .	56
4.3.3. Detección por el método de DEP . . . . .	58
4.4. Detección y localización de micro fracturas . . . . .	59
4.4.1. Transformada Wavelet Continua . . . . .	59
4.4.2. Método de Hilbert-Huang . . . . .	61
4.4.3. Análisis de Componentes Principales y filtrado de Wavelets . . . . .	63
<b>5. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>67</b>

*ÍNDICE GENERAL*

III

**Bibliografía**

**71**

# Índice de figuras

1.1. Ondas Raleigh . . . . .	4
1.2. Ondas Lamb . . . . .	4
1.3. Características de una onda . . . . .	5
1.4. Frente de Onda . . . . .	6
1.5. Fenómeno de Reflexión . . . . .	8
1.6. Fenómeno de Refracción . . . . .	8
1.7. Fenómeno de dispersión. . . . .	9
1.8. Partes de un transductor . . . . .	12
1.9. Zonas de Fresnel y Fraunhofer . . . . .	13
2.1. Wavelet Mexican Hat (izquierda) y su espectro (derecha) . . . . .	19
2.2. Wavelet Morlet (izquierda) y su espectro. $f_b = 1$ Hz $f_c = 1$ Hz (derecha) . . . . .	20
2.3. Wavelet Gaussiana (izquierda) y su espectro con $N=2$ (derecha) . . . . .	21
2.4. Wavelet B-spline (izquierda) y su correspondiente espectro (derecha) $p = 2$ , $f_b =$ 1 Hz y $f_c = 1$ Hz . . . . .	22
2.5. Wavelet Shannon (izquierda) y su correspondiente espectro (derecha) $f_b = 1$ Hz y $f_c = 1$ Hz . . . . .	23
2.6. Wavelet Armónica (izquierda) y su espectro con $m = 0.5$ Hz y $n = 1.5$ Hz (derecha)	24
2.7. Diagrama de flujo del algoritmo EMD . . . . .	25

3.1. Montaje experimental de los dispositivos usados para la adquisición de señales: a) tanque de acrílico, b) base para los transductores y probetas , c) probeta, d) transductor emisor, e) transductor receptor, f) cables BNC-UHF, g) amplificador y h) Handy Scope HS3® . . . . .	35
3.2. Handy Scope HS3® (a) y despliegue grafico de las funciones (b) . . . . .	36
3.3. Amplificador Panametrics® 5676 compatible con el Handy Scope HS3® . . . . .	36
3.4. En a) se muestra la duración de la onda considerando -20 dB y en b) considerando -40 dB . . . . .	38
3.5. Ancho de banda teórico (a) y ancho de banda reportado por el fabricante (b) . . . . .	39
3.6. Base para transductores diseñada con Solidworks®, la probeta se puede colocar entre los dos soportes de los transductores, los cuales tienen su caras frontales en planos paralelos. . . . .	40
3.7. En (a) el equipo empleado para la fabricación de la base, en (b) la base terminada.	41
3.8. Batidora de acuerdo con la Norma (ASTM) C 305-99) . . . . .	42
3.9. Moldes utilizados para la fabricación de las probetas . . . . .	43
3.10. Elaboración de la pasta de cemento . . . . .	43
3.11. Probetas de pastas de cemento . . . . .	44
3.12. Calibradores para el ancho de las fracturas . . . . .	44
3.13. La GUI programada en MATLAB® donde se pueden observar los diferentes parámetros de adquisición . . . . .	46
3.14. Diagrama de flujo del la interfaz gráfica . . . . .	47
4.1. Señal chirp de 100 KHz a 1000 KHz (a) y respuesta en tiempo del transductor a la señal de excitación Chirp (b) . . . . .	49
4.2. Respuesta en frecuencia del transductor a la señal Chirp, se observa la máxima amplitud alrededor de 500 KHz (línea punteada) . . . . .	49
4.3. Respuesta de los transductores a los pulsos de excitación cuadrado negativo, cua- drado positivo y sinc (izquierda) y espectros de cada uno de ellos (derecha). . . . .	51

4.4. Arreglo experimental para determinar el campo lejano. . . . .	53
4.5. Señales adquiridas variando al distancia emisor-probeta de pasta de cemento fracturada (0.88 mm), desde 1 cm hasta 8 cm. . . . .	54
4.6. En a) la señal adquirida completa, en b) se observa la señal recortada, en este caso se seleccionó solo la señal entre los primeros ecos. . . . .	55
4.7. Señal cruda (a) y señal filtrada por la media móvil (b) . . . . .	56
4.8. Autocorrelación de las probetas de control (a, b) y las probetas con fracturas de 0.25 y 0.40 mm (c, d) . . . . .	57
4.9. Autocorrelación de las probetas de control a) y b) y las fracturadas c) 0.65 mm y d) 0.8 mm. . . . .	57
4.10. Densidades espectrales normalizadas con respecto al control de las señales ad- quiridas para las distintas probetas fracturadas . . . . .	58
4.11. a) Representacion tiempo-escala para el bloque control (a) y probeta con fractura de 0.25 mm (b) . . . . .	60
4.12. Selección de la escala de máxima energía para la probeta de control y las fractu- radas. La línea punteada indica la presencia de fractura. . . . .	61
4.13. Algoritmo Hilbert-Huang aplicado a las señales estudiadas, en a) y b) el bloque de control; en c)- f) las señales procedentes de los bloques con fractura . . . . .	62
4.14. Componentes principales de las señales estudiadas, en a) y b) el resultado para la señal del bloque de control, en c)- f) las señales procedentes de las fracturas 0.25, 0.65, 0.40 y 0.80 mm. . . . .	64
4.15. Algoritmo ACP-Wavelets . . . . .	65
4.16. Componentes Principales y Transformada Wavelet aplicadas a las señales es- tudiadas, en a) y b) se observa el resultado para el bloque de control; la línea punteada muestra la presencia de un “pico” procedente de la fractura 0.25, 0.65, 0.40 y 0.80 en las imágenes c)-f). . . . .	66

# Índice de Tablas

3.1. Propiedades del Politetrafluoroetileno . . . . .	41
4.1. Valores que definen el ancho de banda del transductor de 500 KHz para los distintos pulsos de excitación . . . . .	51
4.2. Atenuación y frecuencias máximas de las DEP en función del tamaño de la fractura . . . . .	58
4.3. Tiempos de vuelo y posición de la fractura para cada uno de las probetas considerando que la velocidad de propagación es 2730 m/s. . . . .	61
4.4. Tiempo entre el primer pico y el pico procedente de la fractura; en la tercer columna se muestra la distancia aproximada en donde se encuentra la fractura. . .	63
4.5. Tiempo entre ecos para Componentes Principales con TW en la segunda columna; en la tercer columna la distancia aproximada en donde se encuentra la fractura. . . . .	66

# Introducción

*En este capítulo se plantea la importancia y la problemática que surge alrededor del análisis de los materiales cementicios ya que éstos son materiales heterogéneos, además de la importancia de los ensayos no destructivos y en particular la del método por ultrasonido.*

---

La importancia del cemento hoy en día es evidenciada por ser el material que más se produce en el mundo. El crecimiento en el consumo de cemento está directamente relacionado con el aumento de la población mundial y con el desarrollo de los países, adquiriendo un significado en el progreso económico.

Las estructuras de materiales cementicios se deterioran, afectando su funcionalidad. Estos procesos de degradación están asociados principalmente a la exposición al ambiente, y fuerzas de carga a las que están sometidos; generando alteraciones y daños en dichas estructuras alterando las propiedades mecánicas tales como la resistencia a la tracción y compresión del concreto [1]. La consecuencia general de estos fenómenos son las microfisuras internas en el material, aumentando de tamaño con el tiempo y manifestándose en la superficie del concreto con diferentes grados de descomposición. Por lo que resulta de máximo interés proponer procedimientos de monitoreo y análisis que permita obtener un diagnóstico de la estructura, así como la detección y ubicación temprana de fracturas, para realizar medidas preventivas y/o de reparación que impidan la progresión del daño, evitando así un riesgo de estabilidad, y manteniendo la seguridad estructural.

El diagnóstico y control de calidad se realizan mediante las pruebas mecánicas destructivas

y los ensayos no destructivos. Las pruebas destructivas (ED) son ensayos en las que los materiales de estudio son sometidos a esfuerzos mediante la aplicación de una fuerza externa hasta su deformación y/o ruptura para determinar sus propiedades de dureza, elasticidad, fragilidad y resistencia a la penetración. Se pueden estudiar materiales diversos como: polímeros, metales de baja dureza, materiales cerámicos, materiales compuestos, productos farmacéuticos y alimentos, así como productos o piezas elaboradas con estos materiales. Las pruebas mecánicas fueron creadas como respuesta a la necesidad de conocer el estado de los materiales, sin embargo, las pruebas destructivas tienen el inconveniente de que terminan con la vida útil de los elementos sujetos a prueba.

Se denomina ensayo no destructivo (también llamado END, o en inglés NDT de nondestructive testing) a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los END implican un daño imperceptible o nulo. Los diferentes métodos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada. En general proveen datos menos exactos acerca del estado de la variable a medir que los ensayos destructivos. Sin embargo, suelen ser más baratos para el propietario de la pieza a examinar, ya que no implican la destrucción de la misma. En ocasiones los END se utilizan para verificar la homogeneidad y continuidad del material analizado, por lo que se complementan con los datos provenientes de los ED [2].

Dentro de este amplio rango de técnicas no destructivas, la inspección por ultrasonido es de las más usadas en la actualidad, debido a su bajo costo y portabilidad.

Las ondas ultrasónicas son ondas de tipo mecánicas cuya frecuencia excede a los 20 KHz, tiene sus bases en la teoría de propagación de ondas en un medio sólido, homogéneo, isótropo y elástico. De acuerdo con la física ondulatoria se conoce que la velocidad de propagación de las ondas en un medio de características conocidas, depende principalmente de la densidad, temperatura y de las propiedades elásticas del medio por el que se desplaza [3].

Para el caso de los medio heterogéneos, la propagación acústica es muy compleja debido a la presencia de la microestructura, esto ocasiona que exista un cambio de velocidad, adicionalmente a la presencia de fenómenos tales como dispersión y esparcimiento (scattering) como función de la frecuencia, provocando el incremento en la atenuación y cambios de modo de la onda incidente. La información adquirida, mediante un transductor, contiene integrada todos los cambios sufridos en el trayecto, los cuales representan un comportamiento no lineal de la propagación del ultrasonido en medios multifásicos. Aunado a este comportamiento no lineal puede verse afectado drásticamente por la presencia de microestructura sufre debido a la presencia de microfracturas y como éstas afectan al comportamiento mecánico del espécimen. Por lo que es importante la detección y localización de los daños a temprana etapa.

Para realizar el monitoreo y control de calidad por ultrasonido del concreto (material heterogéneo y altamente atenuante) es necesario analizar la pasta cementicia, su microestructura y la variabilidad de la misma cuando aparecen las microfracturas. Para ello se requiere de realizar un protocolo experimental que permite obtener las señales con mayor control así como procesar digitalmente las señales adquiridas para resaltar la información de microfracturas y daños estructurales.

Actualmente, existen investigaciones sobre el análisis no lineal en ensayos no destructivos por ultrasonido. Shah y Hirose [4] realizaron pruebas sobre nueve probetas cilíndricas con tres relaciones en proporción de agua-cemento internamente dañadas por compresión, posteriormente utilizaron la técnica de ultrasonido para medir las amplitudes de segundos y terceros armónicos; los ensayos se realizaron utilizando transductores de banda tanto estrecha como ancha y los receptores únicamente de banda ancha. Los resultados encontrados indicaron que la relación en el tercer armónico parecía ser más sensibles al agrietamiento en las probetas de hormigón, además, los cambios en la atenuación se relacionan con la proporción de agua-cemento. Posteriormente, se compararon los resultados obtenidos en el dominio de tiempo y frecuencia para determinar el rendimiento de los transductores en relación al ancho de banda, demostrando que el uso de un transmisor de banda estrecha proporciona una mayor sensibilidad a los daños en el hormigón.

R. Draï et al [5] reportan distintos algoritmos de procesamiento de señales, como la Transformada Hilbert para la caracterización de defectos, como parte del desarrollo de métodos de análisis más novedosos que los tradicionales.

T. Bouden et al [6] realizan su investigación utilizando el método de pulso eco para la caracterización, detección y localización de fracturas en distintos materiales. En este trabajo las señales son procesadas con la Transformada de Hilbert-Huang (HHT), presentando resultados experimentales, mostrando la viabilidad del método y la herramienta de procesamiento de señales para determinar las diferencias estructurales en materiales distintos.

Recientemente Chougrani et al [7] describieron el comportamiento de los fenómenos de reflexión y transmisión cuando una grieta tiende a ser acústicamente transparente; grietas que debido a tensiones de compresión y cargas de fatiga, tienden a ser comprimidas y por lo tanto se vuelven transparentes para ondas ultrasónicas. Para investigar el comportamiento no lineal ocasionado por una grieta bajo cargas de compresión, las tensiones de excitación y el número de ciclos de la onda incidente se variaron; reportando así qué tanto la frecuencia fundamental y los armónicos están influenciados por el aumento de la fuerza de carga. Los armónicos de mayor amplitud disminuyeron drásticamente cuando la fuerza llegó a 30 KN. Rucka [8] realiza un estudio con el propósito de presentar un análisis experimental y numérico para la detección de daños basado en la transformada wavelet continua.

A partir de las investigaciones y trabajos referenciados queda en evidencia la necesidad de ahondar en el análisis no lineal del ensayo ultrasónico, ya que este enfoque ha demostrado aportar más información de fracturas, ya que la información al respecto está enmascaradas por los ecos provenientes de la microestructura del material heterógeno.

## Objetivos

### Generales

Proponer un protocolo experimental para la medición de señales ultrasónicas en transmisión utilizando probetas de cemento Portland.

Desarrollar algoritmos lineales y no lineales para la detección y localización de microfracturas dentro de materiales cementicios.

### Específicos

Elaboración de las probetas de cemento en base a estándares internacionales,

Caracterización de los elementos que conforman el arreglo experimental para transmisión y detección de las señales ultrasónicas.

## Estructura

El presente trabajo está estructurado en cinco capítulos.

En la introducción se discute la problemática del estudio de materiales no homogéneos.

En el primer capítulo se analizan los conceptos básicos de la propagación de una onda en un medio, así como las características de los medios elásticos.

En el segundo capítulo se realiza una revisión bibliográfica y se describen los métodos de procesamiento de señales, tales como Correlación, Densidad Espectral de potencia (DEP), Transformada Wavelet (TW), Transformada de Hilbert-Huang (THH) y Análisis de Componentes Principales (ACP), mismos que se aplicarán a las señales adquiridas.

En el tercer capítulo se explica el montaje de la parte experimental, describiendo los dispositivos que se utilizaron, así como la elaboración de las probetas mediante la Norma (ASTM) C 305-99.

En el cuarto capítulo se describen los resultados tanto del protocolo experimental como de la

detección y localización de micro fracturas en las probetas elaboradas de pasta de cementos. Por último las conclusiones se reportan en el capítulo 5.

# Capítulo 1

## Fundamentos básicos de propagación de ondas

*La energía ultrasónica tiene su origen en la naturaleza, el primer indicio fue referenciado en 1779 el biólogo L. Spallanzani en el estudio de actividad de caza y orientación de los murciélagos, sin embargo éstas conclusiones únicamente fueron a nivel observacional ya que no existía instrumento de medición. En 1880 con el descubrimiento del efecto piezoeléctrico se dió origen a generación y detección de las ondas ultrasónicas en la naturaleza.*

*En 1924 el científico ruso Sergei Y. Sokolov propuso el uso del ultrasonido como elemento efectivo para la inspección industrial, particularmente para la búsqueda de heterogeneidades en los materiales, sus investigaciones realizadas se establecieron básicamente en la caída de la intensidad del haz cuando éste atravesaba los materiales con discontinuidades.*

*F. Firestone, hacia 1940, desarrolló un refractoscopio que producía pulsos cortos de energía que detectaba energía al ser reflejada por grietas y fracturas, con esto logró la detección de heterogeneidades y cambio de espesor en la superficie del medio en estudio, específicamente en caucho [9].*

*A partir de 1945, los ensayos por ultrasonido tuvieron una aceptación general, favorecida por la urgente demanda de ensayos no destructivos. En años recientes los avances en la ins-*

trumentación y la tecnología electrónica, han proporcionado las herramientas necesarias para hacer posible el desarrollo de este método.

Los últimos avances en el ultrasonido se han basado en las técnicas de procesamiento de señales digitales y microprocesadores de bajo costo, los cuales han estado disponibles a partir de la década de 1980, llevando a la última generación, desarrollando instrumentos portátiles de alta fiabilidad y sistemas de inspección para la detección de fallas, medición de espesores y generación de imágenes acústicas [10].

En este capítulo se abordan los conceptos de la propagación de ondas en medios homogéneos y no homogéneos. Se hace la descripción de los materiales a partir de sus constantes elásticas, así como las relaciones que guardan las mismas con los parámetros que definen la propagación de una onda mecánica.

---

## 1.1. Propagación de ondas mecánicas

La materia se encuentra formada por moléculas cuya manera de distribución y fuerza de atracción entre ellas depende del estado en que se encuentra. En estado sólido las moléculas están fuertemente atraídas entre sí, y su distribución se presenta en forma aleatoria; cuando las fuerzas de atracción presentes en los sólidos son de tipo elásticas, implica que mientras no se sobrepase el límite de elasticidad, las deformaciones que se produzcan no serán permanentes.

Sí un cuerpo elástico está sujeto a esfuerzos ocurren cambios relativos en la dimensión o forma del cuerpo, tales cambios se consideran deformaciones. La relación que establece la proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación está dada por la Ley de Hooke, la cual establece que una deformación, es directamente proporcional al esfuerzo producido. Las relaciones que existen entre deformación y esfuerzo están dada por constantes elásticas: módulo de Young, coeficiente de Poisson y módulo incompresibilidad.

Se denomina módulo de Young a la razón entre el incremento del esfuerzo y el cambio

correspondiente a la deformación unitaria, el coeficiente de Poisson es la relación entre las deformaciones unitarias transversal y longitudinal. El módulo incompresibilidad es la medida de resistencia de los materiales elásticos a la compresión, es decir, al cambio de volumen sin que altere su forma básica, es la relación entre el esfuerzo y el cambio unitario de volumen.

Una forma de deformación es la aplicación de una onda mecánica, la cual se obtiene al hacer incidir una perturbación en un sólido causando un movimiento en sus moléculas respecto a su punto de equilibrio, permitiendo la propagación de la onda. Dependiendo de las características del material o medio de propagación la energía mecánica se propaga en direcciones preferenciales, que se pueden definir como ondas longitudinales, transversales, de Rayleigh o de Lamb [11].

Las ondas longitudinales son aquellas en que la deformación se produce en la dirección de propagación de la onda, son generadas en cualquier medio. Las ondas transversales son perpendicular a la dirección de la propagación de la onda, se deben a los esfuerzos de corte y a la interacción de las moléculas vecinas por lo que sólo aparecen en los fluidos viscoso y en los sólidos, su velocidad de propagación es mucho menor que la velocidad de las ondas longitudinales.

Las ondas Rayleigh son ondas superficiales que producen un movimiento elíptico (Figura 1.1). Son ondas más lentas que las ondas internas y su velocidad de propagación es casi un 70% de la velocidad de las ondas transversales y por último las ondas Lamb (Figura 1.2) que se propagan en la capa límite entre placas delgadas (del orden de algunas longitudes de onda de espesor) con ambas superficies libres. Se caracterizan por ser dispersivas y por la existencia de un conjunto discreto de modos de propagación, debido a que las componentes de los vectores de onda normales a la placa deben satisfacer las condiciones de frontera libre [12].

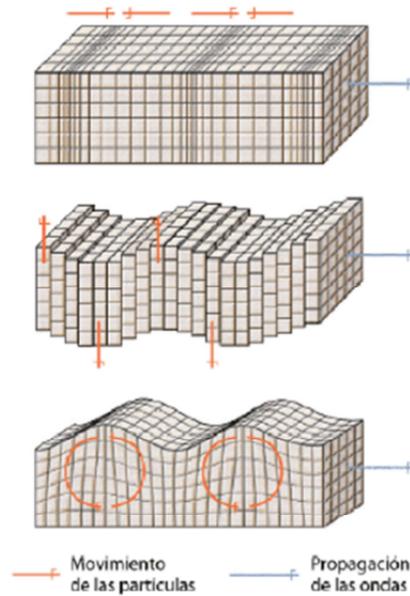


Figura 1.1: Ondas Raleigh

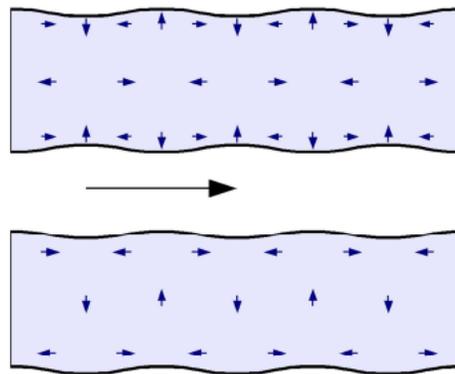


Figura 1.2: Ondas Lamb

### 1.1.1. Propiedades generales

Las ondas, ya sean mecánicas o electromagnéticas comparten ciertas características y su estudio permite un mejor entendimiento de éstas. La amplitud de una onda ( $y$ ) es una medida de la variación máxima del desplazamiento, es la distancia máxima entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio como se observa en la Figura (1.3).

La longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia entre dos crestas consecutivas. Si el fenómeno se

propaga con una velocidad  $V$  entonces se tiene que:

$$\lambda = VT \quad (1.1)$$

o

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (1.2)$$

donde  $T$  y  $f$  son el periodo y la frecuencia, respectivamente, y su relación está dada por

$$T = \frac{1}{f}$$

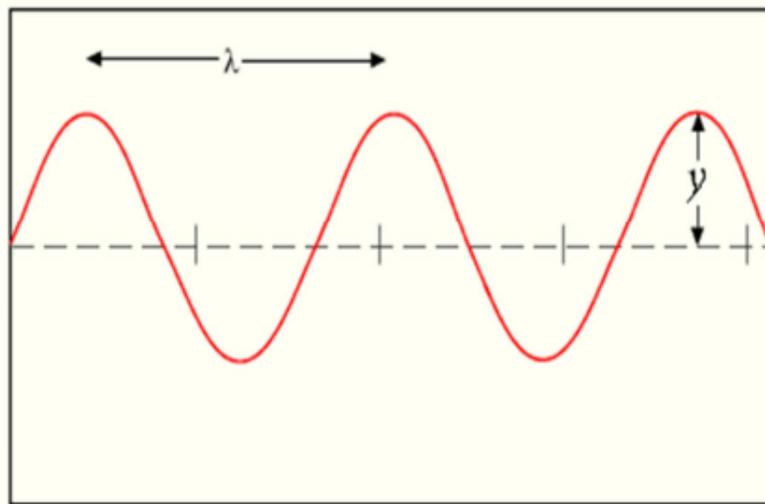


Figura 1.3: Características de una onda

Es importante diferenciar entre tipos y modos de velocidad, los tipos son la velocidad de grupo y la velocidad de fase y los modos pueden ser longitudinales y transversales. La velocidad de grupo se refiere a la rapidez de movimiento de toda la onda (envolvente) y la velocidad de fase es la rapidez del desfase de la onda [13]. En un medio dispersivo la velocidad de fase varía respecto a la frecuencia y no necesariamente es la misma que la de grupo.

De acuerdo con la ecuación diferencial de una onda longitudinal:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{E}{\rho} \frac{d^2y}{dx^2} \quad (1.3)$$

$E$  =módulo de elasticidad del material,  $\rho$  = densidad del material,  $\mu$  =módulo de rigidez

Se llega a la velocidad de la onda longitudinal

$$V = \sqrt{E/\rho} \quad (1.4)$$

y considerando la relación de Poisson

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}} \quad (1.5)$$

En donde se observa que la velocidad del sonido depende del medio en que se propaga [14].

El frente de onda es el conjunto de todos los puntos en que la fase de la onda es constante. Estos frentes de ondas pudiesen ser representados como superficies o líneas, de acuerdo a las dimensiones; con dos dimensiones se consideran líneas y con tres dimensiones se consideran superficies, las cuales se desplazan alejándose de la fuente sin tocarse como se observa en la imagen de la Figura (1.4).

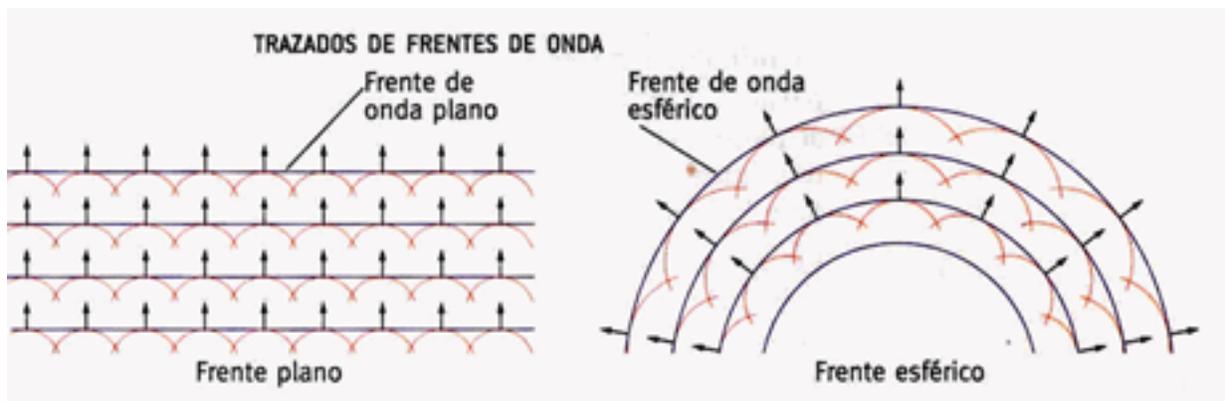


Figura 1.4: Frente de Onda

### 1.1.2. Ondas acústicas

El sonido es una onda mecánica longitudinal que se produce por la vibración de un medio elástico que puede ser sólido, líquido o gaseoso, las ondas sonoras necesitan de un medio para transportarse; transmitiéndose así por variaciones de presión del medio, propagando energía de

un punto a otro.

La impedancia acústica representa la resistencia que tiene un material a ser deformado y se expresa por [15]:

$$Z = \rho V \quad (1.6)$$

Ej. un material que posee baja impedancia acústica tiene baja resistencia a las deformaciones.

### 1.1.3. Reflexión, refracción y difracción

La interacción entre la perturbación ultrasónica y los cambios de medio producidos por las discontinuidades del medio, produce tres fenómenos relacionados con la propagación de ondas, reflexión, refracción y difracción (ver Figura 1.5) [12].

Una onda al incidir sobre una superficie de propiedades elásticas distintas parte de su energía es reflejada por la superficie. La reflexión es el cambio de dirección que experimenta una onda cuando llega a un obstáculo o un medio con distinta impedancia acústica. Aunque el medio absorbe parte de la energía recibida se produce también reflexión en la que se transmite parte de la energía a las partículas del medio incidente.

Diversos factores intervienen cuando se presenta la reflexión. El material del que está compuesto el cuerpo en el cual se incide provoca reacciones distintas; las ondas sonoras pueden ser absorbidas por ciertos materiales o producir reflexiones que en ciertos casos pueden ser beneficiosas, o indeseables ya que producirán fenómenos de reverberación y eco.

Cuando el sonido es reflejado en forma reiterada, se presenta el fenómeno de reverberación, el cual se origina al mezclarse ondas directas provenientes de la fuente con otras que han sido reflejadas. Si el reflejo del sonido perdura mucho tiempo, la reverberación impide una buena percepción de la onda emitida [16].

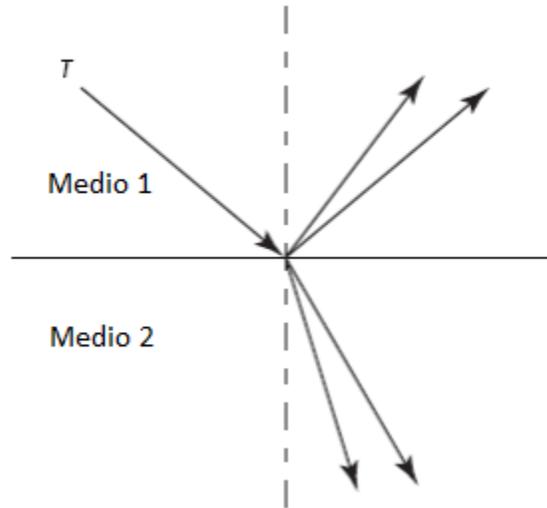


Figura 1.5: Fenómeno de Reflexión

La refracción es el cambio en la dirección de propagación de una onda que atraviesa la superficie de separación entre dos medios con distinta impedancia acústica (ver Figura 1.6).

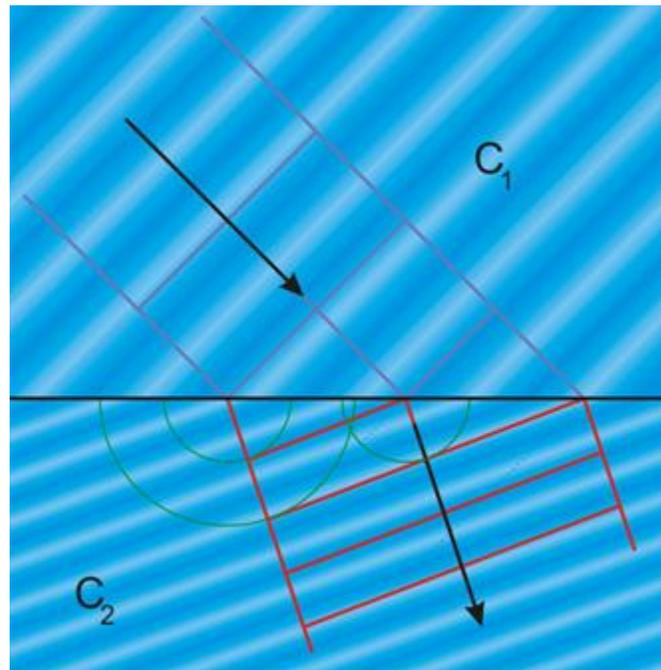


Figura 1.6: Fenómeno de Refracción

La consecuencia importante de la propagación de la onda en cualquier medio es la atenuación que se debe a dos factores simultáneos:

$$[\text{Pérdida de intensidad} = \text{Absorción} + \text{Dispersión}]$$

La absorción es la conversión de la energía mecánica en calor, por efectos termo-elásticos, relacionados principalmente por las características del medio de propagación y la frecuencia de las ondas. En el rango de frecuencias que se emplean en los ensayos no destructivos, la absorción es directamente proporcional a la frecuencia. Los materiales no homogéneos, presentan discontinuidades en la impedancia acústica, dando lugar al efecto de dispersión, basado en la transmisión y reflexión del frente de pulsos en incidencia con esas heterogeneidades del material (Ver Figura 1.7) [11, 14, 17]. Los fenómeno de dispersión y esparcimiento (scattering) se generan cuando el tamaño de los poros o inhomogeneidades son comparables o más pequeños que la longitud de onda incidente, ocasionando que la velocidad de fase y la de grupo sean diferentes y dependientes de la frecuencia.

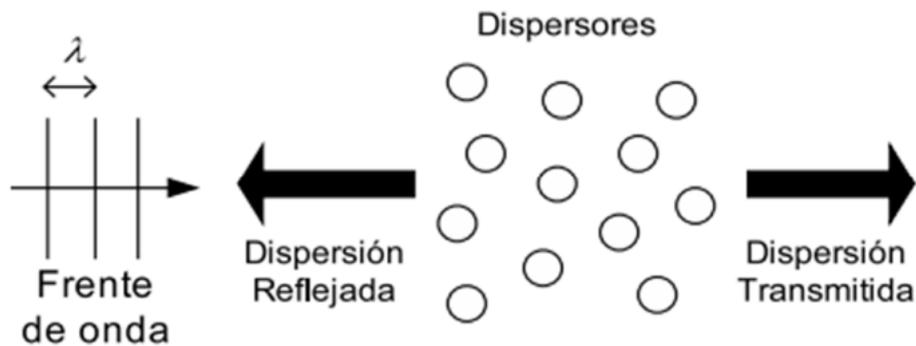


Figura 1.7: Fenómeno de dispersión.

## 1.2. Generación del ultrasonido

Existen numerosas formas de producción de ondas ultrasónicas, haciendo uso de diversos fenómenos físicos como es la capacitancia, magnetostricción o el efecto piezoeléctrico.

### 1.2.1. Efecto piezoeléctrico

En 1883 los hermanos Jacques y Pierre Curie descubrieron que al aplicar presión a un cristal de cuarzo se establecían cargas eléctricas en éste, llamando a tal fenómeno “efecto piezoeléctrico”, posteriormente se realizó la aplicación práctica del fenómeno por primera vez por Paul Langevin, quien durante la primera Guerra Mundial utilizó cristales de cuarzo acoplados a masas metálicas dando lugar al transductor tipo Langevin los cuales fueron utilizados en detectores ultrasónicos de submarinos.

Los cuarzos fueron los primeros en utilizarse, éstos son muy estables en cuanto a frecuencia, sin embargo, son pobres en la generación de energía acústica. El sulfato de litio, aunque es un material frágil, es muy eficiente como receptor de energía acústica, para temperaturas por debajo de los 75 °C [16].

Durante la década de los cuarentas se descubrieron otros materiales, como resultado de la investigación y un posterior perfeccionamiento de dichos materiales se elaboraron materiales piezoeléctricos sintéticos que requerían voltajes de excitación menores a diferencia de los primeros materiales piezoeléctricos.

Debido a que los materiales piezoeléctricos de tipo cerámicos muestran los mejores factores de conversión electromecánica además de las propiedades más favorables para la transducción de potencia, son los que más comúnmente se usan, aunque tienden a desgastarse.

El cristal piezoeléctrico, es el encargado de la transducción de la onda eléctrica-ultrasónica y de manera inversa.

Generalmente el espesor del cristal piezoeléctrico o también llamado elemento activo, se determina de acuerdo con la frecuencia requerida del transductor. A medida que se requieren frecuencias más altas, el espesor del elemento activo será más delgado.

### 1.2.2. Transductores

Los transductores constituyen uno de los dispositivos básicos de los equipos de ultrasonido [18]. Existe una gran variedad de transductores como son los piezoeléctricos, de capacitancia,

magnetostricción, y su uso está confinado de acuerdo con las necesidades requeridas, una clasificación de éstos refiere en dos grupos: transductores de contacto y transductores de inmersión.

Los transductores de contacto se colocan directamente a la superficie de la muestra con cierta presión, interponiendo en la mayoría de los casos un medio de acople, como grasas, glicerina, aceites o vaselina para eliminar la película de aire entre el transductor y el componente analizado. De acuerdo a la dirección de propagación del haz emitido, con relación a la superficie del material, estos transductores se clasifican, a su vez, en transductores de incidencia normal y en transductores angulares. Son empleados en inspecciones que necesitan contacto con la pieza, cuentan con una carcasa ergonómica y una interface que impide el desgaste de la cara de contacto con el material bajo prueba [18].

En los transductores de inmersión, no están en contacto con la pieza más bien utilizan una columna de acoplante, por tanto, están diseñados para operar dentro de este medio y tienen todas sus conexiones aisladas para evitar el deterioro de los componentes.

Sin la presencia de un contacto directo con la pieza, no existe la presión ni el contacto entre el transductor y el material, excluyendo así, riesgos de fractura y desgaste del material piezoeléctrico; además permite el uso de frecuencias más altas, de las que se pueden usar con los transductores contacto, ya que el peligro de fractura de los cristales es mínimo, recordando que para frecuencias altas el ancho del cristal disminuye [16].

El elemento activo está conectado eléctricamente al exterior a través de conductores soldados a los electrodos que cubren al elemento piezoeléctrico. Aunado a dicho elemento, se encuentran elementos no activos que determinan las características temporales de emisión-recepción, llamados “backing” o contramasa y la capa de acoplamiento (Ver Figura 1.8).

El empleo de la contramasa en la cara posterior tiene como objetivo absorber la energía mecánica en la dirección opuesta y detener el movimiento de oscilación, originando una mayor resolución, este componente suele fallar en los equipos de uso continuo.

La capa de acoplamiento cumple con dos funciones, proteger el elemento activo, además de asegurar una mayor transferencia de energía, confinando de mejor forma el haz ultrasónico.

La carcasa del transductor proporciona un soporte estructural a los componentes internos para que el dispositivo pueda ser manipulado sin agregar cuidados adicionales.

El conector está localizado en la parte posterior del transductor y además contiene a los cables conductores que transmiten las señales eléctricas a cada cara del cristal, recubiertas por un material conductor.

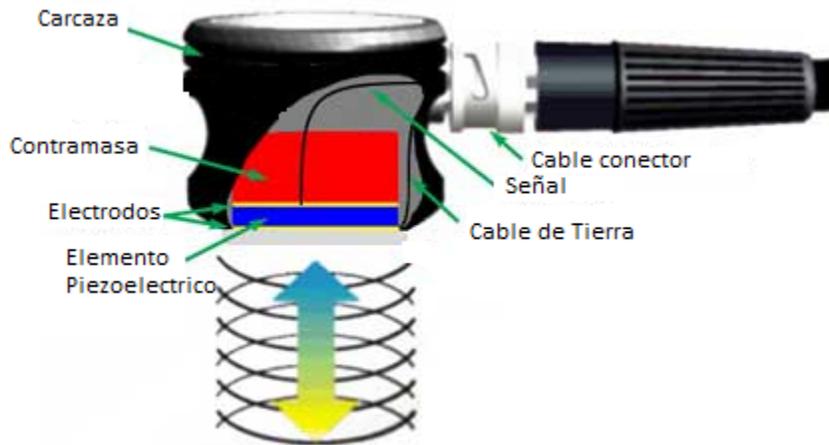


Figura 1.8: Partes de un transductor

Midiendo la intensidad del haz emitido a diferentes distancias del transductor, se observa que es posible distinguir tres zonas: muerta, campo cercano o de Fresnel y lejano o Fraunhofer (Ver Figura 1.9). La zona muerta se debe a la interferencia que se produce por las vibraciones del piezoeléctrico.

Zona de campo cercano o zona de Fresnel (Figura 1.9), en la cercanía del transductor están presentes grandes fluctuaciones en la presión acústica, puede ser complicado realizar una evaluación de precisión a las fallas que se encontrasen en los materiales. Debido a la existencia de los lóbulos laterales existen fluctuaciones de la intensidad del campo producidas por los bordes del cristal de acuerdo con el principio de Huygens [18].

Para determinar cada una de las regiones, existe la relación entre el diámetro del transductor  $D$  y la longitud de onda incidente, conocido como zona de transición o foco natural [16]:

$$N = \frac{D^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (1.7)$$

Para longitudes de onda muy corta, en comparación con el diámetro del transductor, se puede despreciar  $\lambda^2$  obteniendo la siguiente expresión, donde R es el radio del transductor y S es la superficie del transductor.

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{R^2}{\lambda} = \frac{S}{\pi\lambda} \quad (1.8)$$

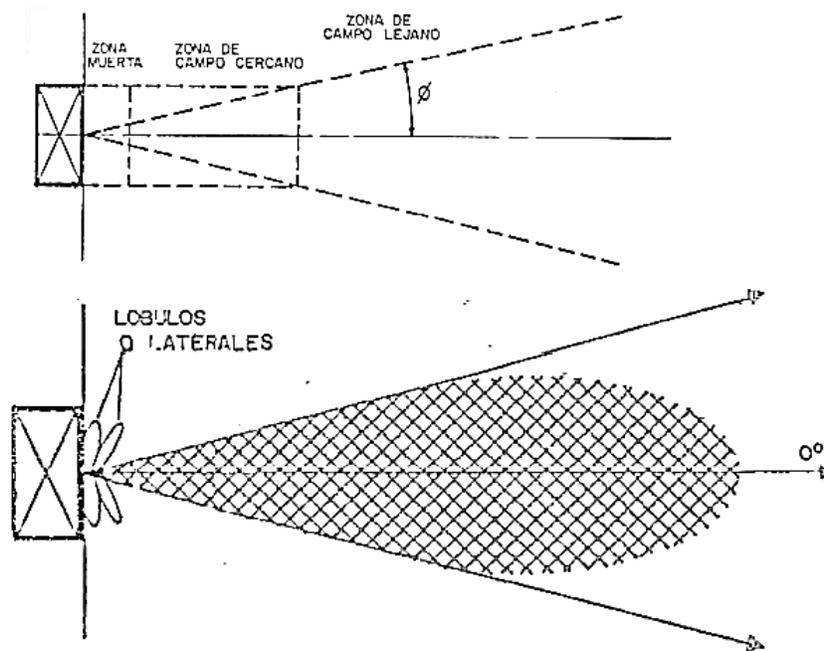


Figura 1.9: Zonas de Fresnel y Fraunhofer

Después de la zona del campo cercano, se encuentra la zona de campo lejano o zona de Fraunhofer, donde se encuentra el máximo de presión acústica ya que la suma la contribución de todas fuentes sonoras puntuales se suman armónica y constructivamente.

# Capítulo 2

## Metodos de detección y localización de fracturas

*En este capítulo se describen los métodos de análisis para el procesamiento de la señal, con éstos se extraerá la información enmascarada en la señal debido a la microestructura del material, para la detección y localización de la fractura.*

---

Las señales provenientes de los transductores son muy ruidosas y atenuadas, debido a la microestructura propia de los materiales heterogéneos. El Procesamiento Digital de Señales (PDS) da las herramientas matemáticas, algoritmos de transformaciones, y técnicas para resaltar, suprimir o extraer la información de una señal. Tales técnicas se usarán para la detección de la fractura así como la posición de ésta, información enmascarada debido a la naturaleza heterogénea y dispersiva del material.

### 2.1. Correlación

Una de las herramientas del PDS es la correlación, usada para cuantificar el grado de similitud entre varias señales, este grado de dependencia se puede definir matemáticamente de acuerdo a la siguiente expresión:

$$r_{xy}(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)y(n-k) \quad ; \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.1)$$

$$r_{xy}(k) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n+k)y(n) \quad ; \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.2)$$

donde  $k$  es el índice de corrimiento en el tiempo, donde  $r_{xy}(k) = r_{yx}(-k)$  esto significa que  $r_{xy}(k)$  es un doblamiento de  $r_{xy}(k) = r_{yx}(-k)$ .

Entonces la correlación de  $r_{xy}(k)$  se puede escribir como la convolución:

$$r_{xy}(k) = x(k) \star y(-k)$$

Valores grandes y positivos indicarán que ambas señales sonsimilares y crecen a la vez; valores negativos indican que el crecimiento de una variable está asociado con el decremento de la otra. Por otra parte valores próximos a cero indican que las señales no tienen similitud, como ocurrirá al correlacionar dos señales de ruido aleatorio ya que las contribuciones positivas y negativas tenderán a cancelarse [19].

### 2.1.1. Autocorrelación

Un caso particular de la correlación cruzada es la autocorrelación, que se refiere a los valores relacionados en instantes diferentes en una señal. La expresión de la autocorrelación se expresa:

$$r_{xx}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)x(n-k) \quad (2.3)$$

Un valor positivo (o negativo) de  $x(n)$  genera una sucesión de valores positivos (o negativos). Esto es autocorrelación positiva. Si se manifiesta por la alternancia de signos en la sucesión de valores, entonces se llama autocorrelación negativa.

En el caso particular que el desplazamiento entre secuencias sea cero, es decir  $k = 0$  la autocorrelación coincide con la energía de la señal:

$$r_{xx}(0) = \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n) \quad (2.4)$$

## 2.2. Análisis espectral de potencia (DEP)

El análisis espectral describe la distribución en función de las frecuencias de la potencia contenida en una señal, basado en un conjunto finito de datos [20]. En términos generales, la manera de estimar la Densidad Espectral de Potencia (DEP) de un proceso es encontrar la Transformada de Fourier discreta TFD y calcular el cuadrado de la magnitud del resultado.

Dado un proceso estocástico estacionario  $x(t)$ , la Densidad Espectral de Potencia del mismo es

$$G_x(f) = F \{R_x(\tau)\} = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} (d\tau) \quad (2.5)$$

La densidad espectral de potencia  $G_x(f)$  y la función de autocorrelación  $r_{xx}(t)$  de un proceso estacionario, reciben el nombre de relaciones de Wiener–Khintchine y son similares a las definidas para señales de potencia periódicas.

El valor a frecuencia cero de la DEP de un proceso es igual al área bajo la curva de la autocorrelación según la ecuación (2.5), haciendo  $f = 0$ .

$$G_x(0) = \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) d\tau \quad (2.6)$$

Adicionalmente es una función par de la frecuencia y siempre es positiva.

$$S_x(-f) = S_x(f) \quad (2.7)$$

$$S_x(f) \geq 0$$

$\forall f$

### 2.3. Transformada Wavelet (TW)

La transformada wavelet (TW) es una técnica multirresolución diseñada para proporcionar en forma simultánea información tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, es ideal para representar señales no estacionarias y/o con fluctuaciones no predecibles. Las TW son una familia de funciones de soporte compacto que pueden tener representación analítica conocidas como wavelets continuas (TWC) y aquellas que están definidas como un conjunto discreto de datos con escalas diádicas llamadas wavelets discretas (TWD).

El principio básico de TWC es representar la señal en estudio en el espacio tiempo mediante la convolución de un kernel  $\psi_{s,\tau}(t)$  y la señal  $f(t)$  de análisis definida como [21]:

$$W_f(s, \tau) = \int f(t) \psi_{s,\tau}^*(t) dt \tag{2.8}$$

donde

$$\psi_{s,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{\|s\|}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right), \tag{2.9}$$

es la versión de la wavelet madre  $\psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right)$ , bajo cierto factor de escala  $s$  y desplazamiento  $\tau$ . Si  $s > 1$  (oscilaciones lentas) la wavelet se dilatará, y se contraerá cuando  $s < 1$  (oscilaciones rápidas), permitiendo el análisis multiespectral en cada instante de tiempo.

#### 2.3.1. Transformada wavelet continua

La wavelet continua transforma señales utilizando directamente la definición de la transformada wavelet calculando la convolución de la señal con la wavelet escalada, otro método para este cálculo es realizar la transformada de Fourier de la señal y de la wavelet, multiplicarlas en el espacio de las frecuencias y aplicar la transformada inversa de Fourier del producto. El procedi-

miento anterior es iterativo variando la escala de la wavelet obteniendo una matriz  $N \times M$ , donde  $N$  es la longitud de la señal de análisis y  $M$  es el número de compresiones y expansiones de la wavelet.

La elección de la wavelet que se utiliza para la descomposición de tiempo-frecuencia es lo más importante ya que esta elección puede influenciar en la resolución en el tiempo y la frecuencia del resultado, cada una de ellas tiene características importantes como buena resolución en tiempo y baja en frecuencias o viceversa como lo indica el Principio de Incertidumbre de Heisenberg.

Para realizar el análisis wavelet se requiere seleccionar o diseñar la wavelet adecuada y determinar las escalas para el análisis. La forma del kernel generalmente se selecciona con características similares a las estructuras que se requieren resaltar y los niveles de descomposición (escalas) dependen del ancho de banda del fenómeno analizado, en base a las contribuciones de energía [22].

Existen diversos kernels definidos en las wavelets continuas cada uno de ellos extrae características distintivas de la señal por analizar. Entre ellos se encuentran:

- I) Mexican Hat

Es la segunda derivada de una función gaussiana, que se define como [23]:

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}s^3} \left(1 - \frac{s^2}{t^2}\right) e^{-\frac{t^2}{2s^2}} \quad (2.10)$$

en donde  $s$  es la escala o ancho de banda; la Figura 2.1 ilustra la wavelet Mexican Hat a tres diferentes escalas  $s_1 > s_2 > s_3$  (izquierda) y su espectro asociado (derecha); se observa que es simétrica en el espacio del tiempo y que al aumentar la escala de la wavelet se hace más lenta, para su espectro se observa que se va haciendo más estrecho el ancho de banda, el cual se presenta como no es simétrico, se observa como se privilegian las altas frecuencias además que se va recorriendo hacia las altas frecuencias.

A menudo es llamada wavelet Ricker en geofísica, en donde se emplea con frecuencia para

modelar datos sísmicos [24, 25]

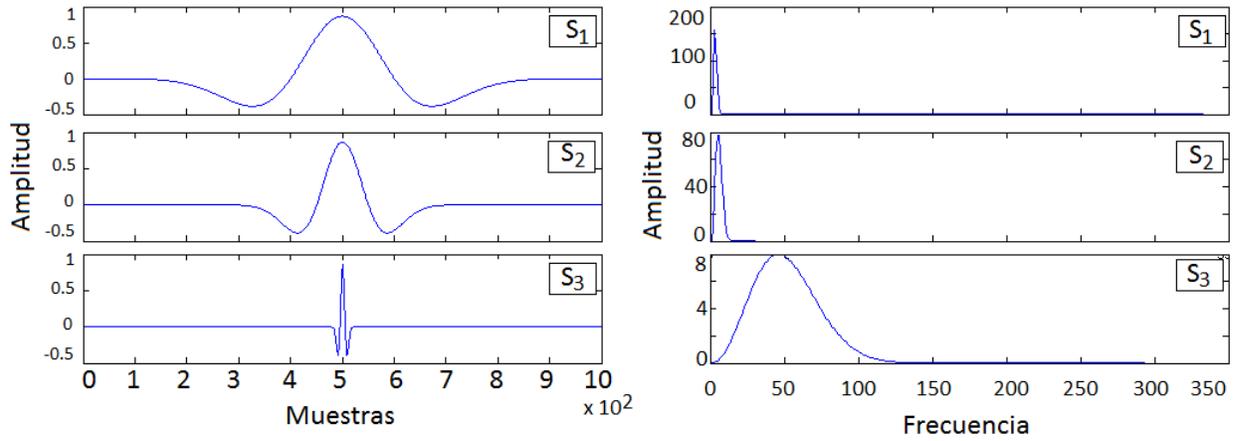


Figura 2.1: Wavelet Mexican Hat (izquierda) y su espectro (derecha)

■ II) Morlet

La wavelet Morlet se define como [26, 27]

$$\psi_M(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi s}} e^{j2\pi f_c t} e^{-\frac{t^2}{s}} \tag{2.11}$$

en donde  $s$  es el parámetro de ancho de banda o escala y  $f_c$  denota la frecuencia central de la wavelet. La Figura 2.2 ilustra la función compleja wavelet Morlet a tres diferentes escalas y su correspondiente espectro, se observa que al aumentar el valor de la  $s$  en  $s_1 > s_2 > s_3$ , el ancho de banda disminuye, además de ser simétrico, este presenta un corrimiento a altas frecuencias. La wavelet Morlet ha sido ampliamente utilizada para la identificación de componentes transitorios dentro de una señal, por ejemplo, las vibraciones inducidas por un defecto [28, 29, 30].

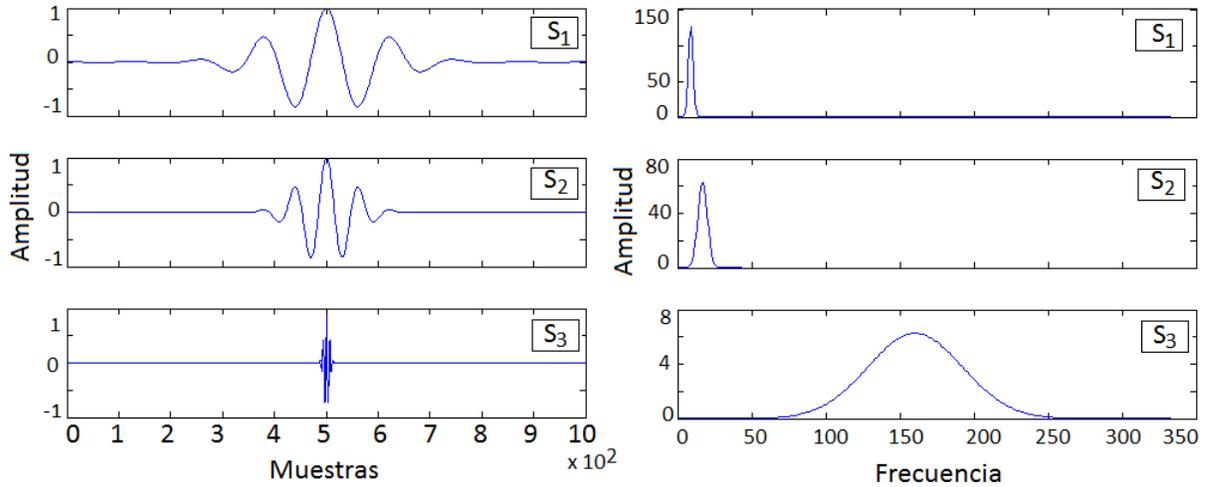


Figura 2.2: Wavelet Morlet (izquierda) y su espectro.  $f_b = 1 \text{ Hz}$   $f_c = 1 \text{ Hz}$  (derecha)

■ III) Gaussiana

Matemáticamente una función de Gauss se expresa como [27]

$$f(t) = e^{-st} e^{-t^2} \tag{2.12}$$

Tomando la  $N$  – esima derivada de esta función se obtiene la wavelet Gaussiana como:

$$\psi_G(t) = c_N \frac{d^{(N)} f(t)}{dt^N} \tag{2.13}$$

en donde  $N$  es un parametro entero ( $\geq 1$ ), denota el orden de la wavelet y  $c_N$  es una constante introducida para asegurar que

$$\|f^{(N)}(t)\|^2 = 1 \tag{2.14}$$

La Figura 2.3 ilustra la función gaussiana con su espectro de frecuencias para el caso de  $N = 1$  a tres diferentes escalas  $s_1 > s_2 > s_3$ ; se observa el cambio de las wavelets al aumentar la escala, estas se hacen más lentas mientras que el espectro de frecuencias de cada una de ellas se va haciendo más estrecho, este además no es simétrico para esta  $N$ , se observa como se privilegian

las altas frecuencias.

La wavelet gaussiana se utiliza a menudo para la caracterización de singularidades que existan en una señal [31, 32].

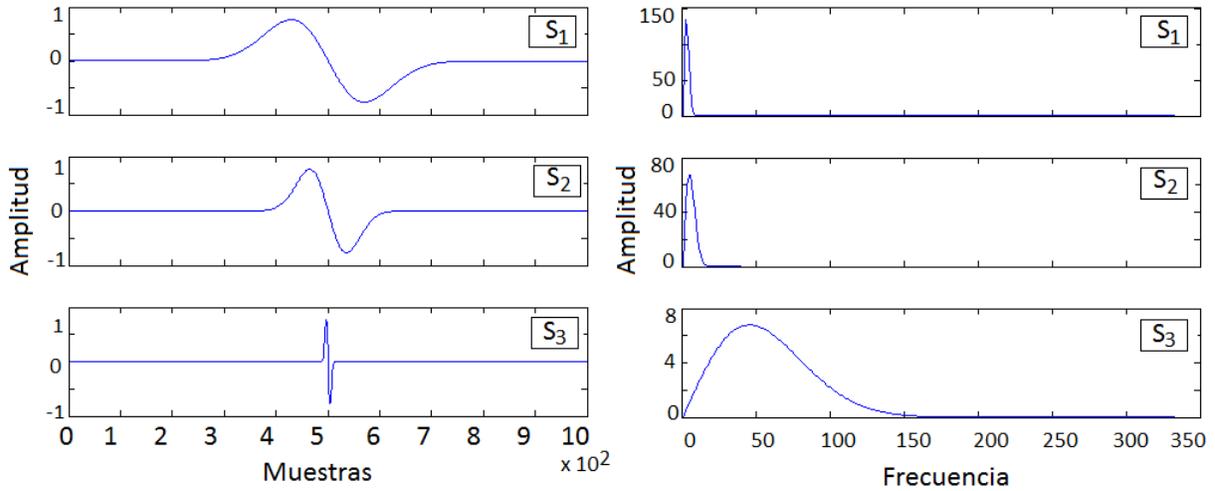


Figura 2.3: Wavelet Gaussiana (izquierda) y su espectro con N=2 (derecha)

■ IV) B -Spline

Una wavelet en frecuencia B -spline se define como [27]

$$\psi_B(t) = \sqrt{s} \left[ \text{sinc} \left( \frac{st}{p} \right) \right]^p e^{j2\pi f_c t} \tag{2.15}$$

en donde  $s$  es el parámetro de ancho de banda,  $f_c$  denota la frecuencia central de la wavelet y  $p$  es un parametro entero ( $\geq 2$ ). La notación de  $\text{sinc}(\cdot)$  se define como

$$\text{sinc}(x) = \begin{cases} 1 & x = 0 \\ \frac{\sin(x)}{x} & \text{otro caso} \end{cases} \tag{2.16}$$

Como un ejemplo de una wavelet B-spline para el caso de tres diferentes escalas  $s_1 > s_2 > s_3$  y  $p = 2$  junto con su correspondiente espectro se muestra en la Figura 2.4; al aumentar la escala la wavelet se hace más lenta, ademas observamos que el espectro es una señal triangular.

La aplicación de la wavelet B -spline se ha visto en el análisis de señales biomédicas [33, 34].

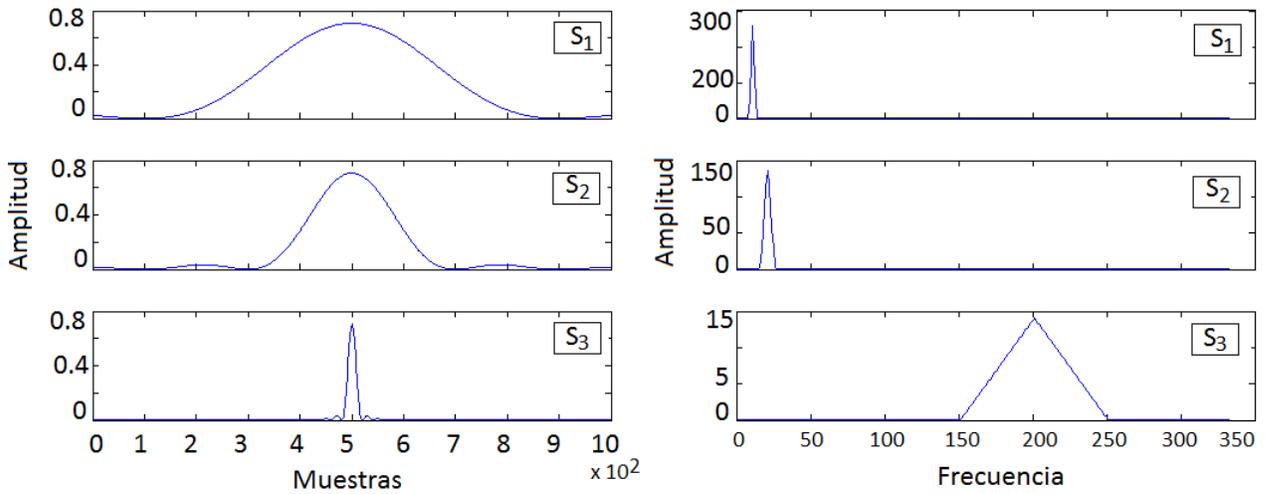


Figura 2.4: Wavelet B-spline (izquierda) y su correspondiente espectro (derecha)  $p = 2$ ,  $f_b = 1$  Hz y  $f_c = 1$  Hz

■ V) Shannon

La wavelet Shannon es un caso especial de la wavelet B-spline para  $p = 1$ :

$$\psi_S(t) = \sqrt{s} e^{j2\pi f_c t} \text{sinc}(st) \tag{2.17}$$

en donde  $s$  es el parámetro de ancho de banda y  $f_c$  denota la frecuencia central de la wavelet. La notación de  $\text{sinc}(\cdot)$  es como la definida en 2.16. La Figura 2.5 ilustra la wavelet Shannon para el caso de tres diferentes escalas  $s_1 > s_2 > s_3$ , con su correspondiente espectro, nuevamente se observa como al aumentar la escala la wavelet se hace lenta y su espectro se hace mas estrecho, esta wavelet presenta un espectro como un escalón . La wavelet Shannon se ha utilizado para el análisis y síntesis de procesos  $1/f$  [35].

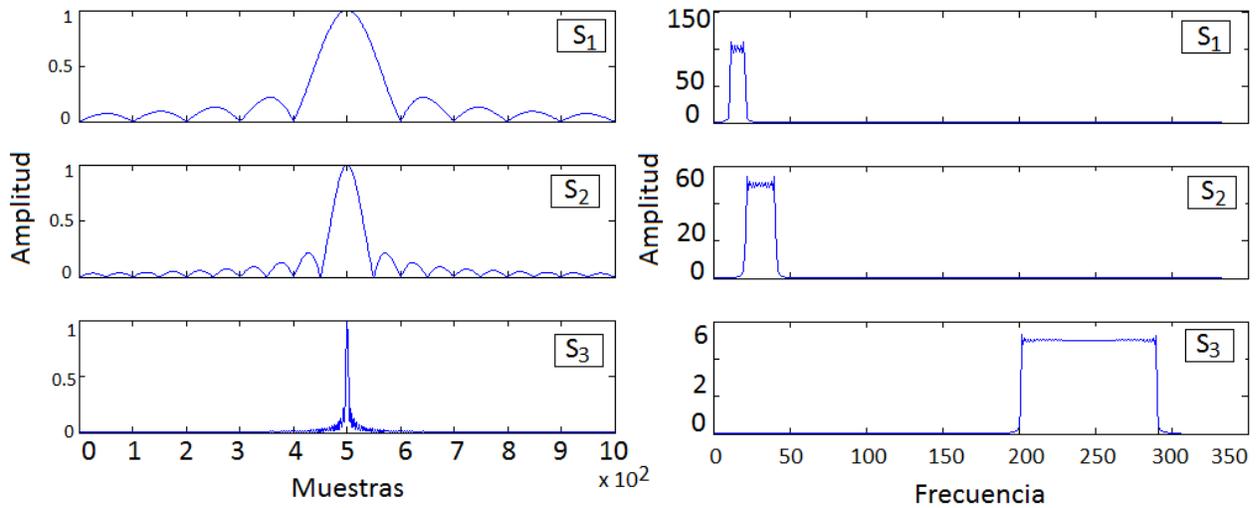


Figura 2.5: Wavelet Shannon (izquierda) y su correspondiente espectro (derecha)  $f_b = 1$  Hz y  $f_c = 1$  Hz

■ VI) Armónica

La wavelet armónica se define en el dominio de la frecuencia como [36, 37, 30].

$$\Psi_{m,n} = \begin{cases} \frac{1}{n-m} & m \leq f \leq n \\ 0 & \text{otro caso} \end{cases}$$

donde los símbolos  $m$  y  $n$  son los parámetros de escala. Estos parámetros son reales, pero no necesariamente enteros. Además, el ancho de banda  $s$  y la frecuencia central  $f_c$  son determinado por el parámetro de escala como

$$s = n - m; \quad f_c = \frac{n + m}{2}$$

Como un ejemplo la Figura 2.6 muestra la función wavelet armónica y su espectro correspondiente para el caso de  $m = 0,5$  y  $n = 1,5$  para tres escalas diferentes  $s_1 > s_2 > s_3$ , se puede observar como al aumentar la escala la señal se hace más lenta y el espectro de frecuencias se vuelve más estrecho, para esta wavelet el espectro es un escalón. La wavelet armónica fue diseñada primero por Newland para el análisis de señales de vibración [38]. Más tarde, la aplicación

de la wavelet armónica se ha extendido a análisis de la variabilidad de la frecuencia cardíaca [39] y a la eliminación de ruido en imágenes [40].

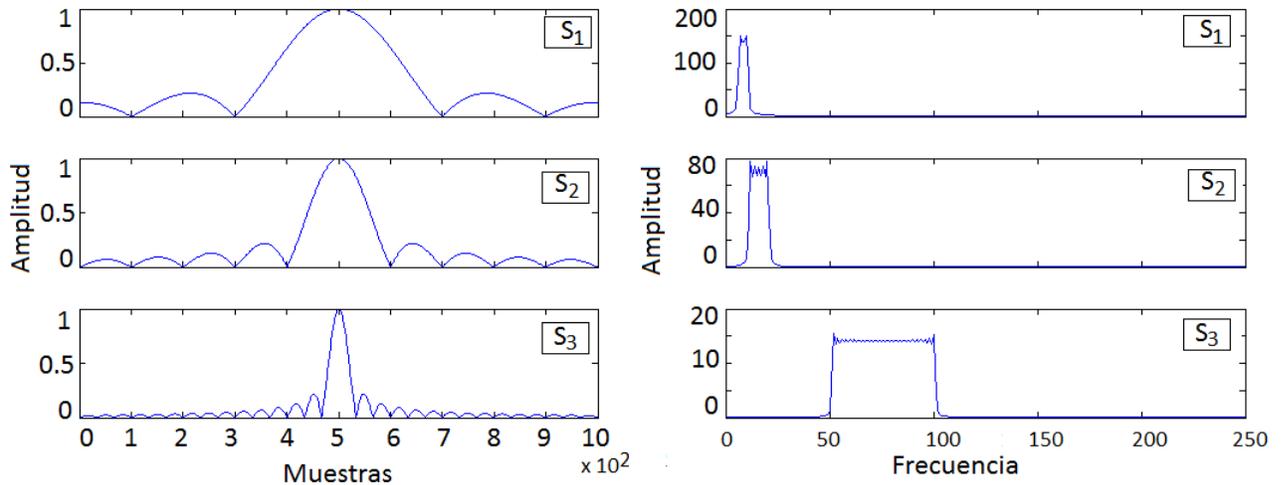


Figura 2.6: Wavelet Armónica (izquierda) y su espectro con  $m = 0.5$  Hz y  $n = 1.5$  Hz (derecha)

## 2.4. Transformada de Hilbert-Huang (THH)

La transformada de Hilbert-Huang proporciona un método de análisis de datos no estacionarios y no lineales en contraste con otras transformadas comunes como la transformada de Fourier. La parte fundamental de la THH es el método de descomposición de modo empírico (EMD, Empirical Mode Decomposition) éste algoritmo es una herramienta que permite descomponer cualquier señal temporal  $s(t)$  en una serie de funciones puramente oscilatorias con modulación suave y fácilmente caracterizables, estas funciones son llamadas Funciones de Modo Intrínseca (IMF, Intrinsic Mode Functions) y pueden tener asociadas sus propias señales analíticas [41].

### 2.4.1. Descomposición en modo empírico (DME)

La THH se basa en una descomposición de la señal analizada en señales mono componentes individuales IMFs, introducidas por Huang et al. [42]. A partir de estos IMFs, por medio de la transformada de Hilbert, se obtiene la frecuencia instantánea de la señal. Esto permite la repre-

sentación de la señal ultrasónica como una distribución de energía o amplitud en el plano tiempo-frecuencia. La característica esencial de la THH es que la descomposición de tiempo-frecuencia es adaptativa y por lo tanto no está limitada por la relación de incertidumbre de tiempo-frecuencia característica de la transformada de Fourier o el análisis wavelet.

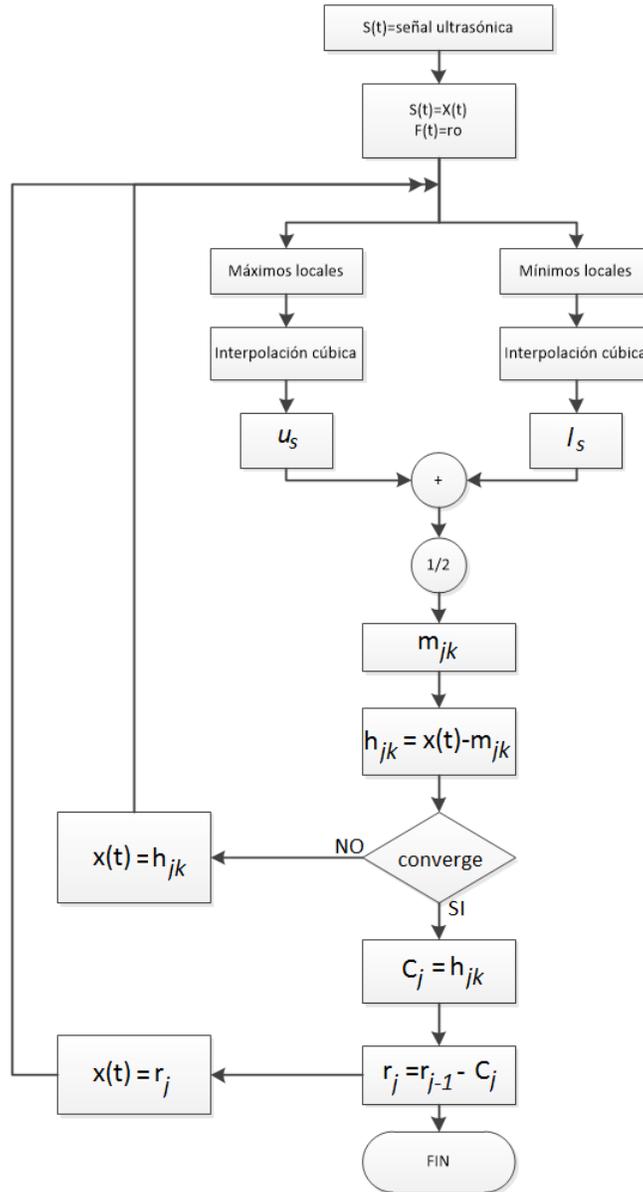


Figura 2.7: Diagrama de flujo del algoritmo EMD

La THH se realiza en dos pasos como se observa en la Figura 2.7. En primer lugar, una señal ultrasónica de banda amplia se descompone en IMFs de banda estrecha. Este proceso se

llama descomposición de modo empírico (EMD). El segundo paso es el cálculo de la frecuencia instantánea y la amplitud de cada modo intrínseco por medio de la transformada de Hilbert y su representación como un espectro en un gráfico en tres dimensiones tiempo-frecuencia-amplitud. El algoritmo de descomposición en primer lugar detecta máximos locales y mínimos de la señal ultrasónica recibida  $s(t)$ . Estos máximos locales  $s_{max}(t)$  y mínimos  $s_{min}(t)$  están conectados por una spline cúbica para obtener, respectivamente, la envolvente superior  $u_s(t)$  y la envolvente inferior  $l_s(t)$  de la señal. Su valor medio se denota como  $m_1(t)$  representado por [43]:

$$m_1(t) = \frac{u_s(t) + l_s(t)}{2}$$

La diferencia entre las señales originales  $s(t)$  y la media  $m_1(t)$  es la primera componente  $h_1(t)$ :

$$h_1(t) = s(t) - m_1(t)$$

El proceso de tamizado tiene que ser repetido  $k$  veces, ya que es requerido para reducir la señal extraída a una FMI:

$$h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t)$$

donde el componente posterior  $h_{1(k-1)}(t)$  es tratado como la señal original.

La function obtenida  $h_{1(k-1)}(t)$  es la primer FMI:

$$c_1(t) = h_{1k}(t)$$

La primera FMI  $c_1(t)$  se resta de la señal original:

$$r_1(t) = s(t) - c_1(t)$$

y esta diferencia se denomina como un residuo  $r_1(t)$ . El residuo es tratado como una nueva

señal y se somete al mismo proceso de tamizado después de lo cual se obtiene la segunda FMI. El criterio para detener la proceso de cambio se determina mediante el uso de un tipo de prueba de convergencia de Cauchy [44]:

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T \left[ \frac{|(h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t))|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right] dt$$

en donde  $T$  es la longitud total de la señal, debe ser lo suficientemente pequeña. Normalmente, si  $\sigma_n^2 < 0.3$ , entonces el proceso de cambio puede ser detenido [45].

El proceso de encontrar modos intrínsecos  $c_j(t)$  continúa hasta que el residuo final  $r_n(t)$  es una constante o una función monótonica.

Este método permite la reconstrucción de la señal original mediante:

$$s(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t)$$

Los componentes de alta frecuencia se encuentran en la primer FMI y el componentes de frecuencia más bajas están en el orden más alto de las FMI. El residuo no se utiliza en el análisis adicional.

Una vez descompuesta la señal en un conjunto de señales de banda estrecha, se requiere determinar la representación tiempo-frecuencia. La construcción temporal se basará en la Transformada Hilbert, para construir la fase de cada uno de los componentes y así determinar la frecuencia instantánea de cada una de las FMI.

La señal analítica se obtiene mediante:

$$z_j(t) = c_j(t) + iy_j(t) = a_j(t)e^{i\theta_j(t)}$$

en donde  $a_j(t) = \sqrt{c_j^2(t) + y_j^2(t)}$  es la magnitud de la envolvente de la FMI en particular;  $\theta_j(t) = \arctan(y_j(t)/c_j(t))$  es la fase de la señal analítica. La función  $y_j(t)$  se obtiene por la transformada de Hilbert:

$$y_j(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_j(t')}{t-t'} dt'$$

en donde  $P$  denota el valor principal de Cauchy. La señal analítica representa cada FMI como una variación lenta de la envolvente de la amplitud  $a_j(t)$ , que modula una fase que varía rápidamente  $\theta_j(t)$  [46]. Es posible encontrar la frecuencia instantánea de la función de fase:

$$\omega_j(t) = \frac{d\theta_j(t)}{dt}$$

Después de encontrar la amplitud instantánea y la frecuencia de la cada FMI, la señal original puede ser presentada como una suma de la señales analíticas en banda estrecha:

$$s(t) = Re \left[ \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{(i \int \omega_j(t) dt)} \right]$$

Esta ecuación nos permite representar la amplitud (o la la energía) y la frecuencia instantánea como una función de tiempo  $t$  en un gráfico tridimensional. Este tipo de presentación se denomina espectro de Hilbert-Huang  $H(\omega_j(t), t)$ . En el espectro de Hilbert podemos ver la distribución de la amplitud de la señal o de la energía de diferentes componentes de frecuencia en el dominio del tiempo. Un pico en el espectro de Hilbert–Huang indica que es muy probable que una onda de esa frecuencia aparezca en ese instante [47].

## 2.5. Análisis de Componentes Principales

El análisis de componentes principales (PCA) es parte de la familia de técnicas para la toma de datos de muchas dimensiones, y el uso de las dependencias entre las variables para que se represente en una forma más manejable de menor dimensión sin perder demasiada información [48, 49]. Los PCA son una de las maneras más sencillas y robustas de hacer tal reducción de dimensionalidad. Es también una de las técnicas más antiguas, y ha sido redescubierta muchas veces en muchos campos, por lo que también se conoce como la transformación de Karhunen-

Loeve, la transformación de Hotelling, el método empírico de funciones ortogonales y decomposición de valor singular.

Hay varias formas equivalentes de derivar los componentes principales matemáticamente. La más simple es mediante la búsqueda de las proyecciones que optimicen la varianza. El primer componente principal es la dirección en el espacio de características a lo largo de que las proyecciones tienen la mayor varianza. El segundo componente principal es la dirección que maximiza la varianza entre todas las direcciones ortogonales a el primero. El componente de orden  $k$  es la dirección de máxima varianza ortogonal al anterior componente  $k - 1$ . Hay  $p$  componentes principales en total. En lugar de la maximización de la varianza puede sonar más plausible para buscar la proyección con la media más pequeña la distancia entre el vector original y sus proyecciones sobre los componentes principales; esto resulta a ser equivalente a la maximización de la varianza.

En todo momento, se supone que los datos se han "centrado", por lo que cada función tiene media 0. Si escribimos los datos centrados en una matriz  $X$ , donde las filas son objetos y las columnas son características se tiene a continuación  $X^T X = nV$ , donde  $V$  es la matriz de covarianza de los datos .

### 2.5.1. Reducción al mínimo de residuos de proyección

Tenemos vectores de características de dimensión  $p$ , y queremos proyectarlos sobre una línea a través del origen. Podemos especificar la línea por un vector unitario a lo largo de ella  $\vec{\omega}$ , y luego la proyección de un vector de datos  $\vec{x}_i$  en la línea es  $\vec{x}_i \cdot \vec{\omega}$ , que es un escalar. Esta es la distancia de la proyección desde el origen; el eje de coordenadas en el espacio  $p$ -dimensional es  $(\vec{x}_i \cdot \vec{\omega}) \vec{\omega}$ . La media de las proyecciones serán cero, porque la media de los vectores  $\vec{x}_i$  es cero:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\vec{x}_i \cdot \vec{\omega}) \vec{\omega} = \left( \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \vec{x}_i \right) \cdot \vec{\omega} \right) \vec{\omega}$$

Si tratamos de utilizar nuestras proyecciones o vectores de imagen en lugar de nuestros vec-

tores originales, habrá algún error, debido a que (en general) las imágenes no coinciden con los vectores originales. La diferencia es el error o el residuo de la proyección. Para cualquier vector, por ejemplo  $\vec{x}_i$  es

$$\begin{aligned} \|\vec{x}_i - (\vec{\omega} \cdot \vec{x}_i) \vec{\omega}\|^2 &= \|\vec{x}_i\|^2 - 2(\vec{\omega} \cdot \vec{x}_i)(\vec{\omega} \cdot \vec{x}_i) + \|\vec{\omega}\|^2 \\ &= \|\vec{x}_i\|^2 - 2(\vec{\omega} \cdot \vec{x}_i)^2 + 1 \end{aligned}$$

Al sumar los residuos de todos los vectores:

$$\begin{aligned} RSS(\vec{\omega}) &= \sum_{i=1}^n \|\vec{x}_i\|^2 - 2(\vec{\omega} \cdot \vec{x}_i)^2 + 1 \\ &= \left( n + \sum_{i=1}^n \|\vec{x}_i\|^2 \right) - 2 \sum_{i=1}^n (\vec{\omega} \cdot \vec{x}_i)^2 \end{aligned}$$

El término en el paréntesis no depende de  $\vec{\omega}$ , por lo que no importa cuando se trata de minimizar la suma de los cuadrados de los residuos. Para hacer  $RSS$  pequeña lo que se debe hacer es hacer el término que se está restando grande, es decir, queremos maximizarlo.

$$\sum_{i=1}^n (\vec{\omega} \cdot \vec{x}_i)^2$$

De manera equivalente, ya que  $n$  no depende de  $\vec{\omega}$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\vec{\omega} \cdot \vec{x}_i)^2$$

lo que podemos ver es la media muestral de  $(\vec{\omega} \cdot \vec{x}_i)^2$ . La media de un cuadrado es siempre igual al cuadrado de la media más la varianza:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\vec{\omega} \cdot \vec{x}_i)^2 = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \vec{x}_i \cdot \vec{\omega} \right)^2 + Var[\vec{\omega} \cdot \vec{x}_i]$$

Dado que la media de las proyecciones es cero, lo que minimiza la suma residual de cuadrados resulta ser equivalente a la maximización de la varianza de las proyecciones.

Por supuesto, en general, no queremos proyectar a un solo vector, más bien se quiere a múltiples componentes principales. Si estos componentes son ortogonales y tienen los vectores unitarios  $\vec{w}_1, \vec{w}_2, \dots, \vec{w}_k, \dots$ , entonces la imagen de  $x_i$  es su proyección en el espacio generado por estos vectores,

$$\sum (\vec{x}_i \cdot \vec{w}_j) \vec{w}_j$$

La media de la proyección sobre cada componente es todavía cero. Si repasamos la misma álgebra de la suma de los cuadrados de los residuos, resulta que los términos cruzados entre componentes se cancela, y quedamos tratando de maximizar la suma de las varianzas de las proyecciones en los componentes.

### 2.5.2. Maximización de varianza

Si juntamos los  $n$  vectores de datos en una matriz  $X$  de  $n \times p$ , entonces las proyecciones están denotadas por  $Xw$ , que es una matriz de  $n \times 1$ . La varianza es

$$\begin{aligned} \sigma_{\vec{w}}^2 &= \frac{1}{n} \sum_i (\vec{x}_i \cdot \vec{w})^2 \\ &= \frac{1}{n} (Xw)^T (Xw) \\ &= \frac{1}{n} w^T X^T X w \\ &= w^T \frac{X^T X}{n} w \\ &= w^T V w \end{aligned}$$

Queremos elegir un vector unitario  $\vec{w}$  para maximizar  $\sigma_{\vec{w}}^2$ . Para ello, necesitamos asegurarnos de que todos son vectores unitarios –necesitamos limitar la maximización. La restricción es que

$$\vec{\omega} \cdot \vec{\omega} = 1, \text{ o } w^T \omega = 1.$$

Partimos de una función  $f(\omega)$  que queremos maximizar. (Aquí, la función es  $w^T V w$ ). También tenemos una restricción de igualdad,  $g(\omega) = c$ . (Aquí,  $g(\omega) = w^T w$  y  $c = 1$ ). Se reordena la ecuación de restricción por lo que el lado derecho es cero,  $g(\omega) - c = 0$ . Ahora añadimos una variable adicional para el problema, el *multiplicador de Lagrange*  $\lambda$ , y se considera  $\mathcal{L}(\omega, \lambda) = f(\omega) - \lambda(g(\omega) - c)$ , esta es la nueva función objetivo, así que derivamos con respecto a los dos argumentos y establecemos las derivadas iguales a cero:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \omega} = 0 = \frac{\partial f}{\partial \omega} - \lambda \frac{\partial g}{\partial \omega}$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} = 0 = -g(\omega) + c$$

La maximización con respecto a  $\lambda$  nos devuelve nuestra ecuación de restricción,  $g(\omega) = c$ . Sin embargo, hemos modificado la ecuación que usamos para encontrar el valor óptimo  $\omega$ , ya que ahora incluye el término  $\lambda \frac{\partial g}{\partial \omega}$ . Si  $\lambda$  fuera cero, estaríamos de nuevo con el problema de optimización sin restricciones; cuanto más grande es  $\lambda$  la restricción y las fuerzas modifican el valor óptimo  $\omega$ . Al mismo tiempo, cuando tenemos la restricción satisfecha, el valor de nuestra nueva función objetivo  $\mathcal{L}$  es el mismo que el valor anterior de la función  $f$ . (Si tuviéramos más de una restricción, tan sólo se necesitan más multiplicadores de Lagrange.).

Para nuestro problema de proyección,

$$\begin{aligned} u &= w^T V w - \lambda (w^T w - 1) \\ \frac{\partial v}{\partial w} &= 2Vw - 2\lambda w = 0 \\ Vw &= \lambda w \end{aligned}$$

Por lo tanto, el vector  $w$  deseado es un vector propio de la matriz de covarianza  $V$ , y el vector

maximizado será el asociada con el valor propio más grande  $\lambda$ . Esta es una buena noticia, porque la búsqueda de vectores propios es algo que se puede hacer relativamente rápido, y porque los vectores propios tienen muchas propiedades matemáticas interesantes que podemos utilizar de la siguiente manera.

Sabemos que  $V$  es una matriz de  $p \times p$ , por lo que tendremos  $p$  diferentes vectores propios. Sabemos que  $V$  es una matriz de covarianza por lo que es simétrica, y el álgebra lineal nos dice que los vectores propios deben ser ortogonales entre sí. De nuevo porque  $V$  es una matriz de covarianza, es una matriz positiva, en el sentido de que  $\vec{x} \cdot V\vec{x} \geq 0$  para cualquier  $\vec{x}$ . Esto nos dice que los valores propios de  $V$  deben ser todos  $\geq 0$ .

Los vectores propios de  $V$  son los componentes principales de los datos. Sabemos que todos son ortogonales entre sí por el párrafo anterior, por lo que en conjunto abarcan todo el espacio de características  $p$ -dimensional. El primer componente principal, es decir, el vector propio que tenga el valor más grande de ..., es la dirección a lo largo de la cual los datos tienen la varianza mayor. El segundo componente principal, es decir, el segundo vector propio, es la dirección ortogonal al primer componente con la mayor varianza. Debido a que es ortogonal al primer vector propio, sus proyecciones serán sin correlación. De hecho, las proyecciones sobre todos los componentes principales no están correlacionados entre sí. Si utilizamos  $q$  componentes principales, nuestra matriz de pesos  $w$  será una matriz de  $p \times q$ , donde cada columna será un vector propio diferente de la matriz de covarianza  $V$ . Los valores propios darán la varianza total descrita por cada componente. La varianza de las proyecciones de los primeros  $q$  componentes principales es entonces  $\sum_{i=1}^q \lambda_i$ .

## Capítulo 3

# Diseño experimental para la adquisición de señales

*En el presente capítulo se muestra la configuración de los dispositivos usados para la toma de señales, así como la fabricación de las probetas y sus respectivas fracturas.*

---

El sistema diseñado para la captura y procesado de las señales ultrasónicas está constituido por diferentes dispositivos, mismos que se detallan a continuación. La configuración del diseño se muestra en la Figura (3.1).

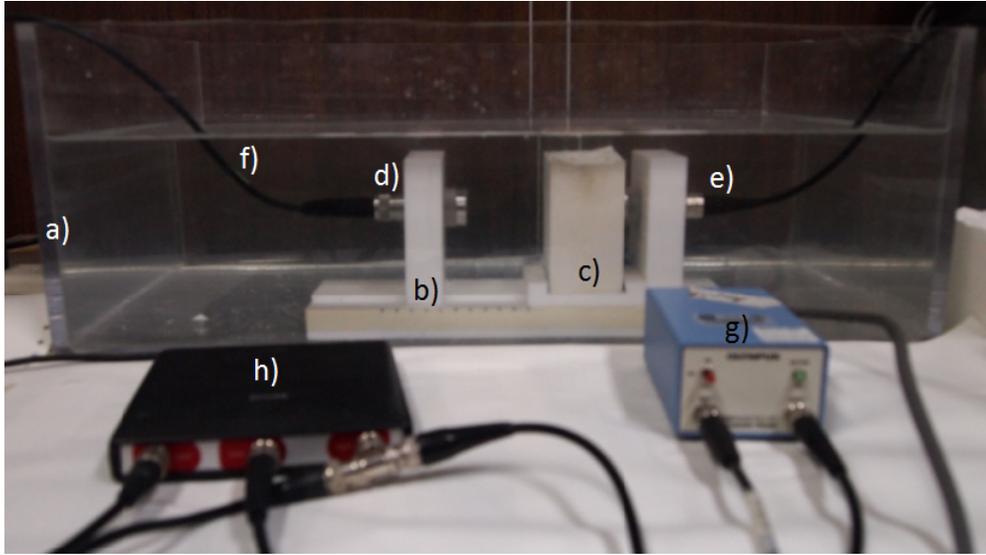


Figura 3.1: Montaje experimental de los dispositivos usados para la adquisición de señales: a) tanque de acrílico, b) base para los transductores y probetas, c) probeta, d) transductor emisor, e) transductor receptor, f) cables BNC-UHF, g) amplificador y h) Handy Scope HS3®

### 3.1. Handy Scope HS3

El Handyscope modelo HS3 [50] es un instrumento de dos canales, que consta de multímetro, osciloscopio, analizador de espectro y generador de onda. El generador de onda tiene precargados los pulsos de excitación comunes, y permite programar pulsos por el usuario mediante el software propietario Multi Channel measurement software®. El instrumento permite seleccionar la resolución que puede ser de 12 bits, 14 bits o 16 bits. La frecuencia de muestreo que alcanza es de hasta 50 MHz por cada canal. Se comunica con la computadora vía USB 2.0, mediante su software propio que permite la visualización en pantalla, con tres diferentes opciones: osciloscopio, analizador de espectro, y voltímetro como se muestra en la Figura 3.2. El software permite guardar los ajustes programados o modificados de cada función de visualización en memoria.

Una de las ventajas del equipo es que permite modificar su programación con la ayuda de software externo como Matlab®.

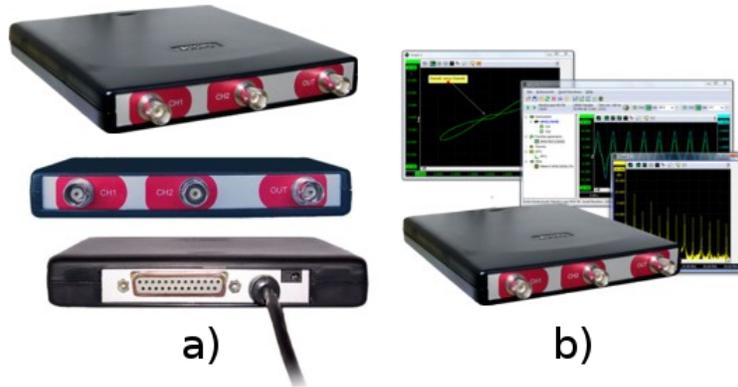


Figura 3.2: Handy Scope HS3® (a) y despliegue grafico de las funciones (b)

### 3.2. Amplificador

Los sistemas estándares de inspección requieren que se amplifique la señal por medio de un preamplificador que proporcione una ganancia suplementaria o que mejore la relación señal-ruido de banda ancha para lograr una adquisición óptima de la señal, situación que se presenta en este análisis experimental ya que los materiales cementicios son altamente atenuantes de la señal de ultrasonido. El preamplificador empleado es de la marca Panametrics® modelo 5676 [51], cuenta con una protección en la entrada contra corrientes transitorias de alto voltaje, como los impulsos de excitación del transductor y la capacidad para utilizar cables coaxiales largos, con una ganancia fija de 40 dB. El ancho de banda característico del amplificador es de 50 kHz a 20 MHz (ver Figura 3.3)



Figura 3.3: Amplificador Panametrics® 5676 compatible con el Handy Scope HS3®

### 3.3. Transductores ultrasónicos

Los transductores usados para generar y adquirir señales son transductores longitudinales de inmersión Panametrics V318-SU, con 0.5 MHz de frecuencia de operación. Las características importantes del funcionamiento y operación de los transductores están bajo la norma ASTM E1065-08 [52]. Esta norma determina los procedimientos estandarizados para la evaluación de transductores ultrasónicos.

Describe los medios para obtener datos de desempeño que serán usados para definir la respuesta eléctrica y acústica de los transductores, y así, asegurar la calidad del rendimiento en el funcionamiento de los mismos, de acuerdo a criterios propios del usuario. Las medidas descritas se realizan principalmente mediante la técnica de pulso-eco. Algunos de los resultados obtenidos utilizando los procedimientos descritos pueden diferir de las mediciones realizadas con los instrumentos en las pruebas. Estas diferencias pueden atribuirse a las diferencias y características eléctricas de la instrumentación. En el caso del transductor que funciona como receptor se analizará la respuesta en frecuencia además de la forma como la duración de la señal producida.

La caracterización de los transductores permite diseñar pulsos para obtener la respuesta del transductor lo menos atenuada posible y que el ancho de banda sea estrecho para contrarrestar efectos de dispersión por la microestructura de materiales heterogéneos altamente dispersivos.

#### 3.3.1. Tiempo de respuesta

Los términos y parámetros seleccionados en la descripción cuantitativa de la forma de onda, por ejemplo, duración de la onda, resolución, y amortiguamiento, debe ser definido por el usuario. El tiempo de respuesta se puede medir mediante un nivel ya sea de 20 dB (Figura 3.4a) o de 40 dB (Figura 3.4b) por debajo del máximo de la señal<sup>1</sup>. La medida que el tiempo de respuesta puede ser influenciada por la electrónica de entrada, es decir, impedancias de entrada e impedancia del receptor; además, teniendo cuidado de asegurar que la entrada sea adecuada para registrar

---

<sup>1</sup>Se toman estas cantidades por las limitaciones inherentes en el despliegue de un digitalizador de 8-bits (Ver Apéndice A)

con precisión la señal.

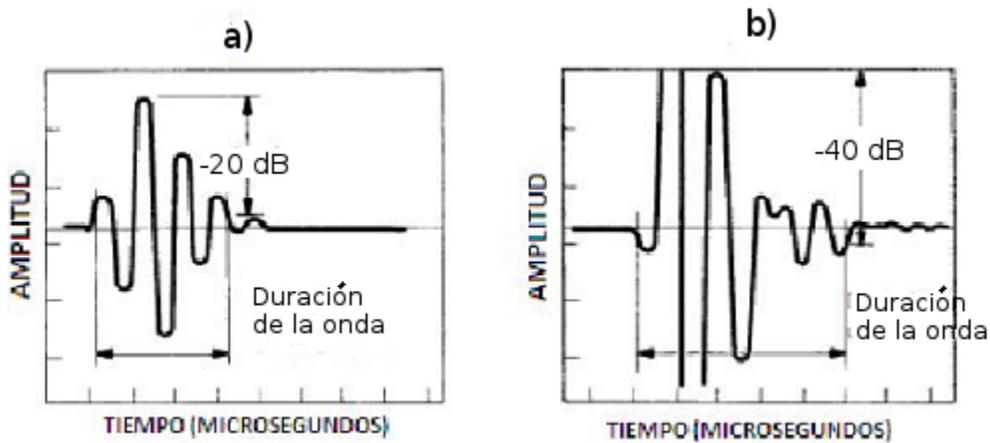


Figura 3.4: En a) se muestra la duración de la onda considerando -20 dB y en b) considerando -40 dB

### 3.3.2. Respuesta en frecuencia

La reproductibilidad de las pruebas se ve afectada por diversos factores tales como la impedancia del generador, la impedancia del transductor, la forma del pulso de excitación, y los sistemas de medición que se utilizarán. El sistema de medición utilizado para la evaluación del transductor debe ser establecido por el usuario. En general, la duración del pulso se puede ajustar para proporcionar una máxima transferencia de energía. Como la duración del pulso y la impedancia de salida del generador puede influir en el espectro real entregado al transductor, se debe tener cuidado para asegurar que el espectro de energía aplicado es suficiente para describir con precisión la respuesta de frecuencia del transductor. Los parámetros de funcionamiento del generador de señal deben establecerse por el usuario. Un número suficiente de ciclos se deben muestrear para reproducir adecuadamente el espectro de la señal recibida, adicionalmente se debe realizar un promedio para aumentar la fiabilidad de las mediciones, el generador utilizado para obtener la respuesta en frecuencia y tiempo de respuesta del transductor debe tener un ancho de banda con suficiente contenido espectral para excitar al transductor en su ancho de banda completo, de lo contrario se pueden presentar distorsiones en el tiempo y pueden dar lugar a

resultados erróneos.

### 3.3.3. Ancho de banda

Para obtener el ancho de banda del transductor los valores de frecuencia inferior ( $f_l$ ) y superior ( $f_u$ ) del ancho de banda se definen como los valores en que la amplitud de la respuesta en frecuencia de la señal recibida ha caído 6 dB<sup>2</sup> por debajo del máximo de la curva de respuesta en frecuencia, es decir, frecuencia pico ( $f_p$ ).

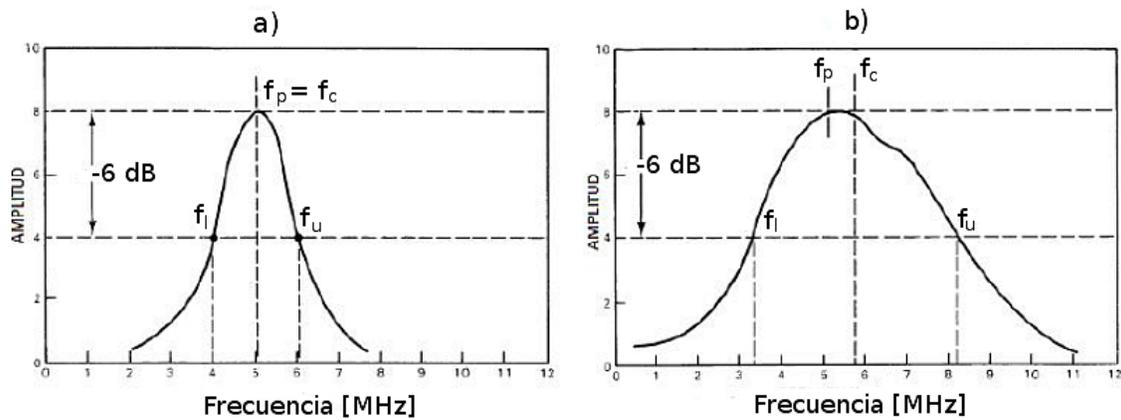


Figura 3.5: Ancho de banda teórico (a) y ancho de banda reportado por el fabricante (b)

El valor  $f_p$  debe ser elegido como la referencia a pesar de que éste por lo general no coincida con el de la frecuencia central ( $f_c$ ) ya que es el punto donde se encuentra realmente el valor máximo de amplitud (Figura 3.5). Las mediciones del ancho de banda se determinan mediante la localización de la frecuencia pico y luego encontrando los valores  $f_l$  y  $f_u$ , por medio de las ecuaciones:

$$f_c = \frac{f_l + f_u}{2} \quad (3.1)$$

$$AB = \frac{(f_u - f_l)}{f_c} (100) \quad (3.2)$$

<sup>2</sup>Un cambio en la relación de las amplitudes por un factor de dos es aproximadamente un cambio de 6 dB

### 3.4. Base para fijar los transductores

Para la correcta colocación de los transductores se diseñó en Solidworks®<sup>3</sup> una base que permita variar la separación de los transductores de manera precisa mediante un riel, garantizando que los ejes axiales de los transductores coincidan a lo largo de toda la base. La base cuenta con un soporte para la colocación de la probeta, como se muestra en la Figura 3.6.

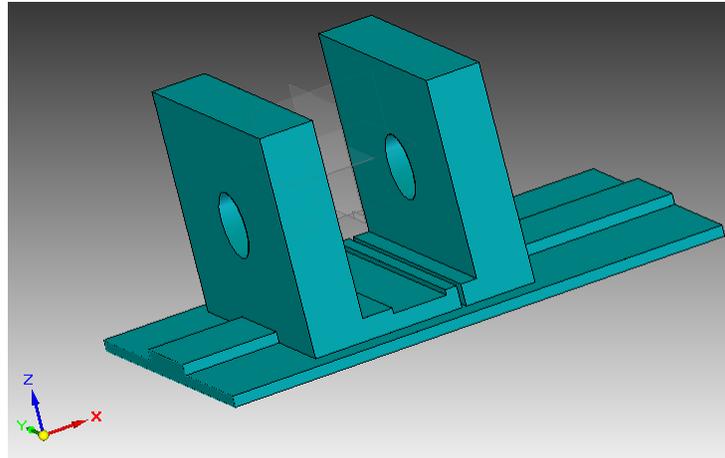


Figura 3.6: Base para transductores diseñada con Solidworks®, la probeta se puede colocar entre los dos soportes de los transductores, los cuales tienen su caras frontales en planos paralelos.

El material que se eligió para la manufactura de la base fue el PTFE (Politetrafluoroetileno) conocido como Teflón, éste representa alrededor del 85 % de la familia de polímeros llamados fluoropolímeros. El PTFE posee alta resistencia al ataque químico y ambiental, además de poseer buenas propiedades eléctricas como aislante, buena resistencia al calor y un coeficiente de fricción muy bajo. Otra característica importante es que no es afectado por el agua, por lo que no se deforma cuando está inmerso. Esta propiedad es primordial debido a que las pruebas fueron hechas en inmersión. El material es de fácil maquinado y se pueden emplear procedimientos habituales para producir formas deseadas con tolerancias normales (Ver Figura 3.7).

<sup>3</sup>SolidWorks es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una subsidiaria de Dassault Systèmes

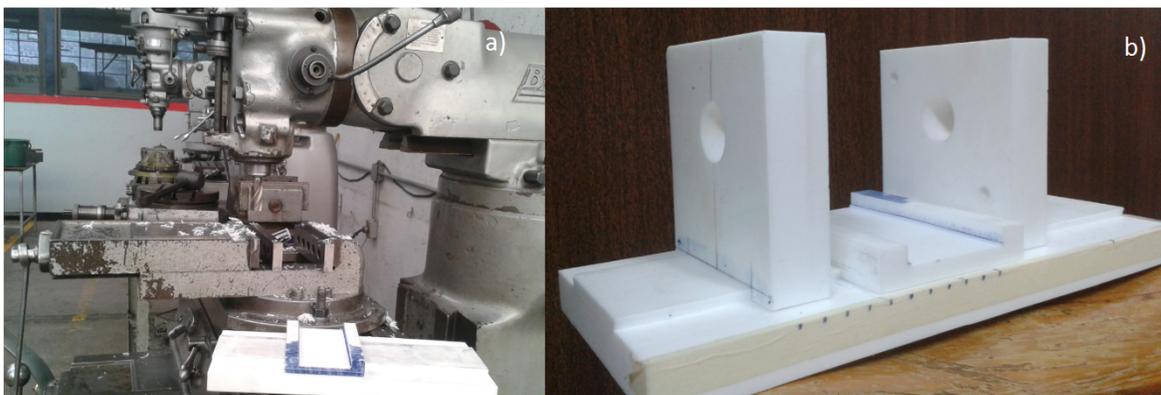


Figura 3.7: En (a) el equipo empleado para la fabricación de la base, en (b) la base terminada.

Las propiedades generales de este fluoropolímero se enlistan a continuación:

Polímero representativo	Politetrafluoroetileno
Símbolo	PTFE
Método de polimerización	Adición
Modulo elástico	425MPa
Resistencia a la tensión	20 MPa
Elongación	100 a 300 %
Temperatura de fusión	327°C
Velocidad ultrasónica longitudinal (acústica)	1372 m/s
Impedancia acústica	3

Tabla 3.1: Propiedades del Politetrafluoroetileno

### 3.5. Elaboración de probetas

Las mediciones dependen tanto del control de las probetas como de la calibración del instrumentos de medición, de acuerdo con esto, existen normas internacionales que establecen estándares para la realización de pruebas experimentales. La norma de American Society for Testing and Materials (ASTM) C 305-99 [53] se refiere la metodología para la elaboración de la mezcla de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica, así como los instrumentos usados para este fin. De acuerdo a esta norma el mezclador mecánico debe ser accionado eléctricamente y

debe presentar un movimiento de tipo epicicloidal (incluye tanto movimiento planetario como el movimiento rotación de la paleta). El mezclador debe de tener además, un mínimo de dos velocidades, la primera de velocidad de  $140 \pm 5$  rpm o velocidad de paleta lenta, con un movimiento planetario de aproximadamente 62 rpm. La segunda velocidad debe de mover la paleta a una velocidad de  $285 \pm 10$  rpm, con un movimiento planetario de aproximadamente 125 rpm. El motor debe de contar con una potencia de al menos 124W (1/6hp).



Figura 3.8: Batidora de acuerdo con la Norma (ASTM) C 305-99)

La paleta debe ser fácilmente removible y fabricada de acero inoxidable, así como tener un diseño simple. Las dimensiones de ésta son de tal forma que cuando se ponga en movimiento perfile la forma del contenedor, con un espaciamiento entre 0.8 mm a 4 mm. El contenedor debe tener una capacidad aproximada de 4.73 L y fabricada de acero inoxidable (Figura 3.8). La temperatura de la habitación deberá ser de 20 °C a 27.5 °C.

### 3.5.1. Procedimiento

Introducir al contenedor la cantidad completa de agua a una temperatura máxima de 23 °C para la mezcla. Agregar el cemento, permitiendo una absorción por 30 segundos. Mezclar a velocidad baja de  $140 \pm 5$  rpm por 30 segundos. Detener el mezclado por 15 segundos y remover

con una espátula las paredes del contenedor. Mezclar a velocidad media  $285 \pm 10$  rpm por un minuto. Vaciar en el molde con la forma que se requiera (Figura 3.9).

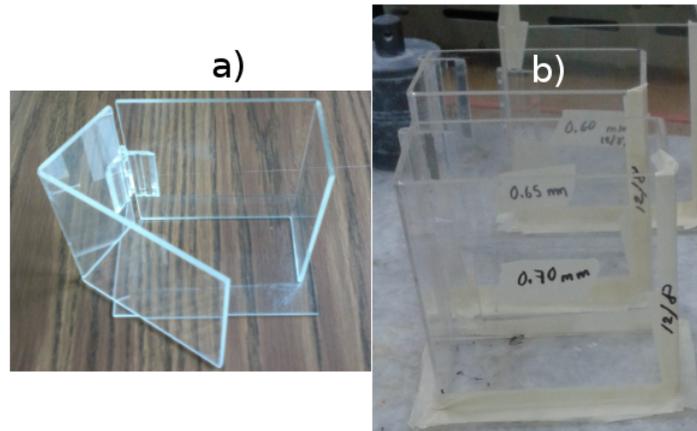


Figura 3.9: Moldes utilizados para la fabricación de las probetas

En la Figura (3.10) se muestran los elementos descritos en el procedimiento, para la realización de las probetas se utilizó Cemento Portland Blanco CPC 30R B [54] a una relación A/C de 0.5. Los moldes están hechos de acrílico con un diseño que facilitó el desmolde de las probetas. La forma tetraédrica con medidas de 10 x 10 x 5 cm fue seleccionada por las caras paralelas y para disminuir las reflexiones de los bordes.



Figura 3.10: Elaboración de la pasta de cemento

Se elaboraron 24 probetas como se puede ver en la Figura (3.11), dos de ellas son los especímenes de control, las restantes se les introdujo, durante el fraguado, calibradores de bujías

con diferentes espesores (entre 0.23 y 0.88 mm) con el fin de tener fracturas controladas (Figura 3.12).



Figura 3.11: Probetas de pastas de cemento



Figura 3.12: Calibradores para el ancho de las fracturas

### 3.6. Despliegue gráfico

Para facilitar la adquisición de señales se implementó una interfaz con GUI de Matlab® (Graphical Users Interfaces). Con esta interfaz es posible capturar señales para determinar la

existencia de fracturas.

En la Figura 3.13a se observa que es posible capturar la señal de control y la señal a analizar de manera independiente, al capturar una señal la interfaz permite configurar la adquisición así como el pulso de excitación añadiendo características específicas del pulso de emisión como es:

- Número de muestras, aquí se ingresa el tamaño del vector que se adquirirá proveniente del transductor para posteriormente guardar la señal teniendo como máximo 128000 muestras[50].
- Frecuencia de muestreo, se coloca la frecuencia utilizada para digitalizar la señal teniendo como un máximo 50 Mhz de acuerdo con la limitante del HandyScope HS3@[50] considerando que el usuario debe de tomar en cuenta el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon.
- La amplitud de la señal, se introducen los valores en volts tomando en cuenta que los materiales son muy dispersivos, por tanto es deseable usar la amplitud máxima que da el generador[50].
- Promediado, aquí se tomara el número de señales que se quieren tomar para posteriormente efectuar un promediado temporal una vez recibida la señal del transductor receptor para eliminar ruido como parte de la adquisición de la señal.
- Frecuencia del transductor, dado que los transductores deben ser excitados en su frecuencia natural se especifica la frecuencia del pulso de excitación, este valor debe ser dado en Hz.

También es posible trabajar con señales previamente guardadas, en este caso permite seleccionar una señal ya sea del bloque control o de un bloque con fractura de un banco de señales generado anteriormente como se ve en la Figura 3.13b.

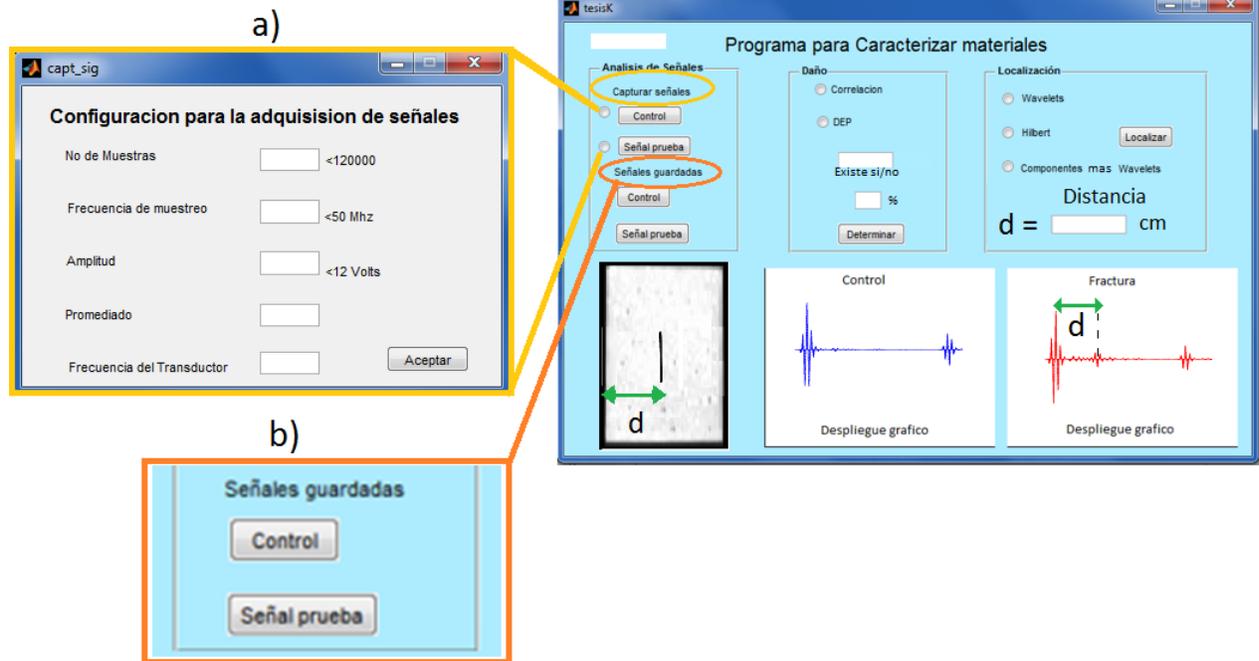


Figura 3.13: La GUI programada en MATLAB® donde se pueden observar los diferentes parámetros de adquisición

En la Figura se muestra el diagrama de flujo de la interfaz gráfica, aplicando en ella la captura y el procesamiento de señales ultrasónicas.

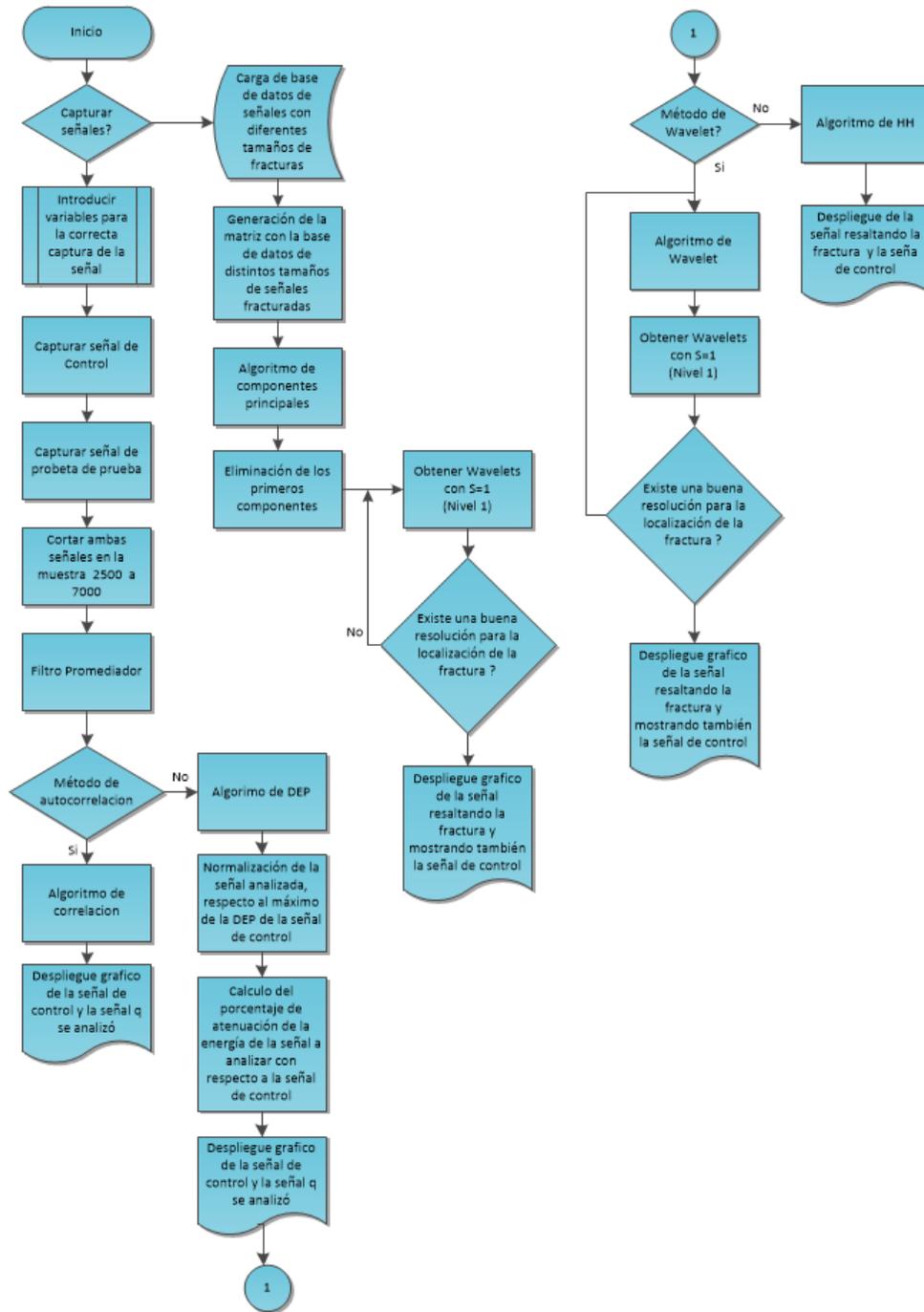


Figura 3.14: Diagrama de flujo del la interfaz gráfica

# Capítulo 4

## Resultados

*En este capítulo se describen la implementación experimental y los resultados para la detección y localización de micro-fracturas en pasta de cemento.*

---

### 4.1. Caracterización del transductor

De acuerdo con la norma ASTM E1065-08 descrita en el capítulo 4, la cual refiere a procedimientos estandarizados para la evaluación de transductores ultrasónicos se realizó la caracterización de los transductores Panametrics V318-SU con frecuencia de operación de 0.5 MHz utilizados para la adquisición de las señales ultrasónicas.

#### 4.1.1. Ancho de banda

El ancho de banda del transductor con frecuencia de operación de 500KHz, se determinó mediante la respuesta del transductor a un pulso chirp lineal 1 (ver Figura 4.1a), determinando que la energía a los -6 dB por debajo de la amplitud máxima se encuentra entre los 280 a 810 KHz y la máxima en 500 KHz (ver Figura 4.2).

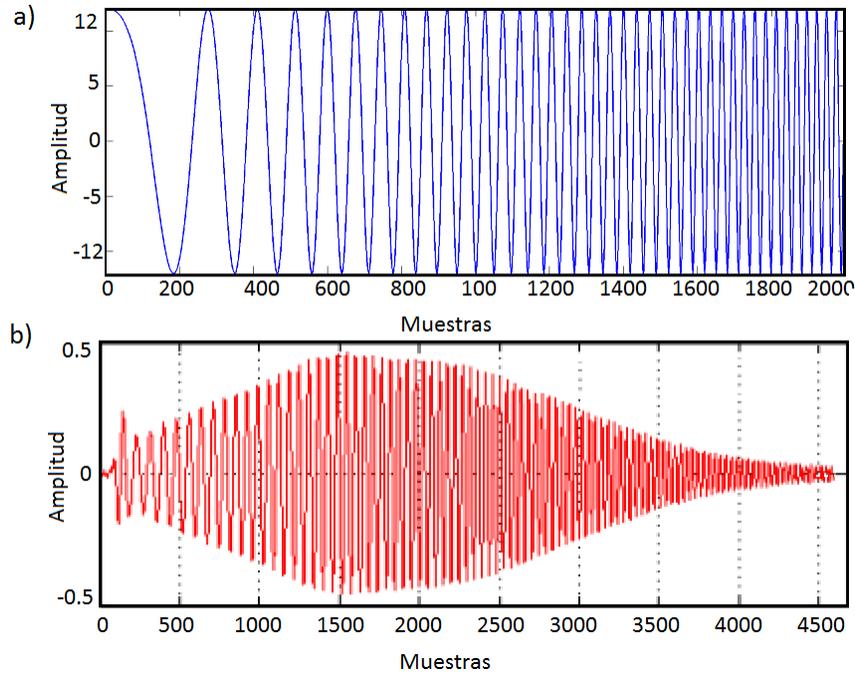


Figura 4.1: Señal chirp de 100 KHz a 1000 KHz (a) y respuesta en tiempo del transductor a la señal de excitación Chirp (b)

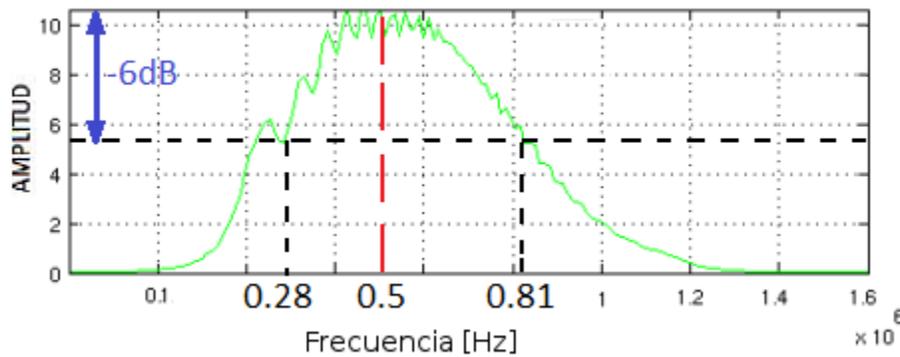


Figura 4.2: Respuesta en frecuencia del transductor a la señal Chirp, se observa la máxima amplitud alrededor de 500 KHz (línea punteada)

#### 4.1.2. Respuesta del transductor a distintos pulsos de excitación

Los pulsos de excitación analizados son: i) cuadrado negativo, ii) cuadrado positivo y iii) sinc. El primero es el más común, dentro de las normas de construcción, para el caso de estos transductores y el último da la oportunidad de explotar el ancho de banda del transductor. La

respuesta al impulso de cada uno de ellos y su espectro se muestran en la Figura 4.3 y en la Tabla 4.1 están los datos y ancho de banda de cada uno de ellos. Se generaron estos pulsos a la frecuencia propia del transductor (500 KHz); tales pulsos se exportaron de Matlab a un generador de funciones y fueron capturadas mediante un osciloscopio (Handyscope HS3®) a una frecuencia de muestreo de 50 MHz; la disposición de los transductores fue uniaxial a una distancia de 10 cm en agua para asegurar que se encontraran en el campo lejano y que no hubiera dispersión. Se observa en la Figura 4.3) la respuesta al pulso de excitación cuadrado negativo, cuadrado positivo y sinc, se observa que el número de oscilaciones de la señal sinc es mayor al que se presenta con los pulso negativo y positivo, esto es importante ya que al pasar la onda por un medio dispersivo esta tendera a cambiar su forma haciéndose más ancha, por lo que es importante tener un pulso con un tiempo de respuesta corto, en el caso del espectro de frecuencias se observa que el pulso cuadrado negativo es el que presenta un ancho de banda más estrecho como se observa en la siguiente tabla.

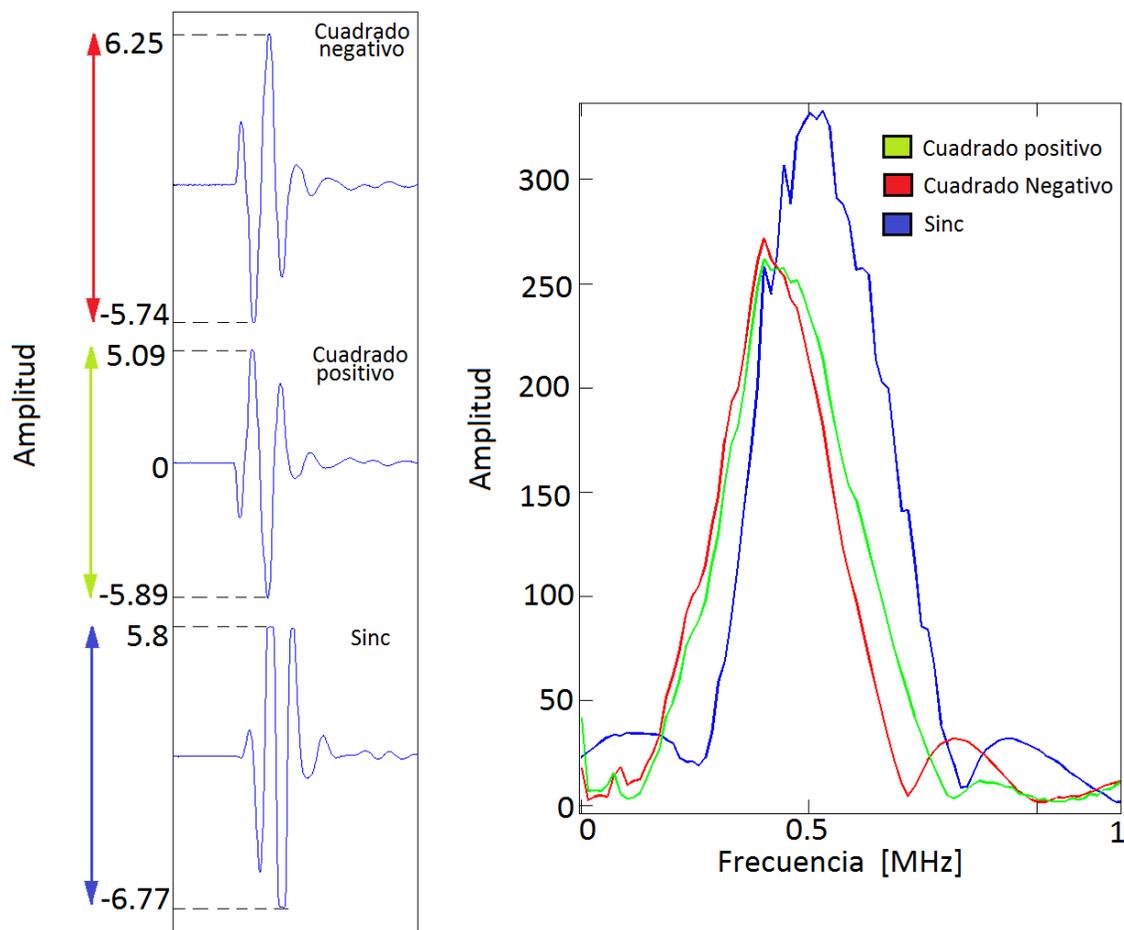


Figura 4.3: Respuesta de los transductores a los pulsos de excitación cuadrado negativo, cuadrado positivo y sinc (izquierda) y espectros de cada uno de ellos (derecha).

Tipo de pulso	$f_p$ [Hz]	$f_l$ [Hz]	$f_u$ [Hz]
Cuadrado positivo	$4.075 \times 10^5$	$3.2 \times 10^5$	$5.15 \times 10^5$
Cuadrado negativo	$4.025 \times 10^5$	$3.27 \times 10^5$	$5.1 \times 10^5$
Sinc	$5.001 \times 10^5$	$3.9 \times 10^5$	$6.401 \times 10^5$

Tabla 4.1: Valores que definen el ancho de banda del transductor de 500 KHz para los distintos pulsos de excitación

## 4.2. Propagación de pulsos en campo lejano

En el proceso de adquisición de las señales provenientes de medios heterogéneos es importante asegurar que el frente de ondas que se propaga en el material de prueba tenga el comportamiento de campo lejano (ver sección 1.2.2), se puede calcular la distancia en la que el campo lejano inicia. Para el cálculo del campo se requiere conocer el diámetro del transductor, y la longitud de onda. El diámetro es de 2.5 cm (1") y la longitud de onda está relacionada con la frecuencia de operación del transductor y la velocidad de propagación de la onda acústica. La frecuencia de operación se midió en la sección 4.1.1 siendo su frecuencia central de operación de 402.5 KHz cuando hay excitación con pulso cuadrado y la velocidad de propagación se calculó mediante la ecuación  $v = \frac{d}{n} f_s$  donde  $d$  es el grosor de la muestra,  $n$  el número de muestras entre dos grupos de ecos, que representan el tiempo viajado por onda dentro de la probeta de control y  $f_s$  es la frecuencia de muestreo. Considerando que las probetas son de 5 cm de grosor y la frecuencia de muestreo es de 50 MSamples, la velocidad efectiva, en la ausencia de fracturas, es de 2730 m/s, por lo que el campo lejano del transductor inicia a 2.78 cm.

Este valor teórico-experimental, únicamente considera la velocidad efectiva del medio, mas no como varía con respecto a la presencia de fracturas, es por ello que se implementó un arreglo experimental, donde se varió la distancia emisor-receptor y una probeta de pasta de cemento inmersa en agua, como se puede ver en la Figura 4.4.

Las señales adquiridas para distintas distancias emisor-probeta permitieron determinar el campo lejano, el cual es aproximadamente a 3 cm, donde se distinguen ecos que posiblemente indiquen la presencia de la fractura de 0.88 mm de diámetro, como se puede ver en la Figura 4.5.

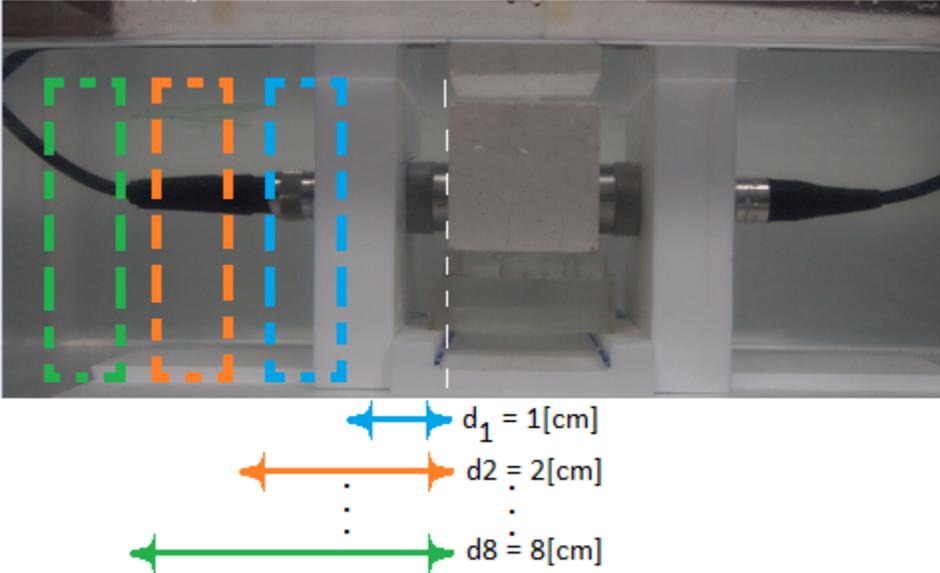


Figura 4.4: Arreglo experimental para determinar el campo lejano.

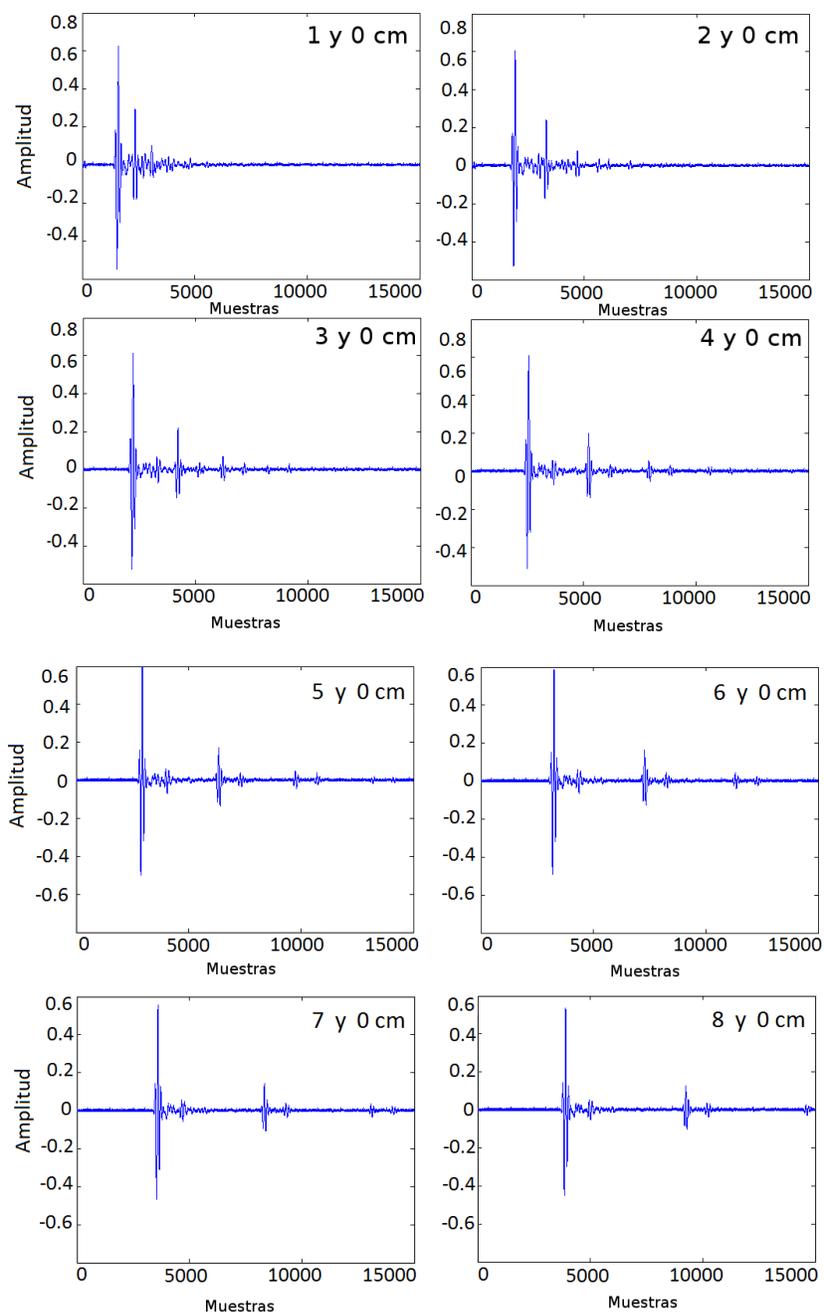


Figura 4.5: Señales adquiridas variando la distancia emisor-probeta de pasta de cemento fracturada (0.88 mm), desde 1 cm hasta 8 cm.

### 4.3. Detección de microfisuras

Una vez determinado el arreglo experimental óptimo; el pulso de emisión cuadrado negativo y el emisor a 3 cm de la probeta en prueba con el receptor en contacto con la cara de la pasta de cemento, se adquirieron las señales ultrasónicas para diversas probetas manufacturadas bajo la norma [53]. El total de probetas es de 24, de las cuales dos son usadas como control.

#### 4.3.1. Acondicionamiento de la señal

Adquisición de señales para cada uno de los arreglos experimentales: i) para garantizar repetibilidad del fenómeno se adquieren 500 señales, las cuales se promedian geoméricamente, ii) se elige el intervalo de tiempo en la señal promediada donde se encuentra la información que se requiere analizar (Figura 4.6) y iii) se aplica un filtro de media móvil para disminuir el ruido aleatorio (Figura 4.7).

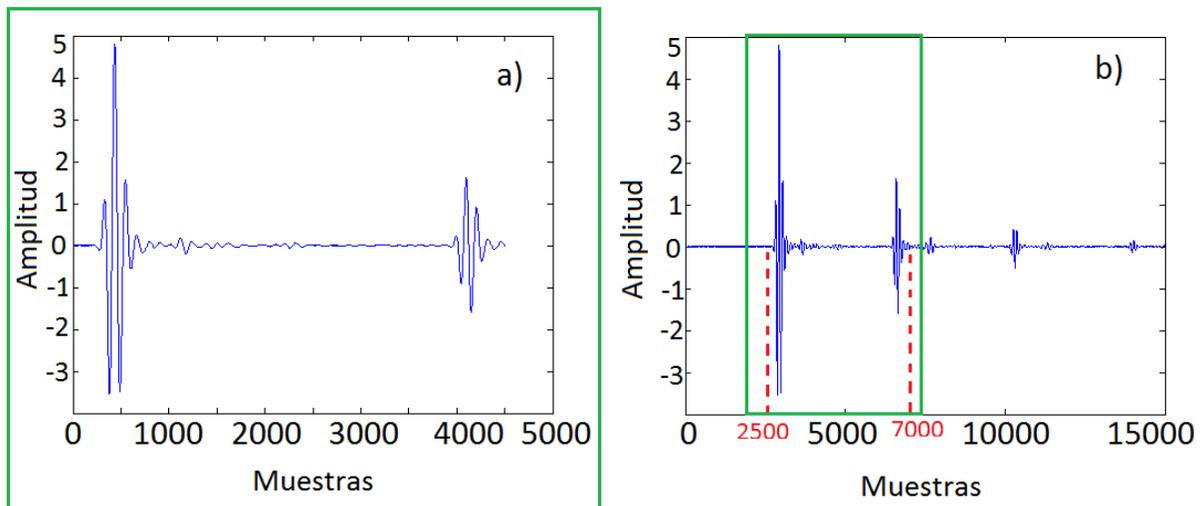


Figura 4.6: En a) la señal adquirida completa, en b) se observa la señal recortada, en este caso se seleccionó solo la señal entre los primeros ecos.

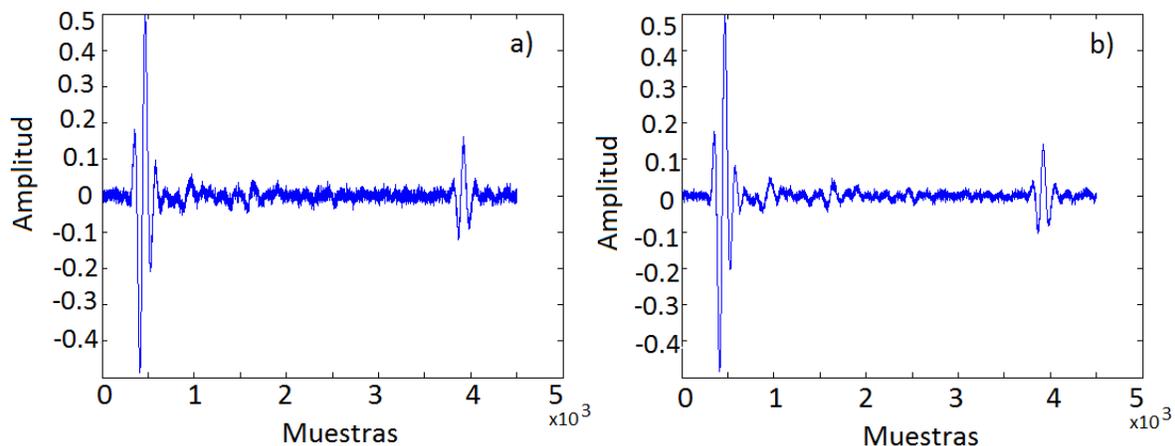


Figura 4.7: Señal cruda (a) y señal filtrada por la media móvil (b)

### 4.3.2. Detección por el método de Autocorrelación

Uno de los métodos más sencillos de implementar es la autocorrelación, donde se obtiene la información de similitud de la señal a distintos instantes de la misma. Las Figuras 4.8 y 4.9 permiten realizar la comparación entre la autocorrelación de las señales adquiridas en los bloques de control y los bloques fracturados, donde, para el caso de los fracturados, aparecen ecos que no están presentes en las señales procesadas de la probeta de control, sin embargo, no hay un cambio notorio y progresivo con respecto a las señales que tienen la información de la fractura.

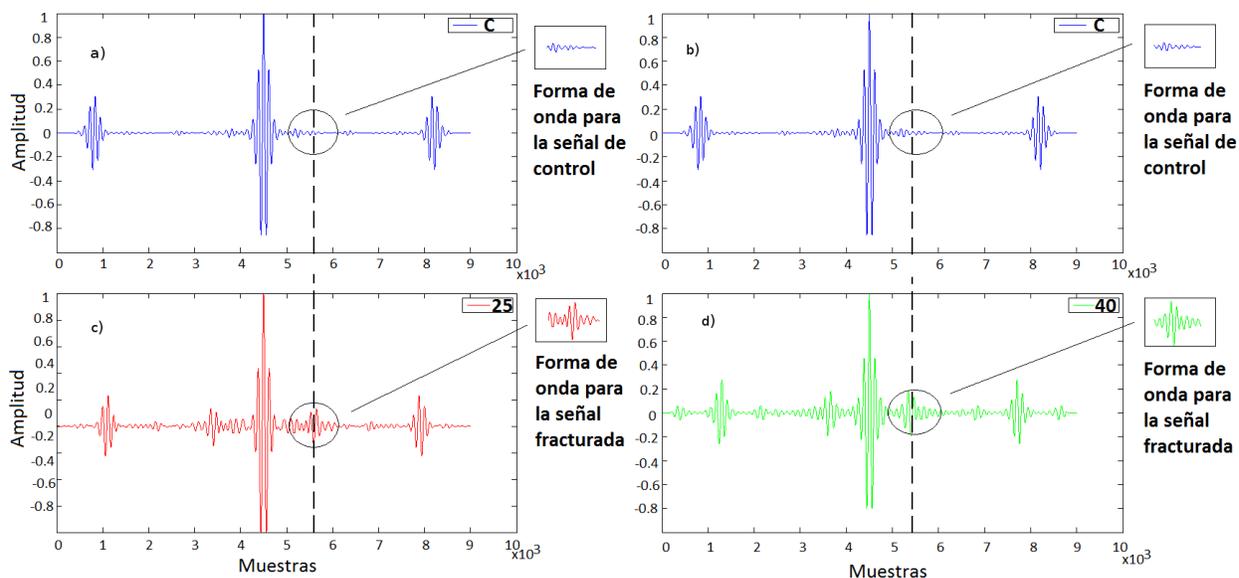


Figura 4.8: Autocorrelación de las probetas de control (a, b) y las probetas con fracturas de 0.25 y 0.40 mm (c, d)

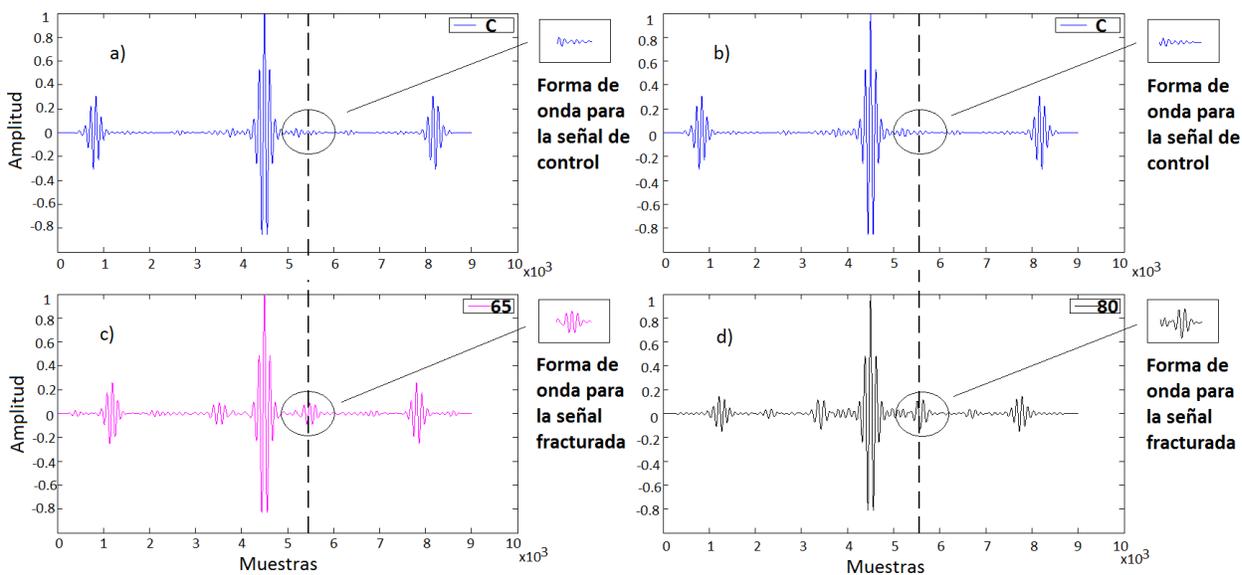


Figura 4.9: Autocorrelación de las probetas de control a) y b) y las fracturadas c) 0.65 mm y d) 0.8 mm.

### 4.3.3. Detección por el método de DEP

La información que la Densidad Espectral de Potencia nos ofrece es la variación del contenido energético de las señales. La Figura 4.10 muestra que la atenuación de la energía ultrasónica se incrementa al aumentar el tamaño de la fractura del bloque de cemento. La Tabla 4.2 contiene los datos del porcentaje de decremento en la amplitud del espectro respecto al tamaño de la fractura y la frecuencia donde se encuentra el máximo para cada caso. Como se observa al incrementar el tamaño de la falla la frecuencia máxima se disminuye, y es debido al incremento de la porosidad en el material, por lo que el fenómeno de dispersión es mayor.

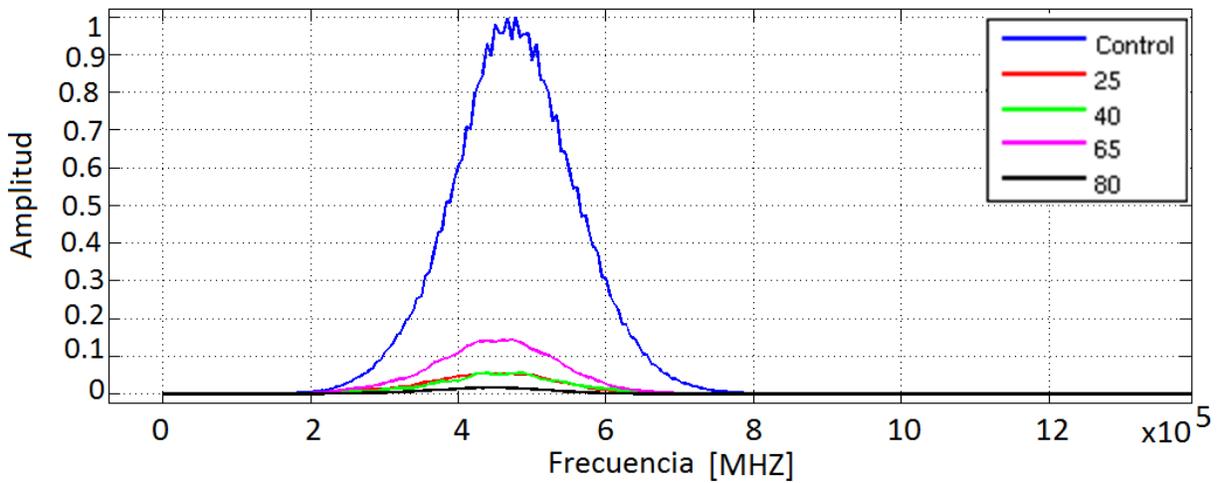


Figura 4.10: Densidades espectrales normalizadas con respecto al control de las señales adquiridas para las distintas probetas fracturadas

Probeta	Energía	Frecuencia de su maximo
Control	100 %	477 KHz
0.25	5.52 %	455 KHz
0.4	5.48 %	455 KHz
0.65	15.14 %	458 KHz
0.8	1.76 %	450 KHz

Tabla 4.2: Atenuación y frecuencias máximas de las DEP en función del tamaño de la fractura

## 4.4. Detección y localización de micro fracturas

Los métodos descritos anteriormente sirven para detectar la presencia de fracturas en un medio, sin embargo, la información espacial se pierde en la transformación, por lo que se requiere utilizar otras herramientas de análisis, donde se pueda mantener la información temporal y la espectral, ya que por el método DEP observamos que debido a la presencia de una fractura el comportamiento espectral cambia no sólo en amplitud si no también en la frecuencia de máxima energía.

### 4.4.1. Transformada Wavelet Continua

La transformada Wavelet continua es un método multirresolución que permite cuantificar los cambios frecuenciales manteniendo la información temporal. Como se observó en los espectros de potencia, la variación de la frecuencia máxima con respecto al tamaño de la fractura, indica que el análisis tiempo-frecuencia tiene que resolver pequeños cambios frecuenciales, es por ello que se decidió por el kernel Mexican Hat, el cual variando la escala en incrementos muy pequeños, aprox 0.01 (Figura 4.11), podemos ajustar el ancho de banda para cada uno de las señales adquiridas utilizando los bloques tanto de control como los que contienen fracturas desde 0.2 hasta 0.8 mm.

En la Figura 4.11 se muestran todas las escalas para el bloque control y para el bloque con fractura de 0.25 mm; para todas las fracturas se obtuvo un máximo alrededor del nivel 0.28.

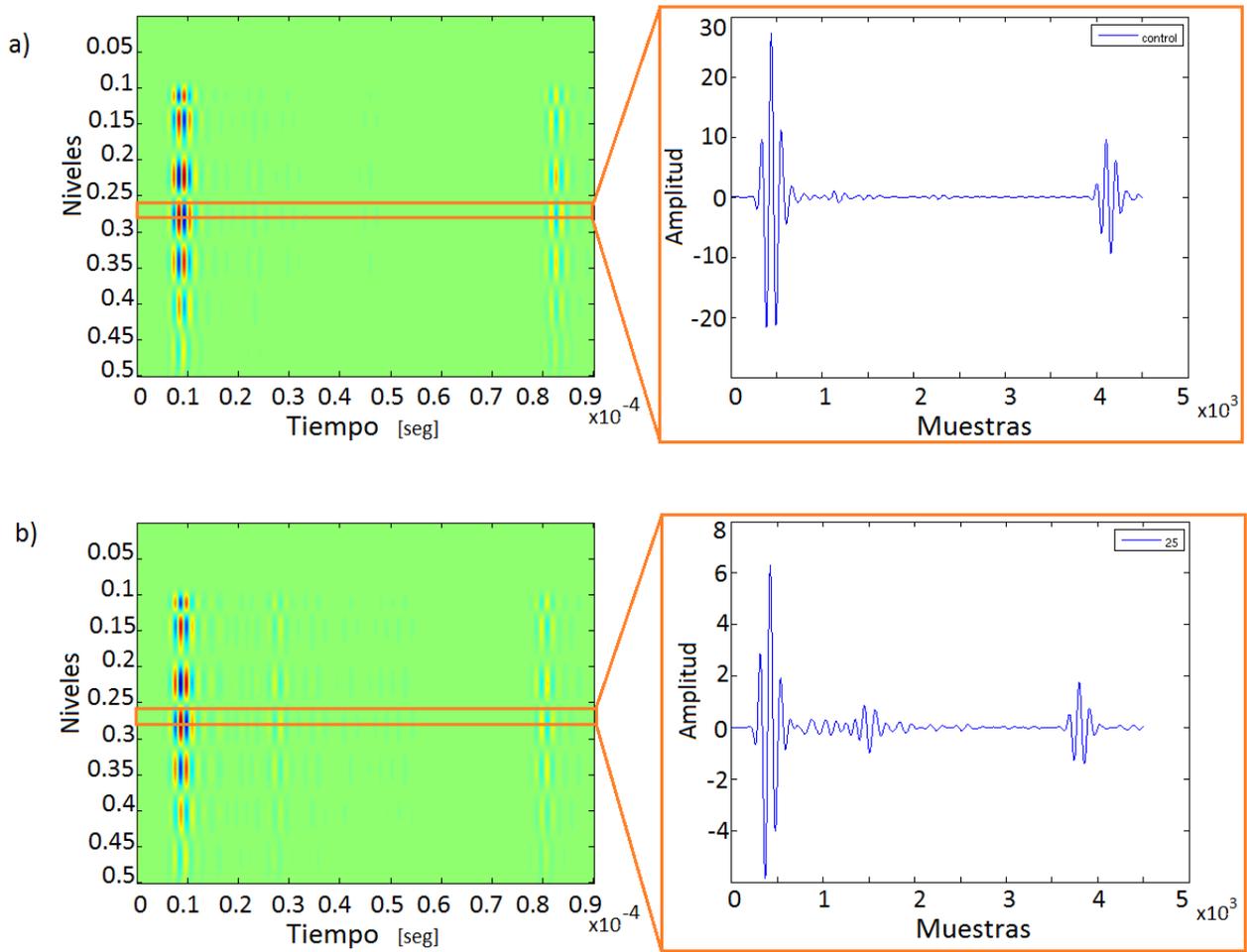


Figura 4.11: a) Representacion tiempo-escala para el bloque control (a) y probeta con fractura de 0.25 mm (b)

La Figura 4.12 muestra las gráficas donde se representan a las señales en el espacio tiempo-escala, máxima amplitud, de éstas se puede determinar la presencia de ecos completamente aislados del pulso inicial en los tiempos descritos en la Tabla (4.3), que permiten determinar calcular la posición aproximada de las fracturas dentro de la pasta de cemento.

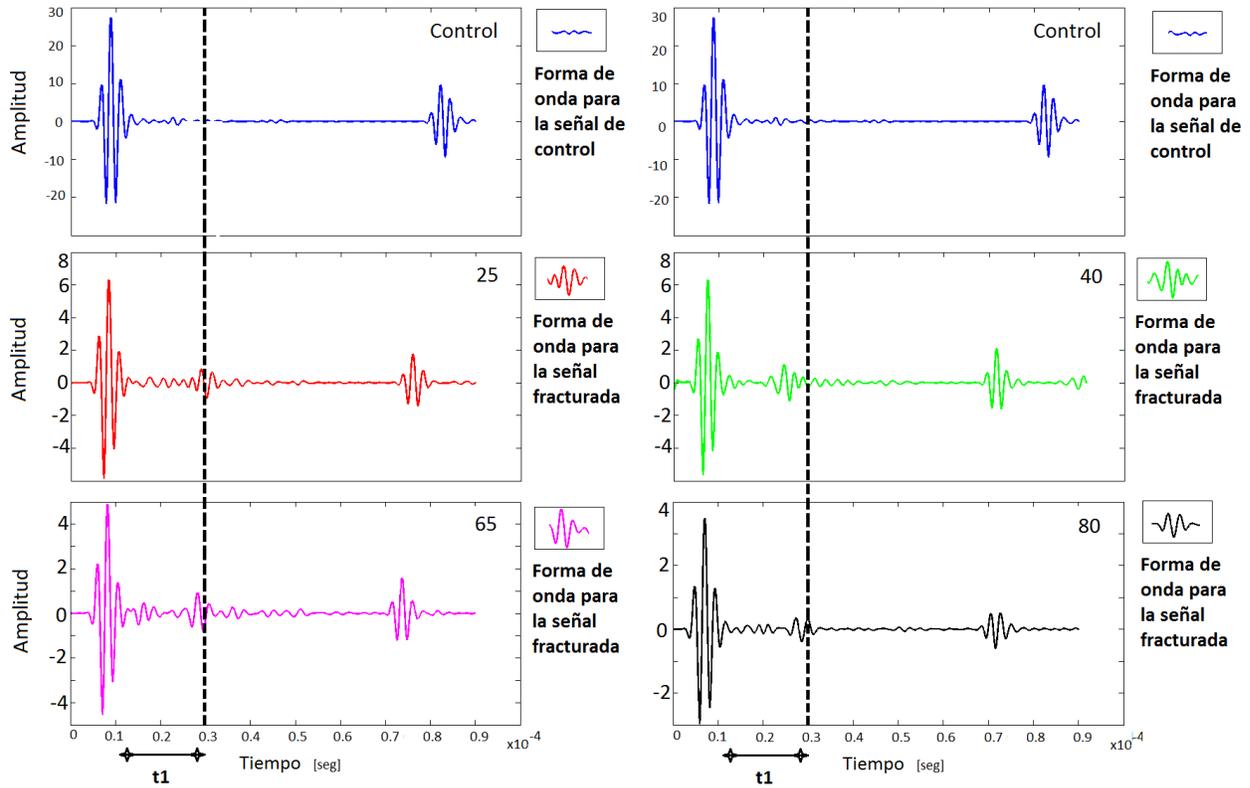


Figura 4.12: Selección de la escala de máxima energía para la probeta de control y las fracturadas. La línea punteada indica la presencia de fractura.

En la Tabla 4.3 se presentan los tiempos obtenidos entre ecos con el fin de obtener la posición de la fractura.

Probeta	$t1$ [ $\mu s$ ]	Distancia [cm]
Control	-	-
0.25	10.87	2.97
0.4	8.45	2.31
0.65	10	2.73
0.8	10.78	2.94

Tabla 4.3: Tiempos de vuelo y posición de la fractura para cada uno de las probetas considerando que la velocidad de propagación es 2730 m/s.

#### 4.4.2. Método de Hilbert-Huang

Otro método de análisis que preserva la información espacial es el algoritmo Hilbert-Huang, este método como se mencionó en el capítulo 3, hace una descomposición tiempo-frecuencia.

Los resultados obtenidos de esta transformación se muestran en la Figura 4.13 donde para algunos casos las fracturas que observamos son remarcadas de manera similar a como lo hacen las Wavelets, sin embargo en otros no presenta el mejor desempeño ya que no remarca todas las fracturas. (Ver Figura 4.13).

En la Figura 4.13a y 4.13b se observa el resultado para el bloque de control; la línea punteada muestra la presencia de un “pico” procedente de la fractura en las imágenes 4.13e y 4.13f; en las imágenes 4.13c y 4.13d no se aprecia claramente este pico.

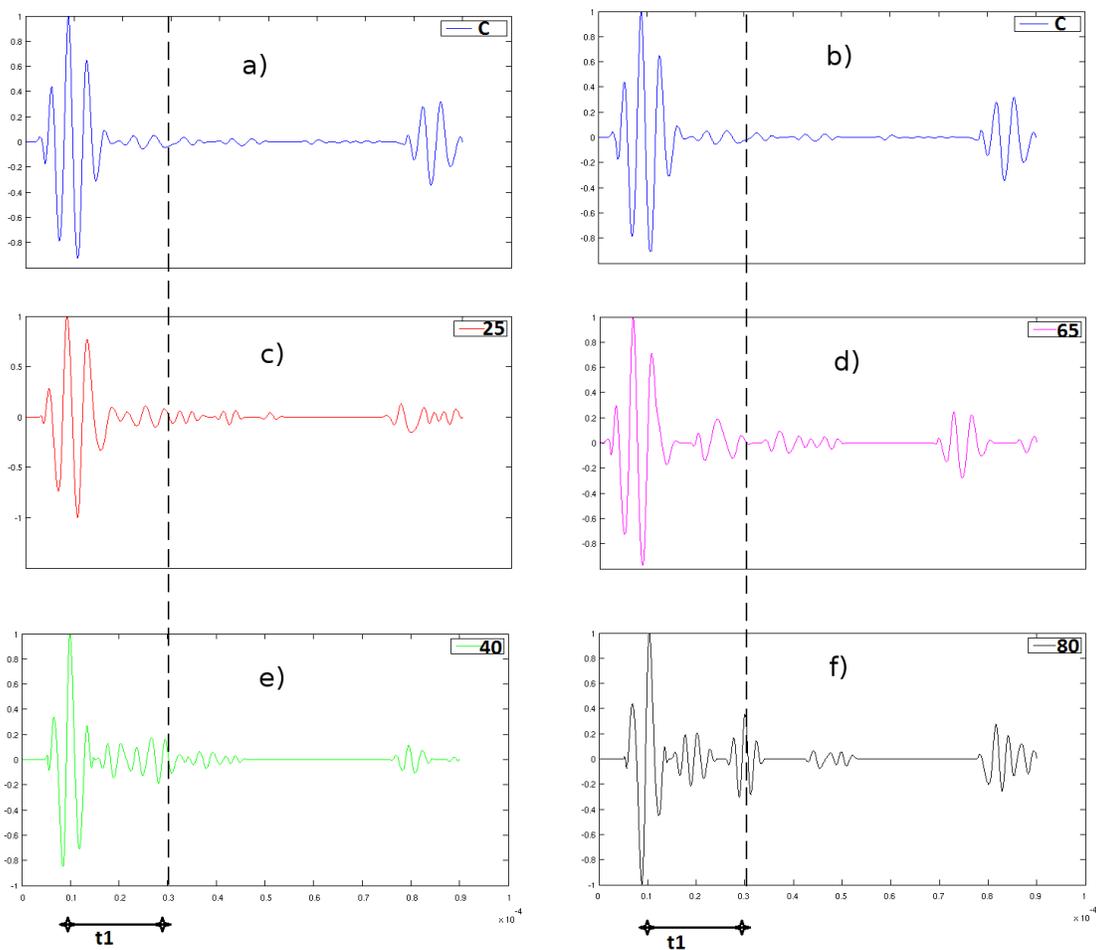


Figura 4.13: Algoritmo Hilbert-Huang aplicado a las señales estudiadas, en a) y b) el bloque de control; en c)- f) las señales procedentes de los bloques con fractura

En la Tabla 4.4 se muestran los tiempos entre ecos obtenidos mediante éste algoritmo y la localización calculada utilizando una velocidad de 2730 m/s, para la probeta con fractura de 0.25

mm no fue posible realizar dicho cálculo por no tener un pico claro.

Probeta	t1 [us]	Distancia [cm]
Control	-	-
0.25	-	-
0.4	9.08	2.43
0.65	8.69	2.32
0.8	9.85	2.63

Tabla 4.4: Tiempo entre el primer pico y el pico precedente de la fractura; en la tercer columna se muestra la distancia aproximada en donde se encuentra la fractura.

#### 4.4.3. Análisis de Componentes Principales y filtrado de Wavelets

El método de componentes principales es un método estadístico el cual busca disminuir el número de variables en una muestra seleccionando solo aquellos que tengan menor desviación de la media (Ver Capitulo 3), para este trabajo se tomo el inverso de este proceso, es decir, se tomaron aquellos componentes que tienen máxima desviación ya que al mantener todos los parámetros constantes la información proveniente de la fractura es el único factor que cambia entre las distintas muestras, por esta razón se calcularon los componentes principales de las señales y se les extrajo el primer componente, posteriormente se reconstruyeron las señales, de manera que ahora tendrán únicamente información con poca correlación que es la procedente de la fractura. (Figura 4.14).

Se observa que los picos precedentes de las caras de las probetas disminuyen, por lo que ahora el pico de la fractura es mas fácilmente observable, sin embargo este método tampoco presenta el mejor desempeño al no poderse observar la fractura en todas las señales como es el caso de la fractura de 0.65 mm (Figura 4.14).

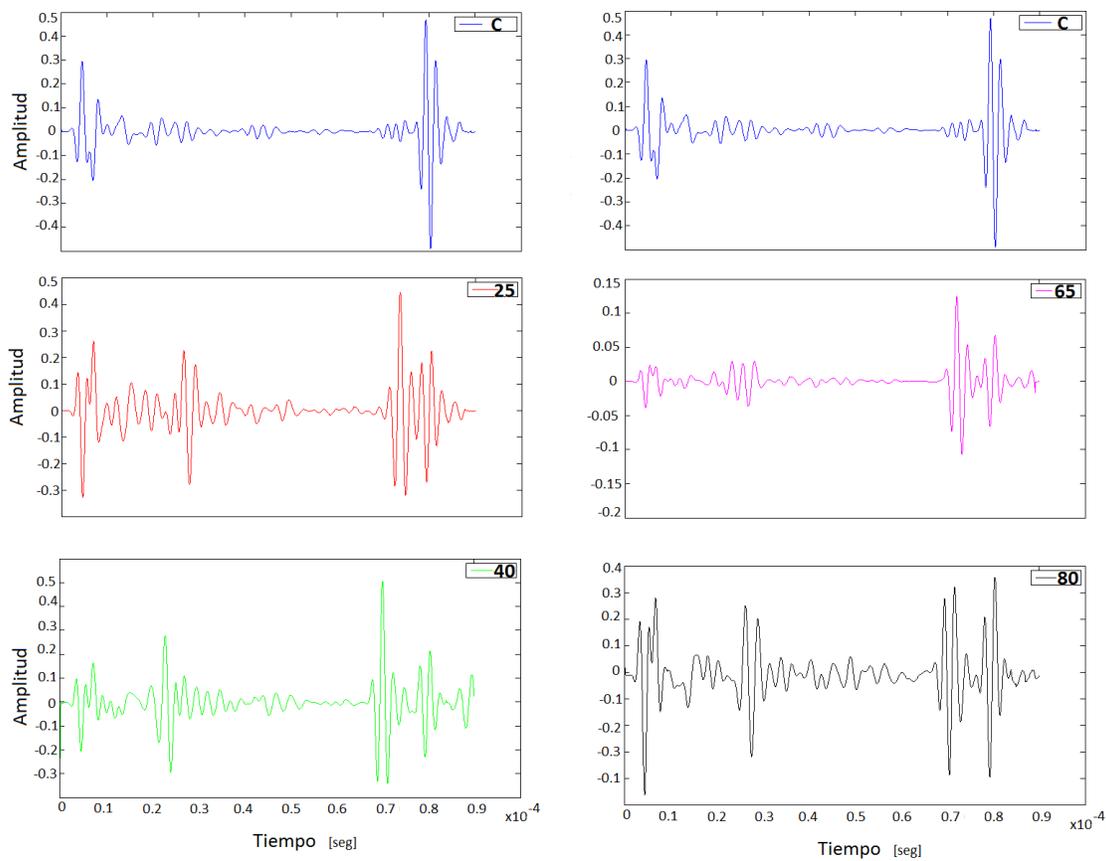


Figura 4.14: Componentes principales de las señales estudiadas, en a) y b) el resultado para la señal del bloque de control, en c)- f) las señales procedentes de las fracturas 0.25, 0.65, 0.40 y 0.80 mm.

Ya que se tienen las señales previamente filtradas por Componentes Principales se aplicó la transformada Wavelet Continua descrita en el capítulo 3 para resaltar la información que se encuentra inmersa en la señal, el diagrama del algoritmo compuesto CP-TW se describe en la Figura 4.15.

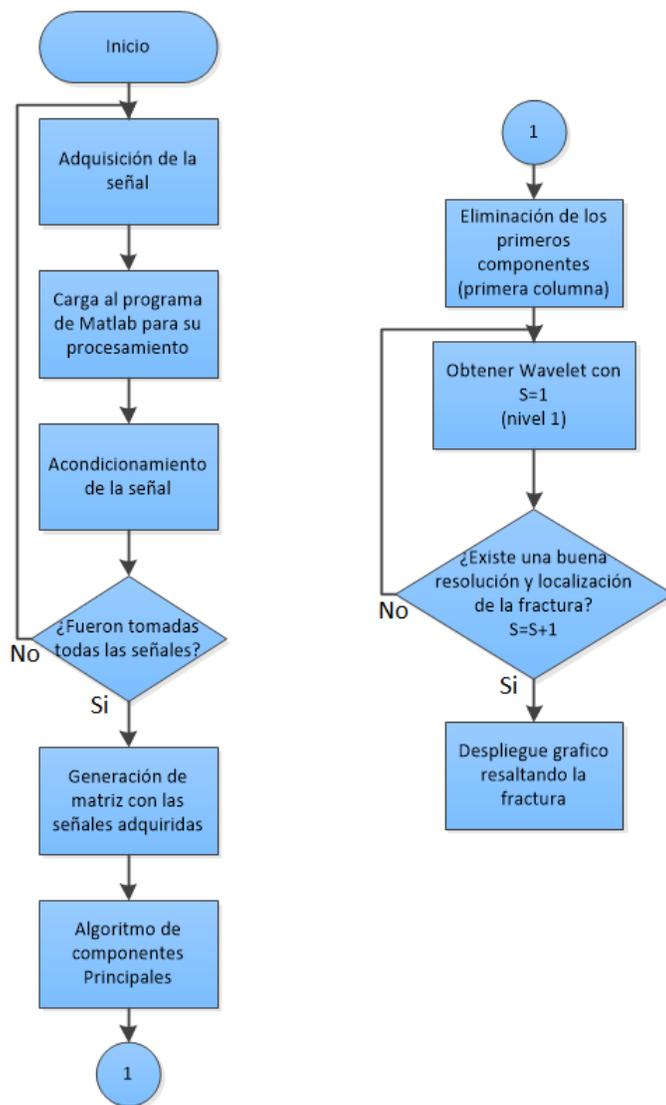


Figura 4.15: Algoritmo ACP-Wavelets

De esto se obtienen las señales mostradas en la Figura 4.16

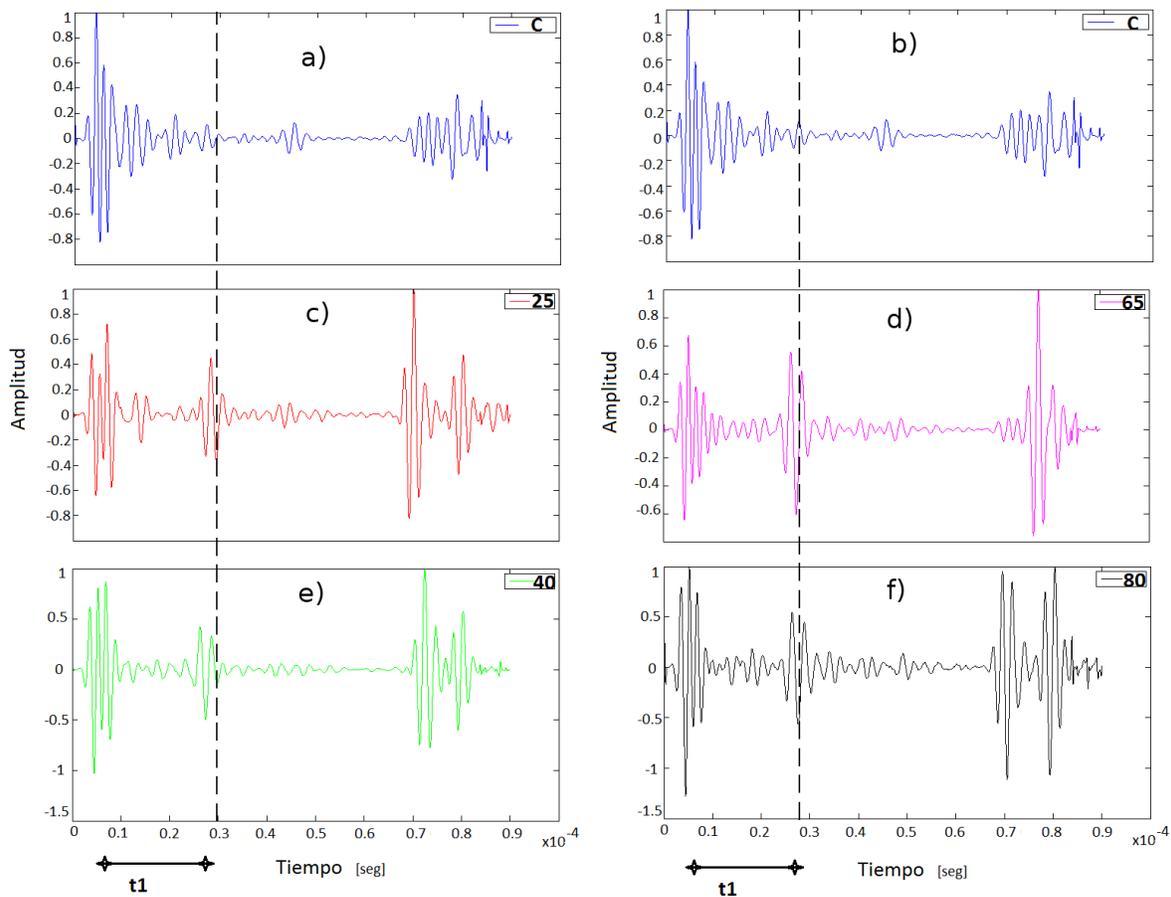


Figura 4.16: Componentes Principales y Transformada Wavelet aplicadas a las señales estudiadas, en a) y b) se observa el resultado para el bloque de control; la línea punteada muestra la presencia de un “pico” procedente de la fractura 0.25, 0.65, 0.40 y 0.80 en las imágenes c)-f).

Los resultados hacen evidente el eco procedente de las fracturas que estamos estudiando, en la Tabla 4.5 se obtienen los tiempos entre ecos y la posición correspondiente del eco procedente de la fractura.

Probeta	t1 [s]	Distancia [m]
Control	-	-
0.25	10.69	2.87
0.4	10.27	2.76
0.65	11.64	3.13
0.8	11.67	3.13

Tabla 4.5: Tiempo entre ecos para Componentes Principales con TW en la segunda columna; en la tercer columna la distancia aproximada en donde se encuentra la fractura.

# Capítulo 5

## Conclusiones y trabajo futuro

---

La caracterización de materiales cementicios mediante la técnica de ultrasonidos como parte de los ensayos no destructivos se presenta de forma importante y eficaz. Sin embargo dada la complejidad que presentan los materiales no homogéneos, resulta necesario hacer un análisis de cada uno de los componentes que integra el diseño experimental y la configuración de éstos, además integrar técnicas de procesamiento digital de señales que permitan un análisis completo y viable en la descripción de la propagación de ondas ultrasónicas cuando se transmiten a través de materiales cementicios y la interacción que estas tienen con las heterogeneidades presentes.

De los resultados obtenidos se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

Los transductores pueden ser excitados por distintos tipos de onda presentando distintas respuestas a cada onda aplicada, por esta razón se determinó cual es la señal de excitación que da la mejor respuesta del transductor receptor, tomando en cuenta la amplitud de la señal recibida como parte de la energía transmitida por la señal de excitación, debido a que el material es altamente atenuante y por otro lado la forma de onda de la señal recibida.

Con base en esto se analizaron diferentes pulsos, cuadrado negativo, cuadrado positivo y sinc, encontrando que el pulso cuadrado negativo era el que mejor respuesta presenta ya que tiene un tiempo de respuesta corto (forma de onda), lo cual facilita la determinación de la velocidad de

fase en un medio heterogéneo debido a que la propia micro estructura tiende a aumentar el ancho de la forma de onda del pulso transmitido en el material.

En cuanto al diseño de la disposición de los transductores, es importante que se garantice que sus ejes axiales se encuentren alineados para que el transductor receptor detecte la región del haz donde se encuentra concentrada la energía, por esta razón se creó una base en la que además de cumplir este requisito fuese de un material que minimizara los efectos de ecos.

Es necesario además el determinar la distancia óptima para colocar los transductores ya que si se encuentran muy cercanos la señal se observa deformada por estar la probeta dentro del campo cercano (ver Capítulo 2) y si están muy lejos disminuye la amplitud del haz debido a la alta atenuación que se tiene en los materiales heterogéneos la señal recibida puede perderse. Con base a esto, concluimos que para los transductores utilizados en este estudio la distancia adecuada entre el transductor y la probeta es de 4 cm aproximadamente, alcanzando así una buena resolución en la señal obtenida y poca atenuación en la amplitud de esta.

Por otro lado, la correcta realización de las probetas de material cementicio resulta ser muy importante ya que los cambios en la microestructura presentes en las señales permanecen constantes en todas las señales ya que todos fueron elaborados bajo una misma norma de elaboración ASTM C 305-99. De esta forma es posible mantener un mejor control en la parte experimental por parte de las piezas a analizar.

Con el fin de realizar la detección y localización de fracturas en materiales cementicios que se presentan como materiales altamente dispersivos, se ha desarrollado en este trabajo de tesis, la aplicación de técnicas de procesamiento de señales plasmando además el desempeño de estas.

De acuerdo con la aplicación de los métodos de procesamiento, se puede concluir que es posible realizar la detección de la fractura aplicando el algoritmo de DEP ya que por medio de este se hace evidente la atenuación, en la amplitud de la señal proveniente de probetas fracturadas con respecto a la de la señal de control como se muestra en la figura 4.10.

El cambio porcentual se muestra en la tabla 4.2, teniendo como 100 % la amplitud máxima de la DEP, proveniente de la señal de la probeta de control. Esta técnica pudo aplicarse obteniendo

la detección de la fractura para todas las señales, presentando en todos los casos atenuación en la energía de las señales obtenidas de probetas fracturadas.

Así mismo es posible la detección por el método de autocorrelación ya que se presenta un cambio en la forma de onda de la señal proveniente de las probetas con fracturas con respecto a la señal de control, como se muestra en la Figura 4.8 y Figura 4.9. Este fenómeno se presentó en todos las señales, concluyendo así, que esta técnica de procesamiento es factible para la detección de fracturas en material cementicio.

Con la aplicación de los métodos mencionados anteriormente no es posible la determinación de la posición de la fractura, dato que resulta importante ya que la posición de una fractura es imprescindible para argumentar cuando una edificación o elemento presenta un daño que puede ser considerado como grave para la seguridad estructural.

Para la determinación de la localización se aplicó la técnica de transformada wavelet continua, seleccionando la wavelet mexican hat y eligiendo el nivel de mejor resolución para la localización de la fractura. Como se muestra en la Figura 4.12, este método resalta la fractura pudiendo determinar el tiempo y posteriormente la posición aproximada de esta para cada una de las señales provenientes de todas las probetas fracturadas.

Además es posible ver un pequeño corrimiento del pico de donde se encuentra la fractura, debido a que la posición de esta, cambia de probeta en probeta, fenómeno que se esperaba ya que en la elaboración de las probetas y su respectiva fractura, se movieron un poco los calibradores durante el proceso de fraguado.

Con la aplicación de la THH es posible la determinación de existencia de fractura y de la localización pero a diferencia de los métodos anteriores no es posible aplicarla a todas las señales provenientes de distintos tamaños de fracturas, ya que no se hace evidente el cambio en la señal debido a la presencia del daño. Como se observa en la figura 4.13 para las señales c) y d) no es clara la presencia de la fractura, no así para las señales f) donde se facilita la detección y localización de la fractura, y para e) es posible la detección del daño pero no resulta tan evidente la posición de la fractura.

Aplicando los algoritmos propios de la ACP y TWC, es posible la detección y la localización de la fractura para todas las señales con distintos tamaños de fractura, ya que la señal proveniente del análisis de ACP remueve la información más redundante, quedando únicamente la información proveniente de la fractura, posteriormente al aplicar la TWC se resalta la información proveniente de la fractura, haciendo evidente el cambio en la forma de onda y permitiendo la localización aproximada del daño. Para este método también se considera el corrimiento en la señal debido al cambio de posición de la fractura durante la elaboración de las probetas como se explicó anteriormente.

Con base a lo descrito en este trabajo de tesis para cada uno de los métodos se concluye que la detección por los métodos de DEP y autocorrelacion son factibles para la determinación de la existencia de fracturas. Por otro lado el método de ACP con TWC es el método con mayor sensibilidad al daño ya que resalta mejor la posición de la fractura, pudiéndose aplicar a todas las señales analizadas en este trabajo.

Aunque los primeros resultados alcanzados han sido satisfactorios es necesario seguir avanzando en varias líneas principales:

- Elaboración de más probetas con el mismo tamaño de fractura con el fin de tener un número adecuado de señales que permita hacer uso de herramientas estadísticas.
- Realizar las mediciones con distintas mezclas para verificar que los métodos aquí descritos funcionan adecuadamente para cualquier relación agua-cemento.
- Continuar el trabajo con el algoritmo de Hilbert-Huang ya que podría adaptarse para mejorar su desempeño para este tipo de muestras.
- El enfoque del haz de ultrasonido mediante transductores enfocados para poder tener una mejor resolución en la señal, como parte del diseño experimental.
- Efectuar análisis con arreglo en fase para mejorar la resolución y de esta manera determinar el tamaño de la fractura.

# Bibliografía

- [1] Conceptos básicos del concreto. Instituto mexicano del cemento y del concreto. *IMCYC*, 5, junio 2006.
- [2] C. Ferrer-Gimenez. Tecnología de los materiales. Technical report, 2005.
- [3] K. M. Hoskins. *Diagnostic Ultrasound, Physics and equipment*. U.S. U.S.Cambridge., 2nd ed. edition, 2010.
- [4] A. A. Shah. Nonlinear Ultrasonic Investigation of Concrete Damaged. *Journal of materials in civil engineering*, 2010.
- [5] R. Draï, F. Sellidj, M. Khelil, and A. Benchaala. Elaboration of some signal processing algorithms in ultrasonic techniques: application to materials NDT. *Ultrasonics*, 38:503–507, 2000.
- [6] T. Bouden, F. Djerfi, S. Dib, and M. Nibouche. Hilbert Huang transform for enhancing the impact echo method of non destructive testing. *J. Automation & Systems Engineering*, 6(4):172–184, 2012.
- [7] K. Chougani, A. Gisolf, and F. Dijkstra. Detection of transparent cracks using non linear acoustics. *18th World Conference on Nondestructive Testing*, pages 16–20, April 2012,.
- [8] M. Rucka. Damage in beams using wavelet transform on higher vibration modes. *Journal of theoretical and applied mechanics*, 49:399–417, 2011.

- [9] K. K. Shung. *Diagnostic ultrasound: Imaging and Blood Flow Measurements*. CRC Press, 2006.
- [10] I. Minin and O. Minin. *Ultrasound Imaging medical applications*. InTech, 2011.
- [11] S. Temkin. *Elements of acoustics*. Acoustical Society of America, Estados Unidos, 2001.
- [12] A. D. Pierce. *Acoustics: An introduction to its physical principles and applications*. Acoustical Society of America, Woodbury, New York, 1994.
- [13] M. A. Molero. *Caracterización de materiales cementicios mediante la dispersion ultrasónica*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
- [14] W. P. Mason. *Physical acoustics: Principles and methods*. Academic, New York, 1964.
- [15] W.M. Telford and L.P. Geldart. *Applied Geophysics*. Cambridge University press, 1978.
- [16] P. Hoskins, K. Martin, and A.I. Thrush. *Diagnostic Ultrasound Physics and Equipment*. Cambridge University press, 2nd ed. edition, 2010.
- [17] P. Filippi. *Acoustics: Basic physics, theory and methods*. Academic, San Diego, 1999.
- [18] Notas técnicas de Olympus. Technical report, 2011.
- [19] L. Escobar-Salguero. *Conceptos básicos de procesamiento digital de señales*. Universidad Nacional Autónoma de México, Febrero 2009.
- [20] J.G. Proakis and D.G. Manolakis. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*. New York: Macmillan, 2nd ed. edition, 1992.
- [21] S. Mallat. *A wavelet tour of signal processing*. Academic Press, 2nd ed. edition, 1999.
- [22] J. A. Maganda-Carvajal and C. Rubio-González. *Aplicación de la Transformada Continua de Wavelet en Señales Ultrasónicas*. Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), 2009.

- [23] S. G. Mallat. *A wavelet tour of signal processing*. 1998.
- [24] Z. Zhou and H. Adeli. Time frequency signal analysis of earthquake records using Mexican hat wavelets. *Comput Aided Civ Infrastruct*, 18(5):379–389, 2003.
- [25] G. Erlebacher and D. A. Yuen. A wavelet toolkit for visualization and analysis of large data sets in earthquake research. *Pure Appl Geophys*, 16:2215–2229, 2004.
- [26] A. Grossmann and J. Morlet. Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM J Math Annual*, 15(4):723–736, 1984.
- [27] A. Teolis. *Computational signal processing with wavelets*. 1998.
- [28] J. Lin and L. Qu. Feature extraction based on Morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis. *Journal Sound Vib*, 234(1):135–148, 2000.
- [29] N.G. Nikolau and I.A. Antoniadis. Demodulation of vibration signals generated by defects in rolling element bearing using complex shifted Morlet wavelets. *Mech Syst Signal Process*, 16(4):677–694, 2002.
- [30] R. Yan and R. Gao. Multi-scale enveloping spectrogram for vibration analysis in bearing defect diagnosis. *Tribol Int.*, 42(2):293–302, 2009.
- [31] S. G. Mallat and W. L. Hwang. Singularity detection and processing with wavelets. *IEEE Trans Inf Theory*, 38:617–643, 1992.
- [32] Q. Sun and Y. Tang. Singularity analysis using continuous wavelet transform for bearing fault diagnosis. *Mech Syst Signal Process*, 16:1025–1041, 2002.
- [33] M. Moga, V.D. Moga, and G. Mihalas. Continuous wavelet transform in ECG analysis: a concept: a concept or clinical uses. *Connecting medical informatics and bio-informatics*, pages 1143–1148, 2005.

- [34] P. J. Fard, M. H. Moradi, and M. R. Divide. A novel approach in R peak detection using hybrid complex wavelet (HCW). *Int J. Cardiol*, 124(2):250–253, 2007.
- [35] E. Shusterman and M. Feder. Analysis and synthesis of 1/f processes via Shannon wavelets. *IEEE Trans Signal Processs*, 46(6):1698–1702, 1998.
- [36] D. E. Newland. Wavelet analysis of vibration part I: theory. *ASME J. Vib. Acoust*, 116(4):409–416, 1994a.
- [37] D. E. Newland. Wavelet analysis of vibration part II: wavelet maps. *ASME J. Vib. Acoust*, 116(4):417–425, 1994b.
- [38] D. E. Newland. *Random vibrations, spectral and wavelet analysis*. Wiley, 1993.
- [39] R.A. Bates, M.F. Hilton, K.R. Godfrey, and M.J. Chappell. Autonomic function assessment using analysis of heart rate variability. *Control Eng Pract*, 5(12):1731–1737, 1997.
- [40] K. M. Iftekharuddin. Harmonic wavelet joint transform correlator: analysis, algorithm, and application to image denoising. *Opt Eng*, 41(12):3307–3315, 2002.
- [41] N. E. Huang and S. P. Shen. *Hilbert-Huang Transform and Its Applications*. 2005.
- [42] N.E. Huang, Z. Shen, S. Long, M. Wu, H. Shih, and Q. Zheng. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc R Soc London A*, 454:903–995, 1998.
- [43] S.T. Quek, P.S. Tua, and Q. Wang. Detecting anomalies in beams and plate based on the Hilbert–Huang transform of real signals. *Smart Mater Struct*, 12:447–460, 2003.
- [44] N.E. Huang and S. Shen. Hilbert–Huang transform and its applications. *Interdiscip Math Sci*, 5:324, 2005.
- [45] R. Kazys, D. Pagodinas, and O. Tumsys. Application of the Hilbert–Huang signal processing to ultrasonic nondestructive testing of composite materials. *Ultrasound*, 2(43):17–22, 2002.

- [46] L. Cohen. Time–frequency distributions. *A review In: Proceeding of IEEE*, 77(7), 1989.
- [47] M.E. Montesinos, J.L. Munoz-Cobo, and C. Perez. Hilbert–Huang analysis of BWR neutron detector signals: application to DR calculation and to corrupted signal analysis. *Ann Nucl Energy*, 30:715–727, 2003.
- [48] J.E. Jackson. *A user’s guide to principal components*. Wiley, 1991.
- [49] I.T. Jolliffe. *Principal Component Analysis*. 2002.
- [50] HandyScope model HS3 A Portable 100 MS/s Instrument Connected to USB 2.0 and USB 1.1. Technical report, 2002.
- [51] <http://www.olympus-ims.com/es/preamplifiers>, 2013.
- [52] Standard Guide for Evaluating Characteristics of Ultrasonic Search Units Designation E1065 08. Technical report, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959., 2013.
- [53] Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency Designation C305 99. Technical report, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959., 2013.
- [54] Cemex. Ficha técnica cemento CPC 30 R B.
- [55] K. T. Dussik and D. J. Fritch. Determination of sound attenuation and sound velocity in the structure constituting the joints, and of the ultrasonic field distribution with the joints of living tissues and anatomical preparations, both in normal and pathological conditions. *National Institute of Health Project Progress Report*, (A454), 1956.
- [56] M. O’Donnell, E.T Jaynes, and J. G. Miller. Kramers-Kronig relationships between ultrasonic attenuation and phase velocity. *journal of Acoustical Society of America*, 69:696–701, 1981.

- [57] M. O'Donnell, E. Jaynes, and J. G. Miller. General relationships between ultrasonic attenuation and dispersion. *Journal of Acoustical Society of America*, 63:1935–1936, 1978.
- [58] R. Hill. A self-consistent mechanics of composite materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 13:213–222, 1965.
- [59] M. A. Molero, I. Segura, and M.G. Hernández. Characterization of mortar samples using ultrasonic scattering attenuation. *Physics Procedia*, 3(1):839–845, January 2010.
- [60] D. Ulrich, B. Rietbergen, et al. The ability of three-dimensional structural indices to reflect mechanical aspects of trabecular bone. *Bone (N.Y.)*, 25:55–60, 1999.
- [61] R. G. Sólis-Carcaño, E. I. Moreno, and W. Castillo Pak. Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. *Ingeniería*, 8(2):41–52, 2004.
- [62] A. G. Khalid Chougrani. Detection of transparent cracks using nonlinear acoustics. *18th World Conference on Nondestructive Testing* ., April 2012.
- [63] <http://www.olympus-ims.com/data/File/panametrics/UT-technotes.en.pdf>. Technical report.
- [64] F. W. Billmeyer. *Ciencia de polimeros*. Reverte, 2004.
- [65] I. Segura-Pérez, A. Moragues-Terrados, and J. Anaya-Velayos. Microstructural characterization of cement-based materials by means of destructive testing. 2008.
- [66] R. Draï, F. Sellidj, and M. Khelil. Elaboration of some signal processing algorithms in ultrasonic techniques: application to materials NDT. *Ultrasonics*, 38:503–507, 2000.
- [67] L. Vergara, R. Miralles, J. Gosálbez, and F.J. Juanes. Métodos END mediante ultrasonido para caracterizar la durabilidad del mortero. *TecniAcustica*, pages 35–43, 2000.

- [68] M. Ricupero, F. Fraudita, D. Pereira, and H. Figueroa. Evaluación de la calidad de adherencia en la interfase metal-elastómero en probetas normalizadas mediante ultrasonido.
- [69] W. Punurai. *Cement-based materials' characterization using ultrasonic attenuation*. 2006.
- [70] M.A.G. Izquierdo, M.G. Hernández, and O. Martinez. Filtrado adaptativo no lineal para la reducción de ruido estructural en inspecciones por ultrasonidos. *Acustica2000*, pages 35–43, 2000.
- [71] Hirata, Kurosawa, and Katagiri. Cross-correlation by single-bit signal processing for ultrasonic distance measurement. *IEICE Trans. Fundamentals*, E91-A(4):1031–1037, 2008.
- [72] R. B. Panerai. Spectrum analysis and correlation. Technical report, 2000.
- [73] A. V. Oppenheim. *Señales y Sistemas*. Pearson, Prentice hill, 2nd ed. edition, 1997.
- [74] A.V. Oppenheim. *Discret-Time Signal Processing*. 1999.
- [75] B. Psenicka. *Procesamiento digital de señales, transformada de Fourier*. Universidad Nacional Autónoma de México, 1995.
- [76] A.V. Oppenheim and R.W. Schaffer. *Discrete-time signal processing*. PrenticeHall, 1989.
- [77] G. Rilling, P. Flandrin, and P. Gonçaves. On empirical mode decomposition and its algorithms. *IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*, 2003.
- [78] F. A. Marengo-Rodríguez. Transformada de Hilbert-Huang y sus aplicaciones en ingeniería y ciencias.
- [79] A. Garbacz and E. Garboczi. Ultrasonic evaluation methods applicable to polymer concrete composites. *NISTIR 6975 project report*, page 76, 2003.