

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



**ESTUDIO DE LOS CAMPOS SONOROS SUBACÚATICOS DENTRO DE UNA
PISCINA DE NADO SINCRONIZADO**

Tesis para obtener el grado académico de Magíster en Física
Aplicada que presenta:

Franck Paul Vásquez Pérez

Asesor:

Richard Alberto Rivera Campos

Lima, 2022

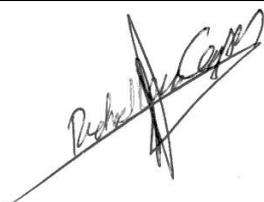
Informe de Similitud

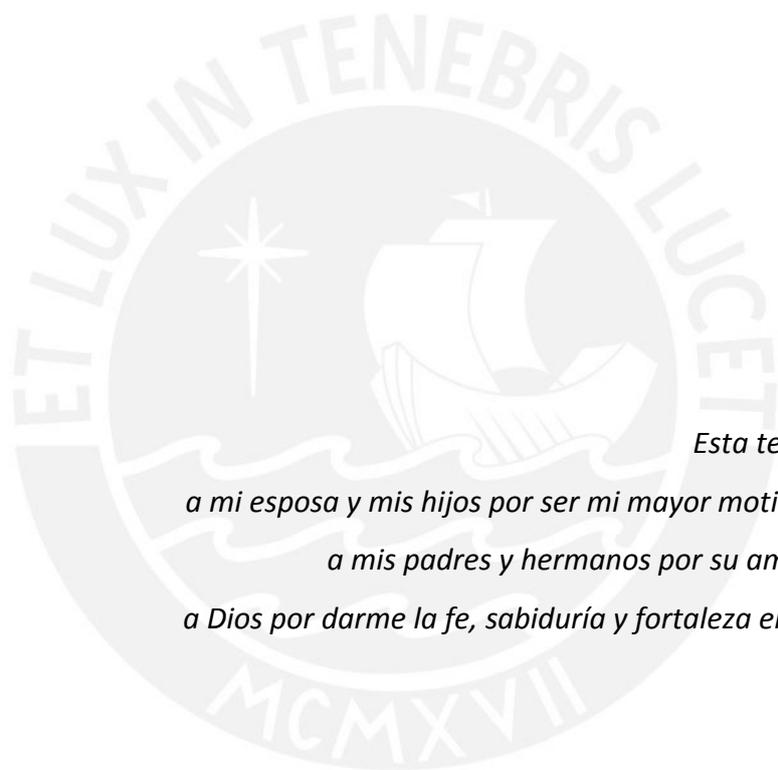
Yo, RICHARD ALBERTO RIVERA CAMPOS, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis “ESTUDIO DE LOS CAMPOS SONOROS SUBACUÁTICOS DENTRO DE UNA PISCINA DE NADO SINCRONIZADO”, del autor FRANCK PAUL VASQUEZ PÉREZ de constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 9 %. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 23/11/2022.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima 9 de diciembre de 2023

Apellidos y nombres del asesor: <u>Richard Alberto Rivera Campos</u>	
DNI:18099258	
ORCID: 0000-0003-3368-6419	
Firma	



*Esta tesis está dedicada
a mi esposa y mis hijos por ser mi mayor motivación en la vida,
a mis padres y hermanos por su amor incondicional,
a Dios por darme la fe, sabiduría y fortaleza en tiempo difíciles.*

AGRADECIMIENTOS

Al Profesor Richard Rivera, por su valiosa guía y apoyo en todo el proceso de realización de este trabajo de tesis.

Agradecimiento especial al Profesor Jorge Moreno, por cuya iniciativa e inquietud por conocer este nuevo campo de aplicación ha motivado el desafío y desarrollo del presente trabajo de tesis.

A los docentes de la Maestría de Física Aplicada de la PUCP, por los conocimientos brindados durante el desarrollo de los cursos.

A mi esposa e hijos por su paciencia y amor incondicional, por permitirme dedicarle tiempo al desarrollo de este valioso trabajo de investigación.

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se desarrolla un software de simulación para la caracterización acústica de los campos sonoros al interior de una piscina de nado sincronizado; la representación de los datos simulados se lleva a cabo a través de la síntesis de la respuesta impulsiva de un recinto, auralización y simulación de frentes de onda acústicos.

Para la síntesis de la respuesta impulsiva se utilizan las técnicas de trazado de rayos acústicos, fuentes imágenes y radiosidad. Así mismo, se desarrollan modelos matemáticos y algoritmos de procesamiento de datos involucrados en el proceso de simulación de un entorno subacuático; este desarrollo es utilizado también para hacer una descripción analítica del espacio acústico de simulación, y de sus elementos.

Con el fin de obtener resultados de aplicación se ha propuesto el uso del software desarrollado, denominado "AURASONIC", en el proceso de predicción del campo sonoro al interior de una piscina de nado sincronizado; en el cual se utilizan especificaciones técnicas para una piscina de competencias olímpicas. Finalmente se desarrolla el análisis de los resultados obtenidos, y se comparan con métricas utilizadas en la acústica arquitectónica, con el objetivo de tener referencias comparativas útiles.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
RESUMEN	IV
ÍNDICE GENERAL	V
LISTA DE TABLAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1. <i>Hipótesis</i>	2
1.2. <i>Objetivo General</i>	3
1.3. <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.4. <i>Alcances</i>	4
1.5. <i>Metodología</i>	5
1.6. <i>Disposición y Desarrollo del Estudio por Capítulos</i>	6
CAPÍTULO 2	8
TÉCNICAS DE SIMULACIÓN Y SINTESIS DE LOS CAMPOS SONOROS EN ESPACIOS CERRADOS	8
2.1. <i>Introducción</i>	8
2.2. <i>Estado del Arte</i>	8
CAPÍTULO 3	13
CARACTERIZACIÓN DEL CAMPO SONORO UTILIZANDO LAS TÉCNICAS DE TRAZADO DE RAYOS, FUENTES IMÁGENES Y RADIOSIDAD	13
3.1. <i>Introducción</i>	13
3.2. <i>Descripción General del Método</i>	13
3.3. <i>Propagación del Sonido</i>	17
3.4. <i>Impedancia acústica</i>	24
3.5. <i>Reflexión, Absorción y Transmisión</i>	27
3.6. <i>Absorción del Medio de Propagación</i>	37
3.7. <i>Refracción</i>	39

3.8. Acústica Geométrica	43
3.9. Dispersión Superficial	59
3.10. Espectro de la Función de Propagación de Reflexiones Difusas de Primer Orden	63
3.11. Modelamiento de la Fuente de Sonido y Receptor.....	64
3.12. Auralización.....	67
3.13. Acústica de Recintos.....	68
CAPÍTULO 4	77
DETERMINACIÓN ANALÍTICA DEL ESPACIO ACÚSTICO DE UNA PISCINA DE COMPETENCIAS DE NADO SINCRONIZADO	77
4.1. Introducción	77
4.2. Características de Diseño de Piscina de Nado Sincronizado.....	78
4.3. Determinación de la Zona de Audición.....	83
4.4. Cálculo de la Velocidad del Sonido	84
4.5. Análisis de Refracción.....	85
4.6. Análisis del Patrón de Radiación de la Fuente.....	87
4.7. Análisis de Reflexión y Absorción	89
4.8. Análisis de Dispersión.....	100
4.9. Cálculo de Previo de Parámetros Acústicos del Recinto	102
CAPÍTULO 5	106
DESARROLLO DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y ALGORITMOS DE PROCESAMIENTO.....	106
5.1. Introducción	106
5.2. Descripción General del Sistema	106
5.3. Arquitectura de Software	108
5.4. Algoritmos de Procesamiento de Datos	125
5.5. Implementación del Software	139
CAPÍTULO 6	149
CARACTERIZACIÓN DE LOS CAMPOS SONOROS UTILIZANDO EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN	149
6.1. Introducción	149
6.2. Configuración de las Pruebas	150
6.3. Reportes	152
6.4. Análisis de los Resultados.....	162

CAPÍTULO 7	164
DESARROLLO DEL MODELO DE NEGOCIO	164
7.1. <i>Introducción</i>	164
7.2. <i>Estudio de Mercado</i>	164
7.3. <i>Análisis Financiero</i>	167
7.4. <i>Comercialización</i>	169
CAPÍTULO 8	170
CONCLUSIONES.....	170
RECOMENDACIONES.....	173
BIBLIOGRAFÍA	174
ANEXOS	182
ANEXO I: LISTA DE ABREVIATURAS.....	182
ANEXO II: GLOSARIO	183
ANEXO III: INTENSIDAD, ENERGÍA Y POTENCIA	186
ANEXO IV: BANDAS DE FRECUENCIA	189
ANEXO V: GENERACIÓN DE CÓDIGO EN LABVIEW	191
ANEXO VI: CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA	196
ANEXO VII: OTROS RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN LA ZONA DE EJECUCIÓN DE NADO SINCRONIZADO	198

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Relación de valores STI e inteligibilidad de la palabra.	76
Tabla 4.1. Características de las dimensiones de la piscina para la competencia de nado sincronizado.	78
Tabla 4.2. Parámetros de la interfase agua-aire.....	89
Tabla 4.3. Parámetros de la interfase aire-agua.....	92
Tabla 4.4. Parámetros para el cálculo del coeficiente de reflexión y absorción en las paredes de la piscina de nado sincronizado.	96
Tabla 4.5. Parámetros para el cálculo del coeficiente de dispersión en la superficie del agua (interfase agua-aire).....	100
Tabla 4.6. Parámetros del recinto para el cálculo del tiempo de reverberación.....	103
Tabla 4.7. Parámetros del recinto para el cálculo de la frecuencia de Schroeder.	104
Tabla 4.8. Parámetros del recinto para el cálculo de modos locales.	105
Tabla 4.9. Modos acústicos del recinto subacuático.	105
Tabla 5.1. Módulos principales del sistema.	111
Tabla 5.2. Lista de clases para el procesamiento de la simulación y síntesis del campo sonoro.	112
Tabla 5.3. Lista de clases para las operaciones generales del sistema.....	113
Tabla 6.1. Lista de parámetros para la configuración de las pruebas de caracterización de los campos sonoros en la piscina de nado sincronizado.	150
Tabla 6.2. Ubicación de puntos de audición.	152
Tabla 6.3. Parámetros acústicos de inteligibilidad de la palabra.....	159
Tabla 7.1. Flujo de caja sin financiamiento.	168
Tabla 7.2. Flujo de caja con financiamiento.....	168
Tabla 8.1. Ejemplo de bandas de frecuencia en octavas.	190
Tabla 8.2. Ejemplo de bandas de frecuencia en tercios de octava.	190

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Clasificación de modelos para la simulación de la propagación del sonido. (Vorländer 2008).	9
Figura 2.2. Síntesis binaural. (Vorländer 2008).	11
Figura 3.1. Metodología propuesta para la caracterización de campo sonoro.	14
Figura 3.2. Secuencia de rayos acústicos detectados por el receptor para la construcción de la respuesta impulsiva.	16
Figura 3.3. Propagación de las ondas elásticas y polarización. (a) Onda longitudinal y (b) onda de corte. (Matta 2018).	22
Figura 3.4. Reflexión y transmisión del sonido para una onda plana de incidencia oblicua en un límite plano entre dos fluidos con impedancias características diferentes. Donde: z_1 es la impedancia característica del medio 1 y z_2 es la impedancia característica del medio 2.	30
Figura 3.5. Reflexión y refracción en una interfase fluido-sólido. c_1 es la velocidad del sonido en el fluido, c_T es la velocidad de onda de corte en el sólido y c_L es la velocidad de onda de compresión.	33
Figura 3.6. Un segmento de rayo en el plano h, r , y radio de curvatura R	40
Figura 3.7. Efectos del gradiente de velocidad del sonido g sobre la trayectoria de los rayos, para diferentes perfiles de velocidad en función de la profundidad: (a) $g = 0$, los rayos se propagan de forma recta para cada camino; (b) $g > 0$, los rayos son refractados hacia arriba; (c) $g < 0$, los rayos son refractados hacia abajo.	41
Figura 3.8. Subdivisión discreta de una columna de agua, donde el gradiente de velocidad de sonido es una constante para cada capa. Con: $c_1 < c_2 < c_3 < c_4$ y $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3 > \theta_4$	42
Figura 3.9. Principio del trazado de rayos, S=fuente, C=esfera de detección, s=reflexión especular, d=reflexión difusa. (Kuttruff 2009).	45
Figura 3.10. Diagrama de flujo de la secuencia del trazado de rayos. (Vorländer 2008).	46
Figura 3.11. Coordenadas polares para el trazado de rayos.	46
Figura 3.12. Generación de rayos uniformemente separados en ángulos de azimut y elevación, con: (a) $N = 4096$ rayos, (b) $N = 8192$ rayos y $r=1$	48
Figura 3.13. Detección de un rayo usando un receptor esférico, donde: $l < rd$, con l igual a la distancia perpendicular del rayo al centro de la esfera y rd igual al radio de la esfera.	48
Figura 3.14. Reflexión especular de un plano reflector.	49
Figura 3.15. Reflexión de una onda esférica sobre un plano reflector. (Vorländer 2008).	50
Figura 3.16. Geometría de una fuente imagen, cono y radio de detección rd	52
Figura 3.17. Fuentes imagen de primer y segundo orden. (Kuttruff 2009).	53

Figura 3.18. Construcción de una imagen fuente.	54
Figura 3.19. Composición de rayos acústicos para la construcción de la respuesta impulsiva: señal directa, reflexión especular y reflexiones difusas.	55
Figura 3.20. Diagrama esquemático de reflexión. (Kuttruff 2009).	58
Figura 3.21. Conversión de energía sonora reflejada de forma especular en difusa. (Vorländer 2008).	59
Figura 3.22. Energía reflejada desde una superficie rugosa con una parte especular y otra dispersa. (Vorländer 2008).	60
Figura 3.23. Reflexión especular sobre una superficie del agua con ondas de amplitud σh RMS, ángulo de incidencia θ_i y ángulo de reflexión especular θ_r	61
Figura 3.24. Dos vistas de la distribución de intensidad de Lambert, ángulo de incidencia ψ , ángulo de reflexión especular θ y elemento de área de la superficie dS . (Cox 2000).	62
Figura 3.25. Secuencia de convolución de auralización monoaural, con st como la señal de muestra de entrada, Sf la transformada de Fourier de st , $H(f)$ la respuesta impulsiva del recinto en el dominio de la frecuencia, y at la señal de salida siendo la transformada inversa de Fourier de Af , como resultado de la convolución entre Sf y $H(f)$	68
Figura 3.26. Recinto en forma de caja (paralelepípedo rectangular). (Hopkins 2007).	72
Figura 4.1. Dimensiones requeridas de la piscina para la ejecución de la rutina de nado sincronizado. (RFEN 2019).	79
Figura 4.2. Dimensiones de la piscina de nado sincronizado en la modalidad de rutinas. (MARCA 2016).	80
Figura 4.3. Diferentes modelos de altavoces subacuáticos o UWS (Under Water Speaker). (a) Altavoces del tipo portátil, (b) Altavoces del tipo empotrado. (Imágenes: LUBEL LAB'S [33], OCEANEARS [35], CLARKSYNTHESIS [34], KHZ TECHNOLOGIES [36]).	81
Figura 4.4. Instalación de altavoces UWS portátiles en una piscina de nado sincronizado. Fotografías de nado sincronizado (ISIDER, www.insider.com).	82
Figura 4.5. Instalación de altavoces UWS empotrado en la pared de la piscina. (CLARKSYNTHESIS, www.clarksynthesis.com).	82
Figura 4.6. Zona de ejecución de las rutinas de nado sincronizado. (MARCA 2016).	83
Figura 4.7. Algunas posiciones básicas en ejecución de rutinas de nado sincronizado. (a) Posición de la pierna de ballet en superficie (0.04m) y sumergida (0.6m), (b) posición de la grúa (0.8m y 1.05m), (c) posición encogida (0.24m y 0.5m), (d) posición carpa de espalda (0.95m y 0.12m). (Ilustración: MARCA 2016)	84
Figura 4.8. Variación de la velocidad del sonido para un gradiente de temperatura de $-0.666^\circ/\text{m}$ con una temperatura inicial de 28°C a 0m (en la superficie de la piscina) y una profundidad máxima de 3m (fondo de la piscina). (a) Velocidad del sonido versus profundidad, (b) Temperatura versus profundidad.	85

Figura 4.9. Ecuaciones y cálculo de refracción de rayos de sonido en una piscina de nado sincronizado para una gradiente de velocidad aproximada constante de $-1.69 s^{-1}$. Fuente ubicada a 1m de profundidad, profundidad máxima de piscina de 3m, pared lateral a 20m de distancia.	86
Figura 4.10. Patrón de haz e índices de directividad a diferentes frecuencias para un UWS con radio de disco de 100mm.	87
Figura 4.11. Patrón de haz e índices de directividad a diferentes frecuencias para un UWS con radio de disco de 140mm.	88
Figura 4.12. Esquema de reflexión y transmisión del sonido para una onda plana de incidencia oblicua en un límite plano de la interfase agua-aire.	90
Figura 4.13. (a) Coeficiente de reflexión de presión y (b) fase en función del ángulo de incidencia en la interfase agua-aire para una temperatura de 28°C. La fase tiene un valor constante de 180° (le da el signo negativo a la reflexión).	90
Figura 4.14. (a) Coeficiente de reflexión de intensidad de sonido y (b) absorción en la interfase agua-aire para una temperatura de 28°C. Se muestra valores despreciables de absorción. ...	91
Figura 4.15. Esquema de reflexión y transmisión del sonido para una onda plana de incidencia oblicua en un límite plano de la interfase aire-agua.	92
Figura 4.16. (a) Coeficiente de reflexión de presión y (b) fase en función del ángulo de incidencia en la interfase aire-agua para una temperatura de 28°C.	93
Figura 4.17. (a) Coeficiente de reflexión de intensidad de sonido y (b) absorción en la interfase aire-agua para una temperatura de 28°C. Se muestra valores despreciables de absorción. ...	94
Figura 4.18. Azulejo de porcelana para el revestimiento del vaso de la piscina de nado sincronizado.	95
Figura 4.19. Esquema de reflexión y transmisión del sonido para una onda plana de incidencia oblicua en un límite plano de una interfase agua-sólido.	97
Figura 4.20. (a) Coeficiente de reflexión de presión y (b) fase en función del ángulo de incidencia en las paredes de la piscina. Interfase agua-concreto.	97
Figura 4.21. (a) Coeficiente de reflexión de intensidad de sonido y (b) absorción en las paredes de la piscina (interfase agua-concreto) a diferentes ángulos de incidencia. Los resultados muestran a la interfase como una superficie absorbente para ángulos de incidencia menores 37.8°.	99
Figura 4.22. Distribución de energía sobre la superficie del agua con ondas de amplitud σh RMS, ángulo de incidencia θ_i y ángulo de reflexión especular θ_r . Donde α es el coeficiente de absorción de la interfase agua-aire y s es el coeficiente de dispersión en función del ángulo de incidencia θ_i	100
Figura 4.23. Coeficiente de dispersión en la superficie del agua (interfase agua-aire) para distintos valores de rugosidad, ángulos de incidencia y frecuencia.	101

Figura 4.24. Esquema de áreas del recinto subacuático para el cálculo del tiempo de reverberación.	102
Figura 4.25. Cálculo del tiempo de reverberación en bandas por octavas.....	103
Figura 4.26. Esquema de dimensiones del recinto subacuático.	105
Figura 5.1. Esquema general del software de simulación y síntesis de campos sonoros.	109
Figura 5.2. Casos de uso del sistema.....	110
Figura 5.3. Diagrama de clases relacionado a la clase “superficie” (superficie reflectora). ...	114
Figura 5.4. Diagrama de flujo del proceso de creación y edición de un archivo de configuración de proyecto (acp).	117
Figura 5.5. Diagrama de flujo del proceso edición y selección de elementos de simulación para el modelamiento del recinto.	118
Figura 5.6. Diagrama de flujo del proceso de generación y registro de las reflexiones.....	120
Figura 5.7. Diagrama de flujo del proceso de generación y registro de las reflexiones.....	121
Figura 5.8. Diagrama de flujo del proceso de exportación de parámetros acústicos a un archivo de reportes TDMS.....	122
Figura 5.9. Diagrama de flujo del proceso de exportación de la respuesta impulsiva a un archivo WAV.	123
Figura 5.10. Diagrama de flujo del proceso de simulación de frentes de onda y generación de archivo de vídeo AVI.....	124
Figura 5.11. Diagrama de flujo del proceso de auralización utilizando la respuesta impulsiva sintetizada y la muestra de audio en formato WAV.....	125
Figura 5.12. Diagrama de flujo de la extracción de datos preprocesados del patrón de radiación en función de la frecuencia, con la normalización de ángulos de elevación ϑ y azimut φ	126
Figura 5.13. Subdivisión de la superficie de reflexión difusa para la aplicación de la radiosidad utilizando celdas uniformes con el algoritmo de cubos en marcha [46].	127
Figura 5.14. Dieciséis (16) posibilidades para determinar el área de la celda (color rojo) utilizando el algoritmo de Cubos en Marcha.....	128
Figura 5.15. Diagrama de flujo del proceso de subdivisión de superficies reflectoras difusas.	128
Figura 5.16. Diagrama de flujo del proceso de trazado de rayos y registro de reflexiones especulares y difusas.....	131
Figura 5.17. Diagrama de flujo del proceso de detección de superficie de impacto de rayo.	132
Figura 5.18. Esquema del proceso de descarte y selección de la superficie de impacto del rayo. El rayo impacta en tres superficies (S_1, S_2, S_3). El punto de impacto está dentro del área de cada superficie (dentro de cada polígono). El rayo debe impactar en sentido opuesto del vector normal n de cada superficie. Se toma la distancia rn más corta recorrida por el rayo.	133

Figura 5.19. Esquema del proceso de detección del rayo cónico por los receptores. F es la fuente, FI la fuente imagen. La posición del receptor $R2$ cumple con los requisitos de detección del rayo.....	133
Figura 5.20. Diagrama de flujo del proceso de detección de superficie de impacto de rayo. rd es el radio del cono a la distancia máxima de simulación r_{max}	134
Figura 5.21. Esquema del proceso de propagación del rayo acústico para la simulación de frentes de onda. El vector unitario u cambia de dirección con cada reflexión especular. Se calcula el avance del rayo cada Δr hasta una distancia máxima $c.t_{max}$. En el punto de reflexión se calculan los valores a y b	135
Figura 5.22. Diagrama de flujo del proceso de generación de frentes de onda.	136
Figura 5.23. Algoritmo para el cálculo de la respuesta impulsiva del recinto.	137
Figura 5.24. Filtrado FIR lineal mediante el método de solapamiento y almacenamiento. (Proakis, 2007).	138
Figura 5.25. Estructura del proyecto del software denominado "AURASONIC" desarrollado para la simulación y síntesis de señales de audio bajo el agua en una piscina de competencias de nado sincronizado.	139
Figura 5.26. Diagrama de jerarquía de clases del sistema.	139
Figura 5.27. Interfaz de inicio del software "AURASONIC".	140
Figura 5.28. Interfaz de configuración de proyecto.....	141
Figura 5.29. Interfaz de configuración de parámetros de impedancias.	142
Figura 5.30. Interfaz de configuración del escenario. Selección de elementos de simulación.	143
Figura 5.31. Interfaz de generación de reflexiones y visualización de rayos.	144
Figura 5.32. Interfaz de generación de reportes de parámetros acústicos.	145
Figura 5.33. Interfaz de generación de respuesta impulsiva del recinto.	146
Figura 5.34. Interfaz de simulación de generación de frente de onda.....	147
Figura 5.35. Interfaz de auralización. Audio resultante de la convolución de la respuesta impulsiva sintetizada y un archivo de audio en tiempo real.	148
Figura 6.1. Selección de puntos de audición identificados por letras en la zona de ejecución de nado sincronizado.	151
Figura 6.2. Distribución temporal de las reflexiones en el punto A.....	153
Figura 6.3. Respuesta de impulso integrado en el punto A.	153
Figura 6.4. Respuesta en frecuencia en el punto A.....	154
Figura 6.5. Respuesta impulsiva en el punto A.	154
Figura 6.6. Distribución temporal de las reflexiones en el punto E.....	155
Figura 6.7. Respuesta de impulso integrado en el punto E.	155
Figura 6.8. Respuesta en frecuencia en el punto E.....	156

Figura 6.9. Respuesta impulsiva en el punto E.	156
Figura 6.10. Distribución temporal de las reflexiones en el punto M.	157
Figura 6.11. Respuesta de impulso integrado en el punto M.	157
Figura 6.12. Respuesta en frecuencia en el punto M.	158
Figura 6.13. Respuesta impulsiva en el punto M.	158
Figura 6.14. Análisis de la respuesta impulsiva en el punto E con el software Dirac[45].	160
Figura 6.15. Simulación del frente de onda generado por la fuente de sonido.	161
Figura 7.1. Análisis competitivo del software “AURASONIC” en el mercado, utilizando las cinco fuerzas de Porter [47].	165
Figura 7.2. a) Utilidad neta de comercialización del software de simulación, b) flujo de caja proyectado.	169
Figura 8.1. Desarrollo del módulo “Controlado.vi” con una estructura tipo productor-consumidor con eventos.	191
Figura 8.2. Desarrollo del módulo “Procesador Reflexiones.vi”.	192
Figura 8.3. Desarrollo del método “Verificar impacto de rayo.vi” en la clase “Superficie”.	192
Figura 8.4. Desarrollo del módulo “Generador Reportes.vi”.	193
Figura 8.5. Desarrollo del método “Calcular patrón.vi” en la clase “Haz”.	193
Figura 8.6. Desarrollo del módulo “Procesador Reflexiones.vi”.	194
Figura 8.7. Desarrollo del método “Detectar rayo.vi” en la clase “Receptor”.	194
Figura 8.8. Desarrollo del módulo “Auralizador.vi”.	195
Figura 8.9. Distribución temporal de las reflexiones en el punto B.	198
Figura 8.10. Respuesta de impulso integrado en el punto B.	198
Figura 8.11. Respuesta en frecuencia en el punto B.	199
Figura 8.12. Respuesta impulsiva en el punto B.	199
Figura 8.13. Distribución temporal de las reflexiones en el punto C.	200
Figura 8.14. Respuesta de impulso integrado en el punto C.	200
Figura 8.15. Respuesta en frecuencia en el punto C.	201
Figura 8.16. Respuesta impulsiva en el punto C.	201
Figura 8.17. Distribución temporal de las reflexiones en el punto D.	202
Figura 8.18. Respuesta de impulso integrado en el punto D.	202
Figura 8.19. Respuesta en frecuencia en el punto D.	203
Figura 8.20. Respuesta impulsiva en el punto D.	203
Figura 8.21. Distribución temporal de las reflexiones en el punto F.	204
Figura 8.22. Respuesta de impulso integrado en el punto F.	204
Figura 8.23. Respuesta en frecuencia en el punto F.	205
Figura 8.24. Respuesta impulsiva en el punto F.	205
Figura 8.25. Distribución temporal de las reflexiones en el punto G.	206

Figura 8.26. Respuesta de impulso integrado en el punto G.	206
Figura 8.27. Respuesta en frecuencia en el punto G.	207
Figura 8.28. Respuesta impulsiva en el punto G.	207
Figura 8.29. Distribución temporal de las reflexiones en el punto H.	208
Figura 8.30. Respuesta de impulso integrado en el punto H.....	208
Figura 8.31. Respuesta en frecuencia en el punto H.....	209
Figura 8.32. Respuesta impulsiva en el punto H.	209
Figura 8.33. Distribución temporal de las reflexiones en el punto I.	210
Figura 8.34. Respuesta de impulso integrado en el punto I.	210
Figura 8.35. Respuesta en frecuencia en el punto I.	211
Figura 8.36. Respuesta impulsiva en el punto I.	211
Figura 8.37. Distribución temporal de las reflexiones en el punto J.	212
Figura 8.38. Respuesta de impulso integrado en el punto J.	212
Figura 8.39. Respuesta en frecuencia en el punto J.	213
Figura 8.40. Respuesta impulsiva en el punto J.	213
Figura 8.41. Distribución temporal de las reflexiones en el punto K.....	214
Figura 8.42. Respuesta de impulso integrado en el punto K.....	214
Figura 8.43. Respuesta en frecuencia en el punto K.....	215
Figura 8.44. Respuesta impulsiva en el punto K.	215
Figura 8.45. Distribución temporal de las reflexiones en el punto L.	216
Figura 8.46. Respuesta de impulso integrado en el punto L.	216
Figura 8.47. Respuesta en frecuencia en el punto L.	217
Figura 8.48. Respuesta impulsiva en el punto L.....	217

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El nado sincronizado es una disciplina deportiva que combina la natación, gimnasia y danza rítmica; esta disciplina puede realizarse en solo o en equipos de personas, realizando movimientos elaborados y sincronizados al ritmo de la música. El sonido que perciben los deportistas proviene de dos fuentes: de la superficie, siendo el aire el medio de propagación de este; y de debajo del agua, donde el sonido se propaga utilizando este otro medio.

En la etapa de entrenamiento, la buena comunicación entre los deportistas y el instructor es de suma importancia para la ejecución adecuada de las rutinas; cuanto más en la etapa de competición, donde la música es parte integral de la ejecución de este deporte. Todo esto implica la necesidad imperativa del adecuado acondicionamiento acústico tanto fuera como dentro del volumen subacuático, debiendo entenderse como volumen subacuático: aquel correspondiente al interior de la piscina de competición. Sin embargo, hoy en día no se cuenta con información técnica relacionada al acondicionamiento acústico de este volumen subacuático, así como de alguna norma que lo regule; lo que sugiere: que existe muy poca investigación relacionada a este caso práctico en el campo de la acústica.

Existen diferentes métodos y técnicas para determinar el comportamiento de los campos sonoros en volúmenes cerrados (recintos), aplicados extensamente en la acústica arquitectónica; es decir, los métodos pueden combinar el uso de instrumentos y técnicas de medición, utilizar analíticamente modelos

matemáticos y físicos en el proceso de predicción y estimación de parámetros, desarrollar modelos a escala para realizar mediciones y observaciones de manera controlada desde un laboratorio, o implementar técnicas de simulación basados en cálculo por computador. Aunque, este último ha ido desplazando a muchas de las técnicas convencionales antes mencionadas: por la velocidad de implementación, el nivel de precisión en la predicción de los fenómenos físicos, y costo de desarrollo. En la acústica subacuática, también se han desarrollado técnicas y métodos para el estudio y predicción de los campos sonoros; pero, más orientados a: comunicaciones subacuáticas, aplicaciones navales de localización, prueba de transductores, estudio y exploración del lecho marino, y vida natural.

El presente trabajo de tesis propone abordar el estudio del comportamiento de los campos sonoros dentro de un volumen subacuático (definido ahora como recinto o recinto subacuático), particularmente de una piscina de competencias de nado sincronizado; utilizando teorías y modelos matemáticos, apoyado por técnicas de simulación y síntesis de señales de audio por computador. Por tanto, se abarca un nuevo campo del conocimiento, justificado por la búsqueda de información para la mejora constante en el desarrollo humano, sentando las bases para un nuevo estudio y ampliando los casos de aplicación en la acústica.

1.1. Hipótesis

Se plantean las siguientes hipótesis:

- El comportamiento del campo sonoro dentro de una piscina de competencia de nado sincronizado puede ser modelado, y simulado utilizando las técnicas de trazado de rayos acústicos, fuentes imágenes y radiosidad.
- Los efectos de las reflexiones del campo sonoro en el interior de la piscina de nado sincronizado son predichos utilizando los modelos matemáticos de la acústica arquitectónica, tales como: el tiempo

reverberación, frecuencia de Schroeder, modos locales e inteligibilidad de la palabra.

- El movimiento de los deportistas en el límite del agua y el aire va a provocar la formación de olas y/o texturas en la interfase agua-aire; como consecuencia, se van a generar muchas reflexiones difusas en el campo sonoro a altas frecuencias.
- Debido a que existe poca diferencia entre los valores de impedancia características del agua y las paredes de la piscina, es de esperar que exista una gran transmisión de energía acústica a través de las paredes por relación de impedancias.

1.2. Objetivo General

Caracterizar la acústica de los campos sonoros que se producen en espacios subacuáticos como el interior de una piscina de competencias para nado sincronizado; desarrollando las teorías y modelos matemáticos que permitan hacerlo, basado en las técnicas de trazado de rayos acústicos, imágenes y radiosidad, para la síntesis y simulación.

1.3. Objetivos Específicos

- Desarrollar los modelos matemáticos y algoritmos de simulación de los campos sonoros al interior de la piscina de competencias.
- Caracterización acústica de los elementos que conforman los límites del interior de la piscina de competencias.
- Sintetizar las señales del audio en espacios subacuáticos determinados utilizando las técnicas de trazados de rayos acústicos, imágenes y radiosidad.
- Calcular la respuesta impulsiva en puntos específicos del recinto (volumen subacuático).

- Desarrollar una herramienta de auralización, que permita entender el comportamiento de los campos sonoros dentro de un volumen subacuático determinado.
- Desarrollar una herramienta de simulación de frentes de onda de sonido, para comprender su comportamiento en un volumen subacuático determinado.
- Caracterizar la acústica subacuática del volumen interior de una piscina de nado sincronizado, con métricas y parámetros convencionales utilizados en la especialidad de acústica arquitectónica como son: el tiempo de reverberación, frecuencia de Schroeder, modos locales e inteligibilidad de la palabra.

1.4. Alcances

Se desarrollarán herramientas de simulación y síntesis del campo sonoro, así como la generación de la respuesta impulsiva del recinto, el cual pueda luego ser utilizada por herramientas de software normalmente aplicadas en la especialidad de acústica arquitectónica; de manera que los resultados de caracterización puedan ser hechos con parámetros y métricas que tengan referencias comparativas útiles.

La investigación se enfocará al estudio del campo sonoro al interior de una piscina de nado sincronizado. Por lo tanto, no se considerarán los campos sonoros producidos en el aire ni el sonido transmitido a través de las paredes.

En el proceso de simulación y síntesis del campo sonoro se aplicarán: efectos de reflexión difusa, reflexión especular, absorción en los límites del recinto, absorción del medio de propagación, coeficiente de dispersión y patrón de haz de la fuente de sonido. En el proceso de síntesis no se incluirán los efectos de difracción y refracción al interior de la piscina, los cuales están limitados por la técnica trazado de rayos y fuentes imágenes a emplear. Sin embargo, se

desarrollará un análisis de los efectos de refracción del sonido en el agua en el proceso de propagación de los rayos.

En los modelos de simulación se considerará la respuesta en frecuencia (magnitud y fase) de los elementos acústicos, así como su dependencia angular (ejemplo: ángulo de incidencia).

Los datos obtenidos en el análisis final del trabajo de investigación serán el resultado de simulaciones y síntesis del campo sonoro basados en modelos matemáticos, lo que ofrecerá un punto de vista académico a futuros estudios y desarrollo de aplicaciones prácticas en el proceso de acondicionamiento acústico del recinto para un entorno subacuático.

1.5. Metodología

Con el objetivo de investigar el entorno acústico subacuático en el interior de la piscina de nado sincronizado se desarrollarán las siguientes actividades y procedimientos:

- Estudio del estado del arte del tema.
- Selección e implementación los modelos matemáticos para sintetizar campos sonoros en un volumen subacuático determinado.
- Determinación analítica el espacio acústico de una piscina de competencia de nado sincronizado, sus elementos y características particulares [27].
- Desarrollo de algoritmos de procesamiento de datos adecuados a la física del sonido subacuático
- Desarrollo de herramientas de software de síntesis y auralización de señales acústicas subacuáticas.
- Caracterización de los campos sonoros del volumen subacuático en estudio, adaptación de las señales sintetizadas a formatos de softwares comerciales convencionales utilizados en acústica arquitectónica.

- Presentación de las conclusiones y recomendaciones del trabajo de investigación, bibliografías y referencias.

El desarrollo de la investigación tendrá un enfoque cuantitativo, analizando los resultados de los datos simulados, y comparándolos con métricas de uso en el campo de la acústica arquitectónica.

1.6. Disposición y Desarrollo del Estudio por Capítulos

El estudio está desarrollado y distribuido en nueve capítulos que se detallan a continuación.

En el primer capítulo se presenta la introducción al tema de investigación, donde se muestran las hipótesis, objetivos y alcances, así como la metodología a emplear en su desarrollo.

En el segundo capítulo se hace una introducción al estado del arte mostrando las diferentes técnicas de simulación y síntesis del campo sonoro generadas por ordenador, para la caracterización de los espacios acústicos.

En el tercer capítulo se describe el método empleado para la caracterización de los campos sonoros en la piscina de nado sincronizado; utilizando las técnicas de trazado de rayos, imágenes y radiosidad. Así como la selección de los modelos matemáticos para el análisis y desarrollo de algoritmos de simulación del subespacio subacuático.

En el cuarto capítulo se hace una descripción analítica del espacio acústico de la piscina de competencias, mostrando sus elementos y características particulares.

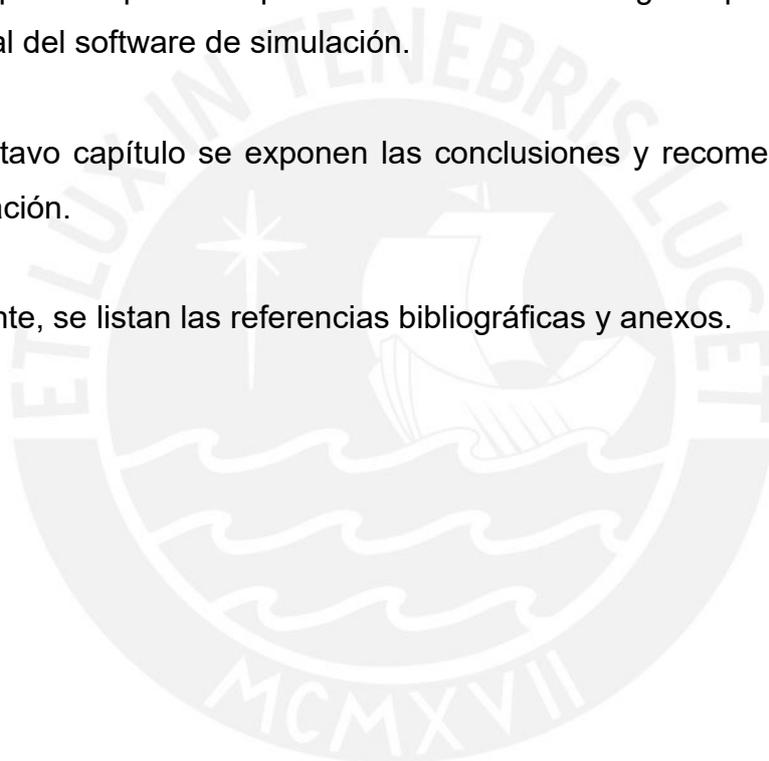
En el quinto capítulo se desarrolla el software de simulación para la obtención de los parámetros acústicos.

En el sexto capítulo se muestran y discuten los resultados obtenidos del proceso de caracterización de los campos sonoros utilizando el software de simulación desarrollado para el caso de aplicación.

En el séptimo capítulo se presenta el modelo de negocio para la explotación comercial del software de simulación.

En el octavo capítulo se exponen las conclusiones y recomendaciones de la investigación.

Finalmente, se listan las referencias bibliográficas y anexos.



CAPÍTULO 2

TÉCNICAS DE SIMULACIÓN Y SINTESIS DE LOS CAMPOS SONOROS EN ESPACIOS CERRADOS

2.1. Introducción

En el presente texto se hace una revisión de las diferentes técnicas desarrolladas para la simulación de la acústica de recintos (o espacios cerrados) por medio de un ordenador, que son utilizadas actualmente en la industria en el proceso de síntesis de la respuesta impulsiva de un recinto, auralización y caracterización acústica.

2.2. Estado del Arte

El uso de computadores a acelerado enormemente el proceso de pruebas y análisis de datos en el campo de la ciencia e ingeniería a través de la simulación. En la acústica se han desarrollado diferentes técnicas de simulación basados en el modelamiento de la propagación del sonido: algoritmos basados en ondas, acústica geométrica y métodos artificiales; como lo resume Vorländer [1] en la Figura 2.1.

La acústica de recintos puede ser caracterizada completamente a través de la respuesta impulsiva según lo expresado por Kuttruff [2], considerando al espacio acústico como un sistema LTI (Linear Time-Invariant). En ese sentido, la acústica geométrica ofrece un camino para la obtención de la respuesta impulsiva del recinto, a través de métodos estocásticos utilizando trazado de rayos acústicos, o deterministas con el modelo de imágenes fuente y trazado

de haz. El software ODEON [3] basa su sistema de síntesis del campo sonoro utilizando un modelo híbrido entre trazado de rayos acústicos y fuentes imágenes, con un proceso de dispersión estocástica de reflexiones difusas utilizando fuentes secundarias; una parte del rayo es reflejado especularmente y otra de forma difusa utilizando la ley de Lambert aplicando métodos de radiosidad como lo presenta Kuttruff [2].

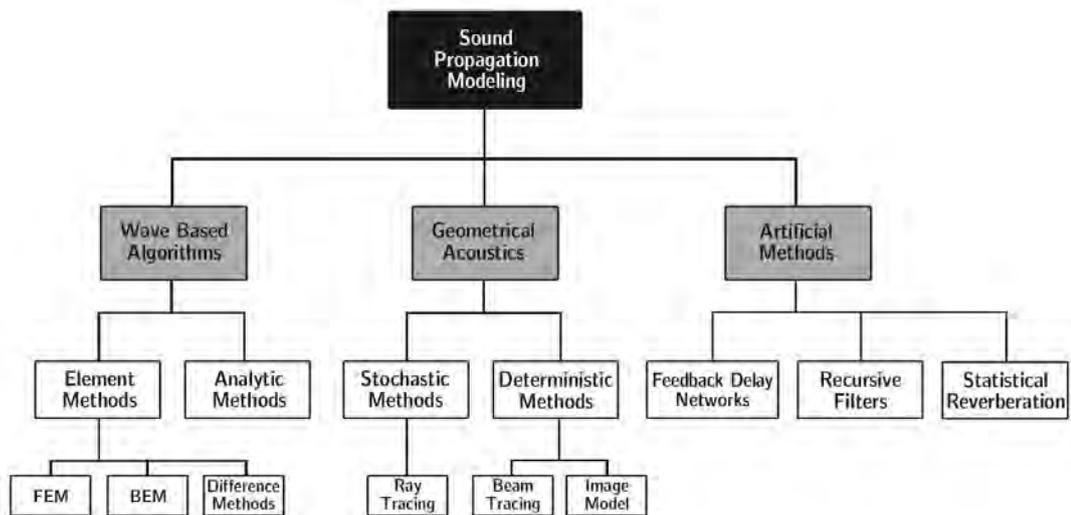


Figura 2.1. Clasificación de modelos para la simulación de la propagación del sonido. (Vorländer 2008).

Los modelos híbridos (rayos y fuentes imágenes) son utilizados en conjunto para sacar los mejores beneficios de ambas técnicas (Vorländer 2008), por un lado, las imágenes fuente pueden generar una gran resolución de la respuesta impulsiva en función del tiempo y frecuencia, pero a un costo computacional muy alto para recintos de formas y detalles complejos; por otro lado, el trazado de rayos acústicos supera esta dificultad, pero con muy poca resolución. El trazado de rayos pasa por un proceso de optimización como es el caso de CATT-Acoustic [4], utilizando rayos cónicos. “Este proceso ayuda a evitar la superposición energética de rayos, asegurándose que la contribución de las fuentes imagen se den sólo una vez” (Vorländer 2008).

Otro aspecto importante utilizando rayos acústicos es el modelamiento y simulación de reflexiones difusas. El software CATT-Acoustic [4] genera reflexiones difusas deterministas de primer orden, utilizando la ley de Lambert con una reflexión difusa ideal y principios de radiosidad como lo muestran Kuttruff [2] y Cox [5]. Por otro lado, Hoven [6] modela las reflexiones en la superficie del agua (interfase agua-aire) utilizando el valor RMS de la rugosidad de las olas que generan dispersión superficial, para presentar un modelo analítico del coeficiente de reflexión, el cual está basado en un modelo de reflexión superficial desarrollado por Kinsler [7].

Las reflexiones en una interfase agua-sólido pueden ser determinadas utilizando el coeficiente de reflexión calculado analíticamente con las matrices de transferencia presentadas por B.A. Auld [8][9] y Rose [10], definiendo el segundo medio de propagación del sonido como: sólido elástico, sólido poroso, isotrópico, anisotrópico, etc. En todos los casos los modelos consideran ondas mecánicas, que se propagan en el segundo medio, de corte y compresión, como es el caso del modelo de Biot (según Matta [11]) representando a sólidos porosos, el cual incluye una tercera onda de compresión que se propaga a través de los poros del material.

En el proceso de simulación se considera la auralización, que es: “la técnica de creación y reproducción de sonido basado en datos de ordenador” como lo define Vorländer [1], esta es conseguida a partir de la medición o síntesis de la respuesta impulsiva y el proceso de convolución en el dominio del tiempo (procesamiento discreto) o la frecuencia (utilizando la FFT), con un audio de prueba generalmente registrado en cámaras secas o anecoicas [1], y guardado en un archivo en formato WAV (Waveform Audio File Format). “La auralización modela y simula la experiencia de fenómenos acústicos renderizados como un campo sonoro en un espacio virtualizado” (Wikipedia 2021).

Existen otras técnicas de auralización para aplicaciones de tiempo real, en las cuales, se tiene un registro tridimensional de parámetros pre-calculados para la generación dinámica de la respuesta impulsiva en función del movimiento recorrido por el oyente, y/o la fuente en un espacio de simulación generando una auralización interactiva. La auralización es procesada generalmente por una síntesis binaural emulando la escucha humana como se muestra en la Figura 2.2 utilizando filtros estéreo HRTF (Head-Related Transfer Functions) [1].

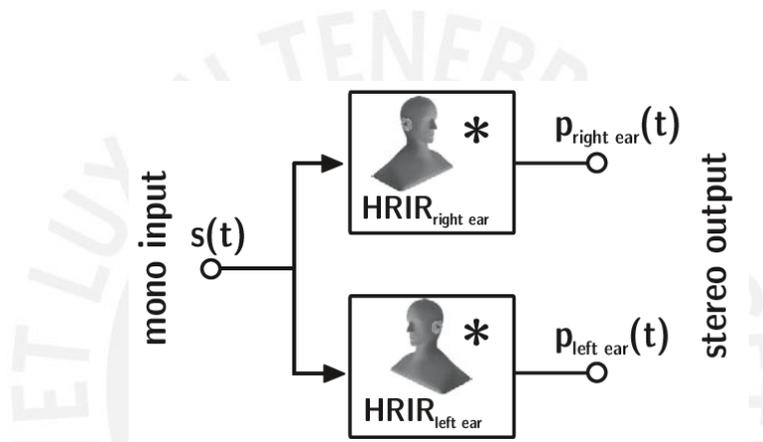


Figura 2.2. Síntesis binaural. (Vorländer 2008).

Otras técnicas de simulación basados en métodos de elementos finitos (FEM) o método del elemento de contorno (BEM) explotan el cálculo numérico para dar solución a la ecuación de Helmholtz haciendo una discretización del medio de propagación con el principio de conservación de la energía, y del contorno en pequeños elementos relacionándolos a la función de Green.

Las técnicas para modelar el campo sonoro en recintos, que utiliza el modelo de rayos acústicos, sufre de limitaciones a bajas frecuencias delimitadas por la frecuencia de Schroeder, como lo muestra Kinsler [7] desarrollando la ecuación eikonal, pero es suficiente para caracterizar muchos parámetros acústicos en recintos según lo expresado por Kuttruff [2]. Otra desventaja del trazado de rayos y fuentes imágenes es la simulación de efectos de difracción, estas se

logran con mucha precisión utilizando técnicas como FEM o BEM, sin embargo, es posible hacer aproximaciones.

Los paquetes de software especializados como ODEON y CATT-Acoustic predicen y simulan el comportamiento de los campos sonoros de recintos utilizando las técnicas de rayos acústicos, fuentes imágenes y radiosidad, pero orientados a la propagación del sonido en el aire. Este aspecto hace que sea imprescindible el desarrollo de un software que considere la propagación del sonido en el agua, y utilice modelos matemáticos relacionados a la absorción, difusión y reflexión en condiciones de contorno apropiados.



CAPÍTULO 3

CARACTERIZACIÓN DEL CAMPO SONORO UTILIZANDO LAS TÉCNICAS DE TRAZADO DE RAYOS, FUENTES IMÁGENES Y RADIOSIDAD

3.1. Introducción

En el presente capítulo se hace una descripción del método de caracterización del campo sonoro a través de la síntesis de la respuesta impulsiva de un recinto, utilizando para ello las técnicas de trazado de rayos acústicos, fuentes imágenes, radiosidad y basados en el cálculo por ordenador. Del mismo modo se deducen los modelos matemáticos y algoritmos que serán empleados en el cálculo previo de parámetros acústicos del recinto, y en el desarrollo del software de simulación propuesto; de esta manera, utilizarlos en el proceso de caracterización los campos sonoros al interior una piscina de nado sincronizado.

3.2. Descripción General del Método

El desarrollo de la tesis se considera un método de simulación (utilizando un programa de ordenador) híbrido y determinista basado en el trazado de rayos acústicos, detección de fuentes imágenes y cálculo de radiosidad, permitiendo calcular la respuesta impulsiva sintetizada del recinto. Para este método se utilizan modelos matemáticos y elementos acústicos relacionados al medio de propagación como es el agua, y de esta manera, poder calcular y caracterizar el campo sonoro en espacios cerrados subacuáticos.

Para la ampliación del método es importante definir y describir todos los elementos acústicos de simulación de forma muy abstracta, preservando información específica de sus propiedades acústicas como puede ser: el patrón de radiación, radiosidad, coeficiente de reflexión, entre otros parámetros; así como definir sus dimensiones, ubicación espacial, orientación, etc. Luego de definir estos elementos, es importante definir los parámetros de simulación para un escenario específico, como pueden ser: el tiempo de simulación, número de rayos acústicos a generar por la fuente de sonido, medio de propagación del sonido, etc.

Una vez definido los elementos acústicos y la configuración general para la simulación, es posible aplicar las técnicas de trazado de rayos acústicos y fuentes imágenes; lo cual permitirá predecir y calcular las reflexiones de un espacio acústico en específico, calcular la respuesta impulsiva y finalmente calcular los parámetros para caracterizar la acústica del recinto. La Figura 3.1 muestra un esquema general de aplicación del método propuesto.

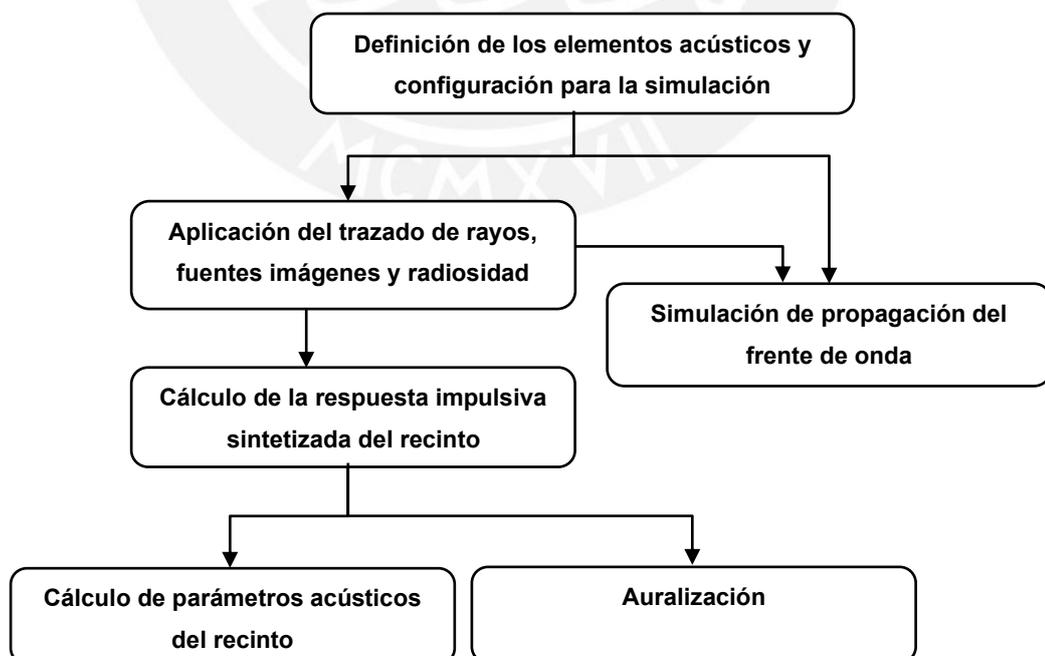


Figura 3.1. Metodología propuesta para la caracterización de campo sonoro.

La técnica de trazado de rayos acústicos es utilizada para determinar que fuentes imágenes son audibles por los receptores, ya que en la trayectoria de los rayos hacia el receptor pueden existir obstáculos que eviten que ciertas fuentes no sean “escuchadas” por el receptor. Este proceso se deriva de las técnicas desarrolladas en la acústica geométrica y se detalla en las secciones siguientes. Por otro lado, las fuentes imágenes son utilizadas para hacer un cálculo determinístico de la cantidad de energía acústica que llega al receptor. Combinando estos dos métodos se logra obtener una secuencia de reflexiones tanto difusas como de origen especular, permitiendo luego, calcular la respuesta impulsiva del recinto en el dominio de la frecuencia en su forma compleja con información de magnitud y fase.

La respuesta impulsiva del recinto, en el dominio de la frecuencia, se consigue en dos fases de procesamiento: una para la detección de reflexiones especulares y difusas que llegan al receptor; y otra para el cálculo del espectro de las reflexiones resultantes como funciones complejas (con información de magnitud y fase).

En la primera fase se procesan las reflexiones por cada banda de frecuencia separadas en octavas, se realiza el trazado de rayos utilizando rayos cónicos y se aplica el filtro de datos históricos de superficies impacto de las reflexiones. Estos últimos dos procesos garantizan que los rayos del mismo orden y secuencia de reflexión, que se dan en distintas superficies, impacten una sola vez en el receptor, asegurando que la formación de fuentes imágenes aporten energía en una sola ocasión [1]. En el proceso, las reflexiones son divididas en reflexiones especulares y difusas utilizando la ley de Lambert y radiosidad. Las reflexiones difusas solo se dan de primer orden, mientras que las reflexiones especulares seguirán aumentando de orden hasta alcanzar el tiempo máximo de simulación o nivel mínimo de energía resultante de acuerdo con la configuración de la simulación.

En la segunda fase se calcula el espectro de las reflexiones resultantes registradas en la primera fase de procesamiento, utilizando bandas de frecuencia discretas linealmente distribuidas, donde se adiciona la información del patrón de radiación de la fuente, factor de reflexión de las superficies, difusión, absorción del medio y pérdidas por propagación. Las reflexiones (ahora en su forma compleja) son sumadas para el cálculo de la respuesta impulsiva del recinto en el dominio de la frecuencia, luego convertida al dominio del tiempo utilizando la transformada inversa de Fourier. Entonces, la respuesta impulsiva en el dominio de frecuencia es calculada utilizando los aportes del rayo acústico directo emitido por la fuente al receptor, las reflexiones especulares y reflexiones difusas resultantes, como se representa en la Figura 3.2.

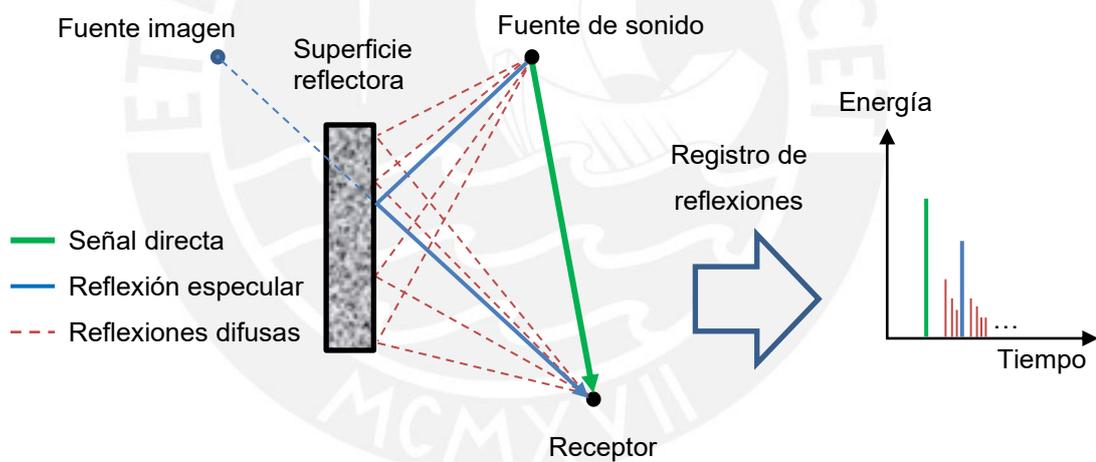


Figura 3.2. Secuencia de rayos acústicos detectados por el receptor para la construcción de la respuesta impulsiva.

Una vez calculada la respuesta impulsiva del recinto, será posible calcular parámetros que permitan caracterizar la acústica del espacio subacuático, utilizando parámetros como la inteligibilidad de la palabra, tiempo de decaimiento energético, entre otros.

Del mismo modo, puede utilizarse la respuesta impulsiva sintetizada para el proceso de auralización, utilizando un audio de referencia y aplicando la técnica de convolución en tiempo o en frecuencia.

La simulación de frentes de onda parte de la técnica de trazado de rayos, pero utilizando tramos recorridos por la onda de sonido definidos (en función del tiempo), permitiendo generar secuencias gráficas de cómo se propaga un frente de onda desde una fuente de sonido específica y visualizar de forma gráfica como se producen las reflexiones.

Por lo tanto, la caracterización del campo sonoro del interior de la piscina de nado sincronizado se da a través del cálculo de la respuesta impulsiva sintetizada del recinto, simulación de la propagación de frentes de onda y del proceso de auralización.

A continuación, se hace una descripción de los conceptos físicos y herramientas matemáticas involucradas en el análisis de los campos sonoros, acústica de recintos y algoritmos de simulación del método propuesto, partiendo de definiciones generales y luego enfocados a un subespacio subacuático de aplicación.

3.3. Propagación del Sonido

En el presente apartado se define al sonido y las ecuaciones que describen su comportamiento según el medio de propagación como puede ser el agua, aire o sólidos, los cuales definirán su velocidad, reflexión, absorción entre otros parámetros. La definición de las ecuaciones del sonido será el punto de partida para desarrollar los modelos matemáticos que describirán al campo sonoro en el proceso de simulación del espacio acústico.

El sonido es una perturbación (onda mecánica) que se propaga en un medio elástico (material elástico) que puede ser gaseoso, líquido o sólido provocando una alteración de presión o un desplazamiento de las partículas del material la cual puede ser detectada por el oído humano o por instrumentos (de acuerdo con lo descrito por Beranek[15]).

En fluidos como el aire o el agua [7] el sonido se propaga en ondas de compresión como ondas longitudinales, en los sólidos las ondas pueden ser de compresión y de corte. A su vez, la onda de sonido puede experimentar diferentes efectos físicos en su propagación como: absorción, transmisión, reflexión, refracción, difusión y difracción.

Para el sonido se consideran dos medios de propagación: fluidos y sólidos. Los fluidos representan a los medios de propagación tales como el aire y el agua, mientras que los sólidos representan a las paredes que limitan el espacio subacuático.

La velocidad de propagación del sonido dependerá de las características del medio y de su condición (por ejemplo: presión, temperatura, humedad, densidad, etc.).

3.3.1.Ecuaciones del Sonido en Fluidos

Los campos sonoros en fluidos como el agua y el aire pueden ser representados de forma simplificada por la superposición de ondas planas [2] o esféricas. Para una onda que viaja libremente en un medio se tendrán las siguientes ecuaciones lineales [7]:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3.2)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \quad (3.3)$$

Donde:

p es la presión acústica.

c es la velocidad termodinámica del sonido del fluido.

t es el tiempo.

∇^2 es el operador laplaciano para coordenadas rectangulares en la ecuación (3.2) y (3.3) para coordenadas esféricas con simetría esférica [15] (de igual radiación en todas las direcciones).

r como el radio de la esfera.

Una solución armónica para una onda plana que viaja en el espacio libre sin pérdidas en dirección del eje x se puede escribir como [7]:

$$p(x, t) = p_0 e^{j(\omega t - kx)} \quad (3.4)$$

$$\omega = kc = 2\pi f \quad (3.5)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.6)$$

Donde:

p_0 es la amplitud de la presión o valor inicial de magnitud.

ω es la frecuencia angular.

k es el número de onda.

f es la frecuencia.

λ es la longitud de onda.

Del mismo modo para una onda armónica esférica que viaja en el espacio libre en dirección del r puede ser representada como [7]:

$$p(r, t) = \frac{p_0 e^{j(\omega t - kr)}}{r} \quad (3.7)$$

La ecuación (3.7) constituye la base para la construcción de fuentes imágenes que irradian ondas esféricas de sonido.

3.3.2. Ecuaciones del Sonido en Sólidos

“La propagación del sonido en los sólidos es más compleja que en los fluidos debido a que el cuerpo sólido no sólo intenta mantener su volumen sino también su forma, esto resulta en una gran variedad de formas de ondas” (Rose 2014). En particular, en el interior de un sólido de dimensiones más grandes que la longitud de onda como lo describe B.A. Auld [8], pueden propagarse al mismo tiempo: ondas longitudinales y ondas transversales; denominadas ondas de compresión y de corte [7], respectivamente.

A continuación, se describe la ecuación de onda en un sólido elástico (sin pérdidas), homogéneo e isotrópico (sus propiedades físicas no dependen de la dirección, de acuerdo con lo descrito por Vigram[13]).

Ecuación de Onda en un Sólido Elástico Isotrópico

La ecuación de onda que describe el desplazamiento de una partícula en un sólido elástico isotrópico puede ser representada como [11]:

$$(\lambda + \mu)\nabla(\nabla \cdot \vec{s}) + \mu\nabla^2 \vec{s} = \rho \frac{\partial^2 \vec{s}}{\partial t^2} \quad (3.8)$$

Donde:

\vec{s} representa el vector de desplazamiento de una partícula en un medio elástico [8].

∇ es el operador gradiente.

$\nabla \cdot$ es el operador divergente.

λ y μ son las constantes elásticas de Lamé [1], con μ denominado el módulo de corte del material.

t es el tiempo.

ρ es la densidad del material.

El vector \vec{s} puede ser descompuesto por una función escalar ϕ y una función vectorial $\vec{\psi}$ llamados potenciales de desplazamiento [14], como:

$$\vec{s} = \nabla\phi + \nabla \times \vec{\psi} \quad (3.9)$$

Reemplazando la ecuación (3.9) en la ecuación (3.8) y utilizando la descomposición de Helmholtz [11] se obtendrá dos ecuaciones desacopladas de la forma:

$$(\lambda + 2\mu)\nabla^2\phi = \rho \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} \quad (3.10)$$

$$\lambda\nabla^2\vec{\psi} = \rho \frac{\partial^2\vec{\psi}}{\partial t^2} \quad (3.11)$$

La ecuación (3.10) representa a la ecuación de una onda elástica de compresión. Para una onda plana de estado estable que viaja en dirección del eje x se tendrá una solución para el potencial ϕ , como:

$$\phi(x, t) = \phi_0 e^{j(\omega t - k_L x)} \quad (3.12)$$

Del mismo modo utilizando la ecuación (3.11) que representa la ecuación de onda elástica de corte. Una solución para el vector potencial $\vec{\psi}$ estará dada por:

$$\vec{\psi}(x, t) = \vec{\psi}_0 e^{j(\omega t - k_T x)} \quad (3.13)$$

Donde:

k_L y k_T son los números de onda correspondientes a la onda de compresión (longitudinal) y de corte (transversal).

“La onda longitudinal estará polarizada en la dirección de propagación, en el sentido en la que se mueven las partículas; mientras que la onda de corte tendrá la polarización en dirección ortogonal a la dirección en el que viaja la onda, donde las partículas se mueven de forma transversal” (Matta 2018).

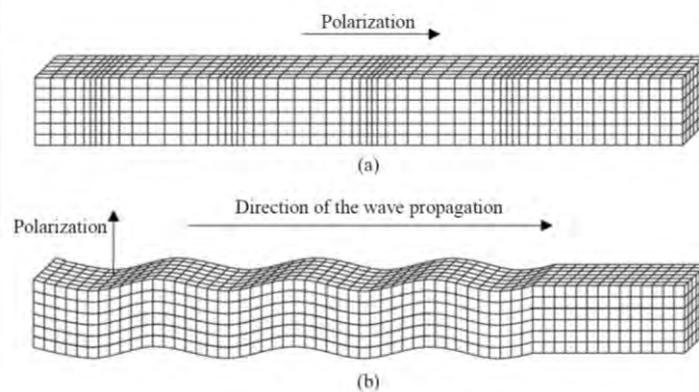


Figura 3.3. Propagación de las ondas elásticas y polarización. (a) Onda longitudinal y (b) onda de corte. (Matta 2018).

3.3.3. Velocidad del Sonido en Fluidos

La velocidad del sonido en el aire considerando un gas ideal y un proceso térmico adiabático (no intercambia calor con su entorno), puede ser descrita utilizando la siguiente ecuación [18]:

$$c = 331.5(1 + T/273)^{1/2} \quad (3.14)$$

Con c como la velocidad del sonido expresado en m/s y T la temperatura en grados Celsius ($^{\circ}C$).

Para el caso del agua destilada o agua dulce, la velocidad puede ser determinada numéricamente utilizando la siguiente expresión [7]:

$$c = 1402.7 + 488t - 482t^2 + 135t^3 + (15.9 + 2.8t + 2.4t^2)(P_G/100) \quad (3.15)$$

Donde:

P_G representa la presión manométrica en *bar* ($1.01325 \text{ bar} = 1 \text{ atm}$).

$t = T/100$, es la temperatura (T en grados Celsius).

La presión manométrica varía según la profundidad del agua de acuerdo con la ecuación:

$$\Delta P_G(h) = 0.09807h \quad (3.16)$$

Donde:

h es la profundidad en metros.

ΔP_G es la variación de la presión manométrica en función de la profundidad en *bar*.

Para una presión de referencia de 1 atm de la ecuación (3.15) y (3.16) se tendrá que:

$$c = 1402.7 + 488t - 482t^2 + 135t^3 + (15.9 + 2.8t + 24t^2)((1.01325 + 0.09807h)/100) \quad (3.17)$$

3.3.4. Velocidad del Sonido en un Sólido Elástico Isotrópico

De acuerdo con las ecuaciones (3.10) y (3.11) se determina que la velocidad de propagación de las ondas longitudinal y transversal en el medio sólido elástico estará dada como [1]:

$$c_L = \sqrt{\frac{2\mu + \lambda}{\rho}} \quad (3.18)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3.19)$$

Donde:

c_L es la velocidad de propagación de la onda de compresión.

c_T es la velocidad de propagación de la onda de corte.

λ y μ son las constantes elásticas de Lamé [1].

ρ es la densidad del material.

3.4. Impedancia acústica

A continuación, se describe la impedancia acústica utilizada en el modelo de simulación y síntesis del campo sonoro, la cual cumple una función fundamental en el proceso de propagación, refracción, reflexión y absorción de las ondas de sonido en interacción con las superficies que limitan el recinto y el medio de propagación.

Un parámetro importante que se define es la impedancia acústica específica, descrito como: “la relación compleja de la presión de sonido efectiva en un punto de un medio acústico o dispositivo a la velocidad de partícula efectiva en el punto” (Beranek 2019), con unidades de $N.S/m^3$ como se muestra en la ecuación (3.20).

$$z_e = \frac{p}{u} \quad (3.20)$$

Donde:

p es la presión.

u es la velocidad de partícula.

z_e es la impedancia acústica específica o densidad de impedancia acústica [18].

Satisfaciendo las condiciones de frontera para la propagación del sonido entre dos interfases de características físicas distintas que pueden ser: fluido-fluido, fluido-sólido, sólido-fluido, etc.; se tiene una cantidad que está mucho más relacionada a las características físicas de la superficie del contorno, esta está basada en la velocidad de partícula normal a la superficie que es generado por una presión de sonido determinada en el límite; esta es llamada impedancia de pared (en la acústica arquitectónica) [2] o impedancia acústica específica normal [7] y está definida por la siguiente ecuación (3.21) [7]:

$$z_n = \left(\frac{p}{u_n} \right)_{Superficie} = \frac{p}{\vec{u} \cdot \hat{n}} \quad (3.21)$$

Donde:

u_n denota la componente de velocidad de partícula normal a la superficie de la pared.

\hat{n} es el vector unitario perpendicular a la interfase o superficie.

Otro parámetro importante está denominado como: impedancia característica o impedancia del medio, que es la relación de la presión sonora efectiva en un punto determinado a la velocidad de partícula efectiva en dicho punto, para una onda de sonido plana, libre (sin reflexiones) y progresiva [16]; esta es igual al producto de la densidad del medio por la velocidad del medio, y no depende de la frecuencia, con unidades de $N.S/m^3$ como se muestra en la ecuación (3.22) [18].

$$z_c = \rho c \quad (3.22)$$

Donde:

ρ es la densidad.

c la velocidad del sonido.

z_c es la impedancia característica del medio de propagación.

3.4.1. Impedancia Acústica Específica para Ondas Esféricas Divergentes

Es importante determinar la impedancia acústica de acuerdo con la naturaleza de propagación de la onda, si esta onda es una onda divergente la impedancia tendrá una dependencia geométrica en el medio de propagación, afectando así la fase de la onda y la relación entre la presión acústica y velocidad de partícula. Sin embargo, es posible aproximar esta onda como una onda plana para grandes distancias como se describe a continuación.

El modelo de fuentes imágenes (que se usará en el modelo de simulación) parte de la definición de ondas esféricas radiadas, cuya impedancia estará representada por la ecuación (3.23), la cual describe la impedancia acústica específica relacionada una onda esférica [7] que viaja libre y progresiva, en un medio de propagación con impedancia característica ρc .

$$z = \rho c \frac{(kr)^2}{1 + (kr)^2} + j\rho c \frac{kr}{1 + (kr)^2} \quad (3.23)$$

La impedancia descrita en la ecuación (3.23) tiene una parte real que viene a ser la resistencia acústica específica y una parte imaginaria denominada como reactancia acústica específica.

En las ondas esféricas la velocidad de partícula no está en fase con la presión en un determinado punto; sin embargo, para valores de $kr \gg 1$ la impedancia característica específica tiende a ρc (como el caso de una onda plana libre), convirtiéndose en una resistencia acústica específica [7].

3.5. Reflexión, Absorción y Transmisión

En el presente apartado se describen parámetros como reflexión, absorción y transmisión, así como su dependencia de la impedancia acústica, partiendo de la redistribución de energía ocasionado por un cambio de impedancia entre dos medios de propagación. Esta información será utilizada para simular las reflexiones de las ondas acústicas en las superficies del recinto utilizando para ello el coeficiente de reflexión de presión, así como caracterizar analíticamente la acústica del recinto utilizando en este caso el coeficiente de absorción.

La reflexión, absorción y trasmisión del sonido están estrechamente relacionados a la impedancia del medio donde se propaga y de sus propiedades mecánicas, si el medio cambia puede hacer que cambie la trayectoria de la onda, se refleje y/o se trasforme en otras ondas.

Cuando una onda de sonido golpea una superficie de una pared desde un medio fluido, la energía es dividida en tres partes [18]. “Si el sonido incidente en la pared tiene una energía E_i , una parte de la energía E_r es reflejado de

retorno mientras que una parte E_a es absorbida por la pared, el resto E_t es transmitido” (Maekawa 2011), se tiene entonces [18]:

$$E_i = E_r + E_a + E_t \quad (3.24)$$

Se puede representar de forma simplificada (para ondas planas progresivas) las reflexiones y trasmisiones de las ondas en función de la impedancia característica [7] de los medios de propagación $z = \rho c$, donde ρ es la densidad del medio de propagación y c la velocidad del sonido en dicho medio.

Se define a continuación los coeficientes de transmisión y reflexión de la presión como [7]:

$$T = \frac{p_t}{p_i} \quad (3.25)$$

$$R = \frac{p_r}{p_i} \quad (3.26)$$

Donde:

T es el coeficiente de transmisión de presión.

R es el coeficiente o factor de reflexión de presión.

p_i es la amplitud compleja de la presión de la onda incidente.

p_r es la amplitud compleja de la presión de la onda reflejada.

p_t es la amplitud compleja de la presión de la onda transmitida.

Los coeficientes de transmisión y reflexión de presión [7] estarán representados por funciones complejas, pudiendo depender del ángulo de incidencia, frecuencia, etc. El coeficiente de reflexión de presión es utilizado para modelar y simular las reflexiones según lo descrito más adelante en sección 3.8.1.

Otro parámetro importante por definir es el coeficiente de absorción, Maekawa[18] lo define en términos de energía relacionando la energía de una

onda incidente y la energía de la onda reflejada, sin embargo, este coeficiente puede ser deducido de forma más conveniente, en el desarrollo de la presente tesis, de la relación de intensidades acústicas entre la onda incidente y reflejada (de acuerdo con lo descrito por Kinsler[7] y Kuttruff [2]); más adelante en la sección 3.8.1 se introduce la técnica de radiosidad en el modelo de simulación de las reflexiones, donde se utiliza parámetros como potencia acústica e intensidad, de modo que la potencia transportada por un haz de sonido se obtiene de la intensidad multiplicada por el área de sección transversal finita del haz que impacta una superficie reflectora [7]. Por otro lado, la intensidad es proporcional a la presión sonora al cuadrado tanto para ondas planas como esféricas [13], por lo tanto, si la intensidad de una onda plana reflejada es atenuada por un factor $|R|^2$ respecto a la onda incidente, resultando en una pérdida de energía durante la reflexión, se define entonces el coeficiente de absorción como (Kinsler [7] y Kuttruff [2]):

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (3.27)$$

Donde:

α es el coeficiente de absorción.

R es el coeficiente de reflexión de la presión.

$|R|^2$ es el coeficiente de reflexión de intensidad [7].

De acuerdo con la ecuación (3.27) el coeficiente de absorción es calculado en función del coeficiente de reflexión de presión, en consecuencia, este también dependerá del ángulo de incidencia, frecuencia, etc.

A continuación, se deducen los modelos matemáticos para el cálculo del coeficiente de reflexión de presión utilizados en el modelo de simulación de presente trabajo de tesis para las diferentes interfases, así como el cálculo del coeficiente de absorción para espacios cerrados.

3.5.1. Reflexiones Entre Fluidos

La reflexión del sonido para una onda plana con incidencia oblicua entre dos medios fluidos asumiendo una superficie plana infinita (como se muestra en la Figura 3.4) puede ser representada por las siguientes ecuaciones [7]:

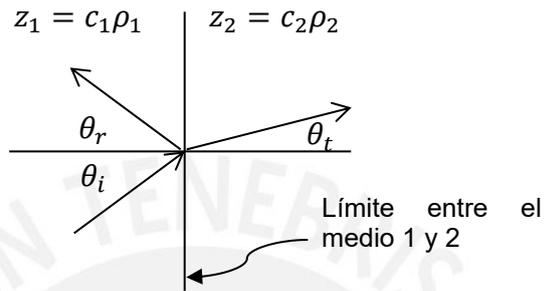


Figura 3.4. Reflexión y transmisión del sonido para una onda plana de incidencia oblicua en un límite plano entre dos fluidos con impedancias características diferentes. Donde: z_1 es la impedancia característica del medio 1 y z_2 es la impedancia característica del medio 2.

$$\sin \theta_i = \sin \theta_r \quad (3.28)$$

$$\frac{\sin \theta_i}{c_1} = \frac{\sin \theta_t}{c_2} \quad (3.29)$$

$$1 + R = T \quad (3.30)$$

$$\cos \theta_t = [1 - (c_2/c_1)^2 \sin^2 \theta_i]^{1/2} \quad (3.31)$$

$$R = \frac{z_2 / \cos \theta_t - z_1 / \cos \theta_i}{z_2 / \cos \theta_t + z_1 / \cos \theta_i} \quad (3.32)$$

Donde:

θ_i es el ángulo de incidencia.

θ_r es el ángulo de reflexión.

θ_t es el ángulo de transmisión.

c_1 es la velocidad del sonido del medio 1.

c_2 es la velocidad del sonido del medio 2.

Se tiene las ecuaciones (3.28) y (3.29) como una declaración de la ley de Snell; y R como el coeficiente de reflexión de la presión y T el de transmisión.

Este tipo de reflexión corresponde a interfaces tipo agua-agua (a diferente temperatura, presión, etc.), agua-aire y aire-agua.

Consideraciones [7] de la ecuación (3.32):

1. Si $c_1 > c_2$, el ángulo de transmisión θ_t será real y menor que el ángulo de incidencia θ_i ; y el haz transmitido estará inclinado hacia la normal de la superficie para todos los ángulos de incidencia. Este es el caso particular para la interfase agua-aire donde el sonido en el agua tiene mayor velocidad.
2. Si $c_1 < c_2$, y $\theta_i < \theta_c$, donde se define al ángulo crítico θ_c como:

$$\sin \theta_c = c_1/c_2 \quad (3.33)$$

El ángulo de transmisión θ_t será real pero mayor al ángulo de incidencia θ_i ; y el haz transmitido se alejará de la normal a la superficie para todos los ángulos de incidencia menores al ángulo crítico. Este será el caso particular para la interfase aire-agua.

3. Si $c_1 < c_2$, y $\theta_i > \theta_c$, para ángulo de incidencia apenas exceda el ángulo crítico, la onda será completamente reflejada con factores de reflexión de ± 1 asemejándose a superficies duras o de liberación de presión. La reflexión estará representada por:

$$R = e^{j\phi} \quad (3.34)$$

$$\phi = 2 \tan^{-1} \left[(\rho_1/\rho_2) \sqrt{(\cos \theta_c / \cos \theta_i)^2 - 1} \right]$$

Este caso también es aplicable a la interfase aire-agua, cuando el ángulo de incidencia θ_i sea mayor al ángulo crítico θ_c .

4. Se define el ángulo de intromisión θ_I , al ángulo de incidencia en el cual no hay reflexión, es decir, hay una transmisión completa del sonido al segundo medio de propagación. El ángulo de intromisión se da en dos casos particulares: cuando $z_1 < z_2$ y $c_2 < c_1$, o cuando $z_1 > z_2$ y $c_2 > c_1$. El ángulo de intromisión estará dado por la siguiente ecuación:

$$\theta_I = \sin^{-1} \left(\sqrt{\frac{1 - (z_1/z_2)^2}{1 - (\rho_1/\rho_2)^2}} \right) \quad (3.35)$$

3.5.2. Reflexiones Desde una Superficie Sólida

Los modelos de reflexión en los sólidos dependerán de factores como: viscosidad, porosidad, así como de su forma, estructura, entre otras condiciones. En el caso de sólidos porosos e interfase agua-sólido es posible modelar las reflexiones utilizando el modelo de Biot (según Matta [11]), en el cual puede considerarse la refracción de tres ondas mecánicas que se propagan en el interior del material, una onda de corte y dos de compresión, una de las cuales modela la propagación de onda en el fluido contenido en los poros del material. Sin embargo, es posible obtener un modelo analítico práctico, si se considera las reflexiones sobre un sólido rígido homogéneo, isotrópico, y de semiplano infinito (según lo descrito por Kinsler [7] y B.A. Auld [8]), donde se desprecia los efectos de porosidad del material, así como las pérdidas por viscosidad, generando un modelo práctico de reflexión.

Incidencia Oblicua

La Figura 3.5 representa la reflexión en una interfase fluido-sólido de incidencia oblicua, donde una onda incidente de amplitud A_i y ángulo de incidencia θ_i genera en el fluido una onda reflejada de amplitud A_r y ángulo de reflexión θ_r . Del mismo modo se producen ondas refractadas al interior del sólido, una de

corte con amplitud A_s y ángulo de refracción θ_s ; así como una onda de compresión de amplitud A_c y ángulo de refracción θ_c .

Como se observa en la Figura 3.5 el ángulo de refracción de la onda de compresión siempre será mayor a la de corte (de acuerdo con B.A. Auld [9]), debido a que la velocidad de la onda de compresión es mayor que la de corte.

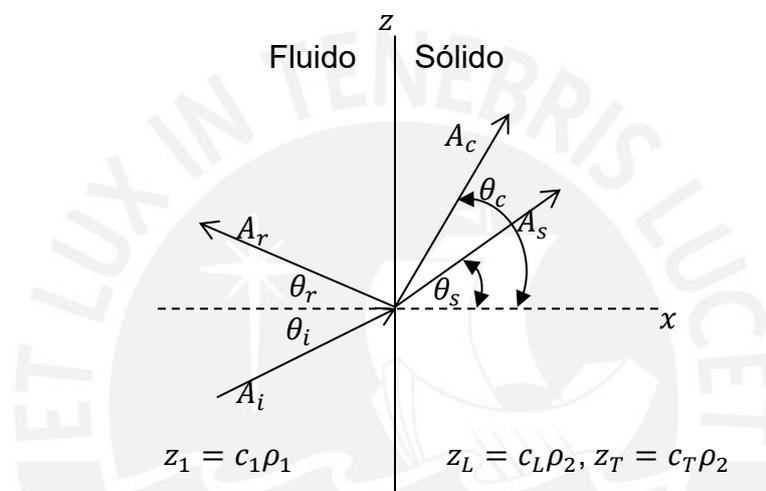


Figura 3.5. Reflexión y refracción en una interfase fluido-sólido. c_1 es la velocidad del sonido en el fluido, c_T es la velocidad de onda de corte en el sólido y c_L es la velocidad de onda de compresión.

De acuerdo con la ley de Snell se tendrá que los ángulos de reflexión y refracción serán calculados como [10]:

$$\frac{\sin \theta_i}{c_1} = \frac{\sin \theta_s}{c_T} = \frac{\sin \theta_c}{c_L} \quad (3.36)$$

Donde:

c_1 es la velocidad del sonido en el fluido.

c_T es la velocidad de onda de corte en el sólido.

c_L es la velocidad de onda de compresión.

Para encontrar el coeficiente de reflexión es necesario cumplir con las siguientes condiciones de frontera (de acuerdo con Zhang [19]):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \phi_1}{\partial z} = \frac{\partial \phi_2}{\partial z} \\ \lambda_1 \nabla^2 \phi_1 + 2\mu_1 \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial z^2} = \lambda_2 \nabla^2 \phi_2 + 2\mu_2 \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial z^2} \\ \mu_1 \frac{\partial^2 \phi_1}{\partial z \partial x} = \mu_2 \frac{\partial^2 \phi_2}{\partial z \partial x} \end{array} \right. \quad (3.37)$$

Donde:

ϕ es el potencial de desplazamiento para las ondas planas en los dos medios (agua y sólido).

$\lambda_1, \lambda_2, \mu_1$ y μ_2 son las constantes elásticas de Lamé.

Para el caso del agua la constante μ_1 es igual a cero (ya que el agua no desarrolla fuerzas de corte).

El coeficiente de reflexión puede obtenerse de la relación de amplitudes de las ondas de desplazamiento de partículas como: $R_r = A_r/A_i$. Desarrollando las condiciones de frontera de la interfase (agua-sólido) para la solución de los frentes onda en condiciones de estado estable, se puede obtener la relación de amplitudes en forma de matriz de transferencia (como lo presentan Rose [10] y B.A. Auld [9]) asumiendo $A_i=1$ como:

$$\begin{bmatrix} -\cos \theta_i & -\cos \theta_c & \sin \theta_s \\ -Z_1 & Z_L \cos 2\theta_s & -Z_T \sin 2\theta_s \\ 0 & -Z_T(c_T/c_L) \sin 2\theta_c & -Z_T \cos 2\theta_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_r \\ T_c \\ T_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_i \\ Z_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

Donde:

R_r es el coeficiente de reflexión.

T_c es el coeficiente de transmisión de la onda de compresión.

T_s es el coeficiente de transmisión de la onda de corte.

Z_1 es la impedancia característica del medio fluido (agua).

Z_L es la impedancia acústica para la onda compresión.

Z_T es la impedancia acústica para le onda de corte.

c_T es la velocidad de la onda de corte.

c_L es la velocidad de la onda de compresión.

Solucionando la matriz de la ecuación (3.38) para el coeficiente de reflexión de presión se tendrá:

$$R_r = \frac{\cos \theta_i \left(\frac{Z_L (\cos 2\theta_s)^2 + Z_T (c_T/c_L) \sin 2\theta_c \sin 2\theta_s}{\cos \theta_c \cos 2\theta_s + (c_T/c_L) \sin 2\theta_c \sin 2\theta_s} \right) - Z_1}{\cos \theta_i \left(\frac{Z_L (\cos 2\theta_s)^2 + Z_T (c_T/c_L) \sin 2\theta_c \sin 2\theta_s}{\cos \theta_c \cos 2\theta_s + (c_T/c_L) \sin 2\theta_c \sin 2\theta_s} \right) + Z_1} \quad (3.39)$$

La interfase generará dos ángulos críticos definidos por las siguientes ecuaciones (para $c_1 < c_L$ y $c_1 < c_T$):

$$\theta_{ac1} = \sin^{-1} c_1/c_L \quad (3.40)$$

$$\theta_{ac2} = \sin^{-1} c_1/c_T \quad (3.41)$$

Donde:

c_1 representa a la velocidad del sonido en el agua.

3.5.3. Coeficiente de Absorción para Espacios Cerrados

Para el cálculo del tiempo de reverberación (como se describe más adelante en la sección 3.13.5) y otros parámetros acústicos es necesario determinar la energía acústica absorbida en las paredes del recinto, sin embargo, este proceso no es sencillo debido a que no se cuenta (en este caso en particular) con valores reales que representen los coeficientes de absorción de las paredes al interior de la piscina de nado sincronizado utilizando al agua como medio de

propagación, por otro lado, el campo sonoro en un espacio cerrado está compuesto de muchas ondas que inciden en una superficie desde diferentes direcciones. Por lo tanto, en el presente trabajo de tesis se toma en cuenta un modelo analítico para el cálculo del coeficiente de reflexión de espacios cerrados, en el cual se considera la integración estadística de las ondas que inciden en una superficie plana con diferentes ángulos, fase y amplitud [2]. Cabe resaltar las limitaciones que puede presentar el método, sin embargo, su valor es representativo en el cálculo de parámetros acústicos del recinto.

En acústica arquitectónica se suele modelar el coeficiente de absorción para la incidencia aleatoria o uniformemente distribuidas de ondas de sonido en una superficie utilizando la “fórmula de París” (de acuerdo con lo descrito por Kuttruff[2]), con ese fin y para el presente caso de estudio se utiliza como base la ecuación (3.27) la cual describe analíticamente al coeficiente absorción de cada superficie en la piscina de nado sincronizado, así mismo, este coeficiente es calculado a partir del coeficiente de reflexión de presión de acuerdo a cada modelo de interfase (fluido-fluido o fluido-sólido). Se tienen entonces la siguiente ecuación [2]:

$$\alpha_{uni} = \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \sin(2\theta) d\theta \quad (3.42)$$

Donde:

α_{uni} es el coeficiente de absorción de incidencia uniforme y aleatoria para espacios cerrados.

$\alpha(\theta)$ es el coeficiente de absorción dependiente del ángulo de incidencia utilizando la ecuación (3.27).

El coeficiente de absorción de incidencia aleatoria es calculado para cada banda de frecuencia. El coeficiente $\alpha(\theta)$ es calculado utilizando las ecuaciones (3.32) y (3.39) respectivamente.

La ecuación (3.42) puede aproximarse de forma discreta como:

$$\alpha_{uni} \cong \frac{\pi}{180} \sum_{n=0}^{90} \alpha \left(\frac{n\pi}{180} \right) \sin \left(\frac{2n\pi}{180} \right) \quad (3.43)$$

3.6. Absorción del Medio de Propagación

A continuación, se describe la absorción del sonido utilizando al agua como medio de propagación, la cual genera pérdidas de energía de la onda acústica a medida que esta se desplaza. El medio será definido como agua dulce, despreciando los efectos de la absorción debido a la salinidad y otros parámetros, esto asumiendo las características dadas en una piscina de nado sincronizado. La absorción del medio de propagación será utilizada en el modelo de síntesis del campo sonoro y en el cálculo analítico del tiempo de reverberación de un recinto descrito en la sección 3.13.5.

Las pérdidas por absorción en el medio de propagación se dan por tres tipos básicos [7]: pérdidas por viscosidad, pérdidas por conducción de calor y pérdidas asociadas con los procesos moleculares internos.

Si se considera la propagación de una onda plana armónica y el efecto de la absorción del medio, una solución de la onda que se propaga en dirección de x estaría dada por siguiente ecuación [7]:

$$p = p_0 e^{-\alpha_t x} e^{j(\omega t - kx)} \quad (3.44)$$

Donde:

α_t es el coeficiente de absorción total en el medio de propagación.

p_0 es el valor inicial de la magnitud de la presión de sonido.

$e^{-\alpha_t x}$ es el decaimiento exponencial de la magnitud de la presión en dirección de la propagación de la onda.

Del mismo modo para una onda esférica que se propaga en dirección de r tendrá la ecuación [7]:

$$p = \frac{p_0 e^{-\alpha_t r} e^{j(\omega t - kr)}}{r} \quad (3.45)$$

El coeficiente de absorción está expresado en nepers por metro (Np/m) donde neper es una unidad adimensional. Las pérdidas por absorción suelen darse en unidades de dB/m y se relacionan con el coeficiente de absorción utilizando la ecuación [7]:

$$\alpha_t = \frac{a}{8.7} \quad (3.46)$$

Donde:

a es la pérdida de absorción en dB/m .

En agua dulce [7] las pérdidas por absorción pueden ser representadas por la siguiente ecuación:

$$a = 4.9 \times 10^{-13} f^2 e^{-\left(\frac{T}{26} + \frac{h}{25000}\right)} \quad (3.47)$$

Donde:

f es la frecuencia en Hz .

T la temperatura en $^{\circ}C$.

h la profundidad en metros (m).

De la ecuación (3.46) y (3.47) se puede obtener el coeficiente de absorción del medio de propagación (agua dulce) como:

$$\alpha_t = \frac{4.9 \times 10^{-13} f^2 e^{-\left(\frac{T}{26} + \frac{h}{25000}\right)}}{8.7} \quad (3.48)$$

3.7. Refracción

El cálculo de refracción es utilizado en el presente trabajo de tesis para analizar sus efectos en el proceso de propagación de los rayos acústicos al interior de la piscina de nado sincronizado. Sin embargo, no es aplicado en el proceso de trazado de rayos acústicos del software de simulación, considerando que para el cálculo de la energía acústica se utiliza el método de fuentes imágenes, en el cual se asume que los rayos viajan trazando líneas rectas.

Se puede definir que la refracción es el cambio de dirección de propagación de la onda acústica al atravesar un medio, que resulta de las variaciones espaciales de la velocidad del sonido por irregularidades en el medio como son (para el caso del agua): temperatura, salinidad y presión [7]. Si la velocidad del sonido no es constante las ondas se propagarán siguiendo caminos curvados.

Una forma de estudiar el efecto de la refracción del sonido es utilizando la técnica de trazado de rayos y la definición de la ecuación eikonal, partiendo de la suposición de que: “la energía es llevada a lo largo caminos razonablemente bien definidos a través del medio de propagación” (Kinsler 2000). Esta suposición tiene restricciones a considerar, como, por ejemplo: es válida para frecuencias superiores a la frecuencia de Schroeder [7]; la amplitud de la onda y la velocidad del sonido no deben cambiar significativamente sobre distancias comparables a la longitud de onda [7].

3.7.1. Ecuaciones de Refracción

Partiendo de la ley de Snell y la solución de la ecuación eikonal [7] en un plano se tendrán las siguientes ecuaciones [6] [7]:

$$\xi = \frac{\cos \theta(h)}{c(h)} = \frac{\cos \theta_0}{c_0} \quad (3.49)$$

$$R(h) = -\frac{1}{\xi g(h)} \quad (3.50)$$

$$g(h) = \frac{dc(h)}{dh} \quad (3.51)$$

Donde:

ξ es una constante para el recorrido de un rayo en particular (parámetro del rayo).

θ_0 es el ángulo de elevación inicial para una velocidad de referencia c_0 .

h es la profundidad.

R es el radio de curvatura.

g es la gradiente de velocidad de sonido.

La curvatura del rayo estará dada por el parámetro del rayo ξ y el valor local de la gradiente de velocidad del sonido g . La Figura 3.6 muestra un segmento de rayo y sus componentes.

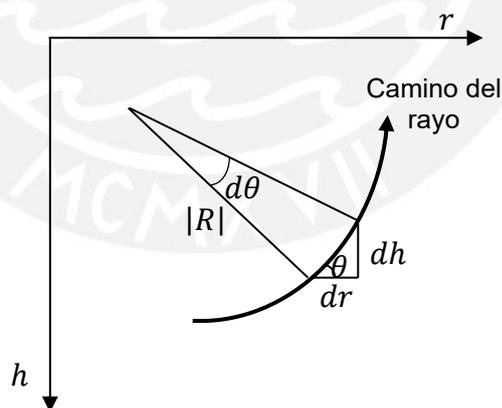


Figura 3.6. Un segmento de rayo en el plano h, r , y radio de curvatura R .

El recorrido del rayo desde un punto (r_1, h_1) hasta un punto (r_2, h_2) puede ser calculado utilizando la ecuación (3.52) [6], así mismo el tiempo transcurrido por rayo es calculado utilizando la ecuación (3.53).

$$r_2 - r_1 = \int_{h_1}^{h_2} \frac{\xi c(h) dh}{\sqrt{1 - \xi^2 c^2(h)}} \quad (3.52)$$

$$t_2 - t_1 = \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{c(h) \sqrt{1 - \xi^2 c^2(h)}} \quad (3.53)$$

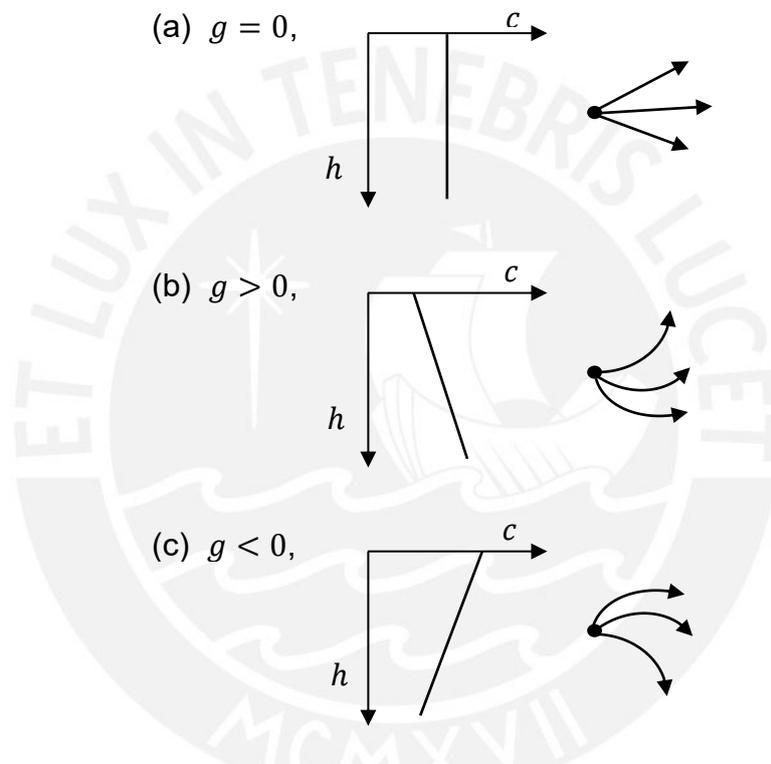


Figura 3.7. Efectos del gradiente de velocidad del sonido g sobre la trayectoria de los rayos, para diferentes perfiles de velocidad en función de la profundidad: (a) $g = 0$, los rayos se propagan de forma recta para cada camino; (b) $g > 0$, los rayos son refractados hacia arriba; (c) $g < 0$, los rayos son refractados hacia abajo.

La Figura 3.7 muestra tres ejemplos del efecto del gradiente de velocidad g en la trayectoria de los rayos, tomando como referencia un perfil de velocidad determinado en función de la profundidad h . Si $g = 0$, la velocidad del sonido es constante para todo h , los rayos se propagan de forma recta para cada camino; si $g > 0$, la velocidad no es constante, el gradiente de velocidad de sonido cambia positivamente debido a la variación de la temperatura y/o presión, los rayos son refractados hacia arriba, si una capa o sección del medio

es isotérmica la velocidad cambiaría en función de la profundidad con un gradiente de velocidad constante igual a: $g = 0.016s^{-1}$ [7]; si $g < 0$, la velocidad no es constante, el gradiente de velocidad del sonido cambia negativamente debido principalmente a la variación de la temperatura, los rayos son refractados hacia abajo.

3.7.2. Cálculo de la Refracción

Una forma de calcular numéricamente la refracción en el agua es dividir de forma discreta una columna de agua en una gran cantidad de capas muy delgadas de espesor uniforme Δh [7], en las cuales se puede asumir que el gradiente de velocidad del sonido es una constante, la Figura 3.8 muestra la subdivisión del medio en capas.



Figura 3.8. Subdivisión discreta de una columna de agua, donde el gradiente de velocidad de sonido es una constante para cada capa. Con: $c_1 < c_2 < c_3 < c_4$ y $\theta_1 > \theta_2 > \theta_3 > \theta_4$

Se expresan las siguientes ecuaciones para el cálculo de la refracción [6][7]:

$$g_i = \frac{c_{i+1} - c_i}{\Delta h} \quad (3.54)$$

$$r_{i+1} - r_i = \frac{1}{\xi g_i} \left[\sqrt{1 - \xi^2 c_i^2} - \sqrt{1 - \xi^2 c_{i+1}^2} \right] \quad (3.55)$$

$$t_{i+1} - t_i = \frac{1}{|g_i|} \ln \left(\frac{c_{i+1}}{c_i} \frac{1 + \sqrt{1 - \xi^2 c_i^2}}{1 + \sqrt{1 - \xi^2 c_{i+1}^2}} \right) \quad (3.56)$$

Donde r es la distancia horizontal recorrida en función a la capa de profundidad, c es la velocidad de sonido y g la gradiente de velocidad correspondiente a cada capa, t es el tiempo de viaje del rayo.

3.8. Acústica Geométrica

A continuación, se describen el método propuesto (en el presente trabajo de tesis) para el proceso de síntesis del campo sonoro utilizando la acústica geométrica, en la cual se desarrollan las técnicas relacionadas a las fuentes imágenes y el trazado de rayos acústicos.

El método propuesto utilizando el trazado de rayos acústicos y fuentes imágenes se deriva de la acústica geometría, partiendo del supuesto de que: “la energía sonora es transportada por rayos de sonido, reemplazando así el concepto de onda, lo que simplifica significativamente el cálculo de los parámetros acústicos” (Kuttruff 2009). Dichos rayos pueden ser representados por líneas bien definidas cuya intensidad decae como $1/r^2$ [1], al igual que una onda esférica, donde r es la distancia de origen del rayo.

La aplicación del concepto de rayos en la acústica geométrica es válida para frecuencias superiores a la frecuencia de Schroeder (de acuerdo con Kuttruff [2] y Kinsler [7]) donde los modos o resonancias del recinto o volumen subacuático están muy superpuestos en el dominio de la frecuencia; o en el caso límite donde las dimensiones de los objetos del recinto y sus paredes son grandes comparadas con la longitud de onda del sonido.

La superposición de dos o más rayos [1] es calculada por la adición de las presiones del sonido en un punto del espacio. Sin embargo, en banda ancha el cálculo de la intensidad y la energía se puede simplificar por una simple adición (como se observa en las ecuaciones: (3.57),(3.58) y (3.59)), asumiendo que

los diferentes campos sonoros son incoherentes entre sí [2], minimizando los efectos de las interferencias.

$$|p|^2 \approx |\hat{p}_1|^2 + |\hat{p}_2|^2 \cdots + |\hat{p}_N|^2 \quad (3.57)$$

$$|\vec{I}| = |\vec{I}_1| + |\vec{I}_2| \cdots + |\vec{I}_N| \quad (3.58)$$

$$w = w_1 + w_2 \cdots + w_N \quad (3.59)$$

Donde:

\hat{p}_n son las amplitudes de las presiones de sonido de los n -ésimos rayos en un punto en el espacio.

\vec{I}_n son los aportes de intensidad de cada rayo en banda ancha.

w es la densidad de energía, con $I = cw$ cuando el rayo representa una línea recta perpendicular a una onda casi plana.

En la acústica geométrica cualquier fenómeno de difracción o interferencia es despreciado [2].

En la mayoría de los casos la acústica geométrica ofrece soluciones aproximadas y prácticas en las siguientes condiciones [1]: espacios grandes, sin incidencia de ras (sin modos tangenciales), bajo coeficiente de absorción y señales de banda ancha. Permitiendo hacer el análisis de resultados acústicos en bandas de frecuencias como: tiempo de reverberación, claridad, fuerza, etc.

3.8.1. Trazado Rayos

El trazado de rayos es utilizado para el cálculo estadístico de la energía acústica en función del tiempo en un punto específico del espacio, o como es el caso del método propuesto, para simplificar el proceso de cálculo del modelo determinista de fuentes imágenes definido como: “método híbrido” [1]. La Figura

3.9 muestra un proceso del trazado de un rayo desde una fuente S hasta un punto detector C en el espacio. El rayo sale de la fuente y en su camino va reflejándose en las paredes del recinto hasta ser detectado en un punto del espacio.

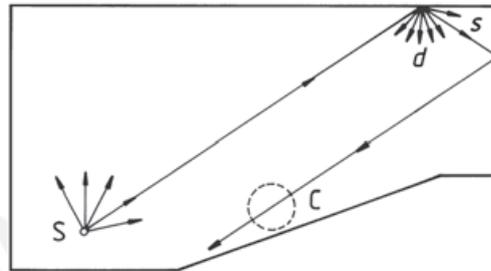


Figura 3.9. Principio del trazado de rayos, S=fuente, C=esfera de detección, s=reflexión especular, d=reflexión difusa. (Kuttruff 2009).

Un aspecto importante del trazado de rayos es el número de rayos que se va a generar desde una fuente de sonido de referencia, el cual determina el tiempo de cálculo o costo computacional.

El trazado de rayos dependerá de la absorción (tanto del medio, así como resultado de las reflexiones) y de su dependencia en la frecuencia; de modo que: se debe calcular por cada banda de frecuencia de interés. Un algoritmo para determinar la secuencia del trazado de rayos se muestra en la Figura 3.10 Los rayos empiezan con una energía e_0 y son trazados hasta un tiempo máximo de viaje t_{max} , o hasta que alcancen una energía mínima e_{min} .

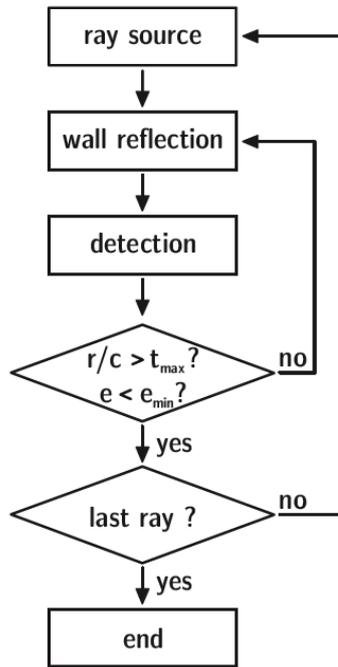


Figura 3.10. Diagrama de flujo de la secuencia del trazado de rayos. (Vorländer 2008).

Modelamiento de la Fuente

Las fuentes de sonido son caracterizadas por la potencia de sonido y directividad [1], ambas dependientes de la frecuencia. Para un “método híbrido” se necesita una distribución espacial uniforme de rayos que salgan de la fuente y un número determinado N .

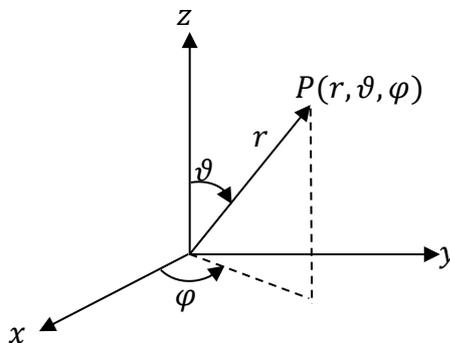


Figura 3.11. Coordenadas polares para el trazado de rayos.

Una forma de generar N rayos uniformemente espaciados en ángulos de elevación y azimut es utilizando el siguiente algoritmo [25]:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = r \begin{pmatrix} \sin \vartheta \cos \varphi \\ \sin \vartheta \sin \varphi \\ \cos \vartheta \end{pmatrix} \quad (3.60)$$

```

Set  $N_{count} = 0$ 
Set  $a = 4\pi r^2 / N$  and  $d = \sqrt{a}$ 
Set  $M_\vartheta = \text{round}[\pi / d]$ 
Set  $d_\vartheta = \pi / M_\vartheta$  and  $d_\varphi = a / d_\vartheta$ 
For each  $m$  in  $0 \cdots M_\vartheta - 1$  do {
    Set  $\vartheta = \pi(m + 0.5) / M_\vartheta$ 
    Set  $M_\varphi = \text{round}[2\pi \sin \vartheta / d_\varphi]$ 
    For each  $n$  in  $0 \cdots M_\varphi - 1$  do {
        Set  $\varphi = 2\pi n / M_\varphi$ 
        Crear un punto utilizando la ecuación ( 3.60)
        Set  $N_{count} += 1$ 
    }
}

```

Donde:

$\vartheta \in [0; \pi]$ es el ángulo de elevación.

$\varphi \in [0; 2\pi]$ es el ángulo azimutal.

r es el radio de la esfera.

Las coordenadas cartesianas del punto P como se muestra en la Figura 3.11 son calculadas utilizando la ecuación (3.60).

La Figura 3.12 muestra una fuente de rayos uniformes con $N = 4096$ rayos y $N = 8192$ rayos.

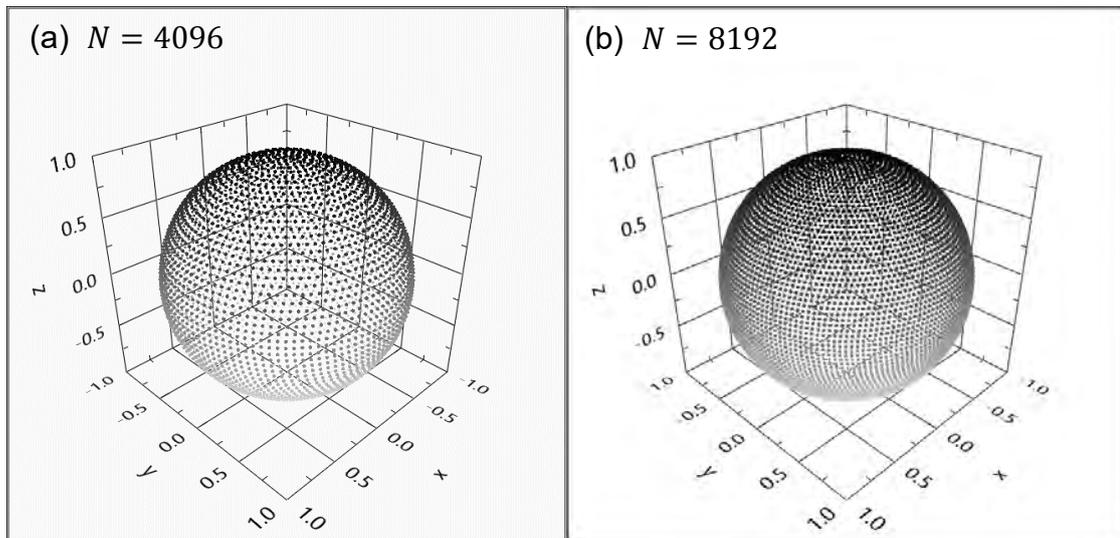


Figura 3.12. Generación de rayos uniformemente separados en ángulos de azimut y elevación, con: (a) $N = 4096$ rayos, (b) $N = 8192$ rayos y $r=1$.

Modelamiento del Receptor Detector

Los receptores son modelados con esferas de detección de rayos de radio r_d [1], donde la ubicación del receptor estaría dada por el centro de la esfera. La forma esférica de los receptores lo hace independiente del ángulo de incidencia (modelando un micrófono omnidireccional). Cada vez que el rayo atraviesa la esfera es detectada, esto se consigue trazando una línea perpendicular desde el rayo hasta el centro de la esfera, si la línea trazada es menor que el radio r_d , el rayo se considera detectado como se observa en la Figura 3.13.

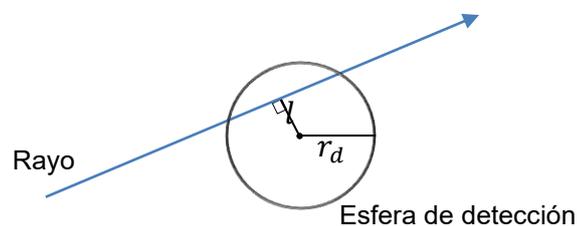


Figura 3.13. Detección de un rayo usando un receptor esférico, donde: $l < r_d$, con l igual a la distancia perpendicular del rayo al centro de la esfera y r_d igual al radio de la esfera.

Reflexión Especular de los Rayos

Si los rayos se reflejan especularmente en una superficie plana, se establece que durante la reflexión el ángulo entre el rayo incidente y el rayo reflejado se divide a la mitad por la normal de la pared [2], como se muestra en la Figura 3.14, se tiene entonces que:

$$\vec{u}_r = \vec{u}_i - 2(\vec{u}_i \cdot \hat{n})\hat{n} \quad (3.61)$$

Donde:

\vec{u}_r es el vector del rayo reflejado.

\vec{u}_i es el vector del rayo incidente.

\hat{n} es el vector normal a la superficie del plano reflector.

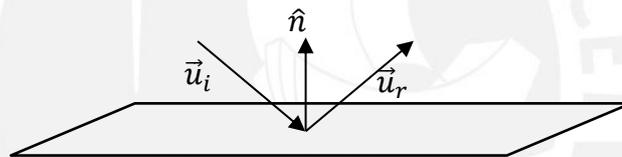


Figura 3.14. Reflexión especular de un plano reflector.

3.8.2. Método de Imágenes

El método se basa en fuentes imagen, el cual superpone la presión sonora total del sonido directo (emitido desde la fuente) y las reflexiones (emitidos desde las fuentes imagen) en un punto determinado del espacio, utilizando el modelo de ondas esféricas complejas como se observa en la Figura 3.15 (para el caso de una fuente y un plano reflector especular).

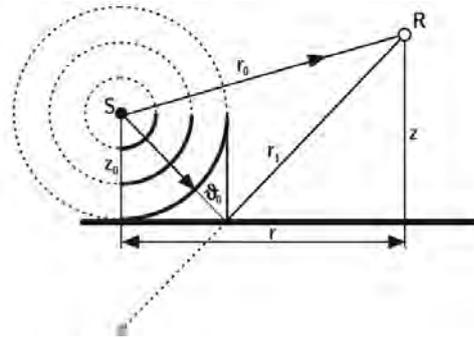


Figura 3.15. Reflexión de una onda esférica sobre un plano reflector. (Vorländer 2008).

El campo total en el punto R (Figura 3.15) contiene una contribución del sonido directo viajando a través del vector \vec{r}_0 y otro componente reflejado en el plano reflector. Una aproximación matemática que representa este esquema asumiendo un ángulo de incidencia ϑ_0 constante (como si fuera una onda plana) estará dado por [1]:

$$p = \frac{p_0 e^{j\omega t} e^{-jkr_0}}{r_0} + \frac{p_0 e^{j\omega t} e^{-jkr_1}}{r_1} R(\vartheta_0) \quad (3.62)$$

Donde:

$R(\vartheta_0)$ es el factor de reflexión de presión para un ángulo de incidencia ϑ_0 .

El primer término de la ecuación (3.62) representa el sonido directo y el segundo la contribución de la reflexión.

La reflexión puede ser relacionada a otra fuente puntual llamada fuente imagen, cuya amplitud es atenuada por el factor de reflexión. El modelo de imagen fuente es exacto [1] para valores de $R = \pm 1$ (pared dura o suave) o lo suficientemente preciso para valores de z, z_0 y $r \gg \lambda$ (para otros valores de R).

Si el sonido se refleja en i superficies planas antes de llegar al receptor, los efectos de las reflexiones se van acumulando en la respuesta impulsiva de la presión sonora, así como se va incrementando la distancia entre la fuente

imagen y el receptor, esta reflexión puede ser representada por la siguiente ecuación [1]:

$$p_{IF} = \frac{p_0 e^{j\omega t} e^{-jkr_{FI}}}{r_{FI}} \prod_{n=1}^i R_n \quad (3.63)$$

Donde:

R_n es el factor de reflexión correspondiente a cada plano reflector.

i es el orden de reflexión u orden de la fuente imagen.

r_{FI} es la distancia entre la fuente imagen y el receptor.

Consideraciones de las Ondas Esféricas a la Incidencia Rasante

Para valores de $R(\vartheta_0) \neq \pm 1$ las distancias desde la fuente y el receptor hasta los límites del espacio acústico deben ser lo suficientemente grandes para obtener resultados confiables utilizando la ecuación (3.63). A ángulos de incidencia $\vartheta_0 > 60^\circ$ (incidencia rasante) y distancias cortas $d \leq \lambda$ los errores de asumir una onda plana para la impedancia y el factor de reflexión serán considerablemente audibles ($\Delta p_{IF} > 20\%$, lo que corresponde a 1 dB) [1].

3.8.3. Modelo de Fuente Imagen Híbrida

El modelo de fuente imagen híbrida es un método determinista que reúne las ventajas del trazado de rayos y el de las fuentes imagen (de acuerdo con Vorländer [1]). El trazado de rayos es utilizado fundamentalmente para simplificar el proceso de comprobación de la audibilidad de las fuentes imagen [2], luego, las fuentes imagen pueden utilizar el modelo de ondas esféricas; dándole al análisis de los campos sonoros una resolución temporal fina en calidad de frecuencia de muestreo y al mismo tiempo incluir los efectos de dispersión.

El proceso consta de trazar rayos desde una fuente hasta impactar a un receptor, estos rayos pueden ir reflejándose en el camino formándose las diferentes fuentes imagen. Un algoritmo de trazado de rayos conocido como “trazado de cono” [1] puede ser utilizado para este propósito, evaluando en todo momento que los rayos que impacten en el receptor no tengan el mismo historial de reflexión, evitando la superposición energética de rayos o asegurándose que la contribución de las fuentes imagen se den sólo una vez.



Figura 3.16. Geometría de una fuente imagen, cono y radio de detección r_d .

La Figura 3.16 muestra la geometría del cono, fuente imagen FI , y radio de detección del cono r_d . Con este modelo de trazado de cono un receptor puede ser modelado como un punto en el espacio. La probabilidad de que el cono detecte un receptor puede ser escrito como [1] (para $r \gg r_d$):

$$k = \frac{Nr_d^2}{4r^2} = \frac{Nr_d^2}{4(ct)^2} \quad (3.64)$$

Donde:

N es el número de rayos o conos.

c es la velocidad del sonido.

t el tiempo.

Para asegurar que al menos un cono ($k = 1$) detecte un receptor en un tiempo máximo t_{max} se tendrá la ecuación (3.65), donde N_{min} es el número mínimo de conos.

$$N_{min} = \frac{4(ct_{max})^2}{r_d^2} \quad (3.65)$$

Construcción de las Fuentes Imagen

La Figura 3.17 muestra el proceso de construcción de las fuentes imágenes utilizando el método de trazado de rayos.

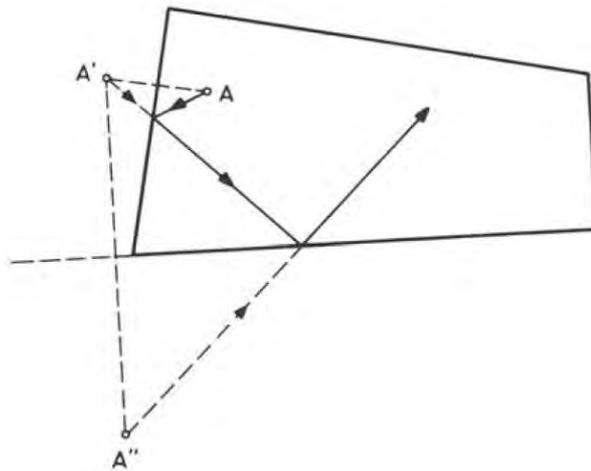


Figura 3.17. Fuentes imagen de primer y segundo orden. (Kuttruff 2009).

Cada vez que el rayo se refleja en un plano reflector se va formando una fuente imagen correspondiente de orden superior. La posición de la fuente puede ser determinada por las siguientes ecuaciones [1]:

$$d = \vec{r} \cdot \hat{n} = |\vec{r}| \cos \vartheta \quad (3.66)$$

$$\vec{F}_n = \vec{F} - 2d\hat{n} \quad (3.67)$$

Donde:

\vec{F} es la posición de la fuente.

\vec{F}_n es la posición de la imagen fuente.

\hat{n} es el vector unitario normal al plano reflector.

\vec{r} es el vector entre el punto del vector \vec{Q} en el plano reflector y la fuente \vec{F} , como se muestra en la Figura 3.18.

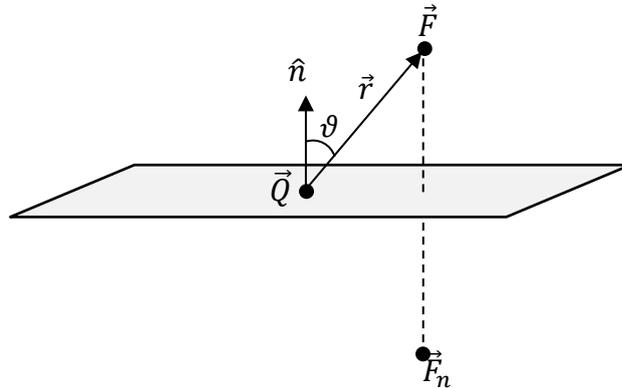


Figura 3.18. Construcción de una imagen fuente.

En espacios cerrados con M paredes reflectoras el número de imágenes de orden hasta i_0 asociadas a una fuente de sonido puede ser calculado utilizando la siguiente expresión [2]:

$$M(i_0) = M \frac{((M - 1)^{i_0} - 1)}{M - 2} \quad (3.68)$$

Para espacios de forma rectangular se puede simplificar como:

$$M_r(i_0) = \frac{2}{3} (2i_0^3 + 3i_0^2 + 4i_0) \quad (3.69)$$

Siendo para este caso en particular todas las fuentes imagen audibles [2].

Truncamiento

El modelo de imagen debe ser truncado en cierto orden de reflexión, debido al crecimiento exponencial del número de fuentes imágenes y al incremento del tiempo de cálculo computacional [1]. El tiempo máximo promedio t_{max} puede ser determinado utilizando la siguiente condición [1]:

$$t_{max} \geq 0.5T \quad (3.70)$$

Donde:

T es el tiempo de reverberación calculado previamente utilizando la fórmula de Sabine.

El tiempo de truncamiento deberá ser como mínimo igual al 50% del tiempo de reverberación [1].

3.8.4. Construcción de la Respuesta Impulsiva

La respuesta impulsiva en un punto en el espacio es construida a partir de los aportes de la señal directa, las reflexiones especulares y las reflexiones difusas en el campo sonoro generadas desde una fuente; como se ilustra en la Figura 3.19.

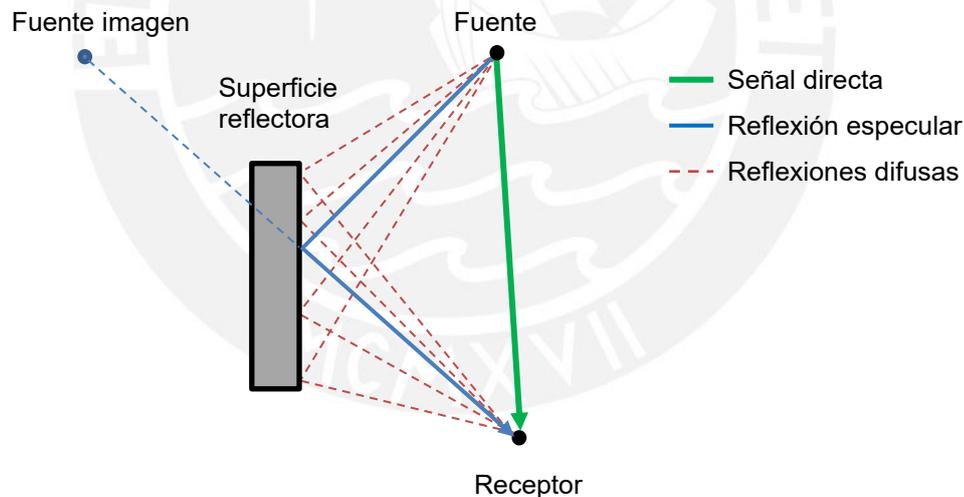


Figura 3.19. Composición de rayos acústicos para la construcción de la respuesta impulsiva: señal directa, reflexión especular y reflexiones difusas.

La función de propagación de la fuente o espectro de campo libre [1] que corresponde a la señal directa (de la fuente al receptor) puede ser escrita como:

$$H_0 = \frac{e^{-jkr_0}}{r_0} \cdot H_{Fuente}(\theta, \phi, f) \cdot H_{Medio} \quad (3.71)$$

Donde:

H_0 es el espectro de la función de propagación de la fuente directa normalizada a la presión de sonido de una fuente omnidireccional a un metro de distancia [1].

H_{Fuente} es la función de directividad de la fuente [16] en coordenadas de elevación θ y azimut ϕ de la fuente.

r_0 es la distancia de la fuente al receptor.

H_{Medio} es la atenuación del medio de propagación.

El espectro para las reflexiones especulares estará dado por:

$$H_n = \frac{e^{-jkr_n}}{r_n} \cdot H_{Fuente}(\theta, \phi, f) \cdot H_{Medio} \cdot \prod_{i=1}^{m_n} R_i \quad (3.72)$$

Donde:

H_n es el espectro de la n -ésima reflexión.

r_n es la distancia de la fuente imagen al receptor.

R_i es el factor de reflexión de las paredes reflectoras involucradas.

De la ecuación (3.45) se deduce la ecuación para la absorción del medio como:

$$H_{Medio} = e^{-\alpha_t r} \quad (3.73)$$

Donde:

α_t es el coeficiente de absorción del medio de propagación.

Luego, la presión total en el receptor desde la fuente (Figura 3.19) estará dado por las siguientes ecuaciones:

$$p = p_{directa} + p_{especular} + p_{difusa} \quad (3.74)$$

$$p(t)_{directa} = s(t) * \mathbb{F}^{-1}[H_0] \quad (3.75)$$

$$p(t)_{especular} = \sum_{n=1}^N s(t) * \mathbb{F}^{-1}[H_n] \quad (3.76)$$

$$p(t)_{difusa} = \sum_{l=1}^L s(t) * \mathbb{F}^{-1}[H_l] \quad (3.77)$$

Donde:

$p(t)_{directa}$ es la presión de sonido en función del tiempo correspondiente a la onda directa desde la fuente.

$p(t)_{especular}$ es la presión total correspondiente a las reflexiones especulares.

$p(t)_{difusa}$ es la presión total correspondiente a las reflexiones difusas.

\mathbb{F}^{-1} denota la transformada inversa de Fourier.

* la función de convolución.

$s(t)$ la fuente de sonido.

N es el número de reflexiones especulares.

L es el número de reflexiones difusas.

H_l es el espectro de la función de propagación de las reflexiones difusas (definido de forma discreta).

En el dominio de la frecuencia la presión total puede ser escrita como:

$$p(f) = S(f) \cdot \left(H_0 + \sum_{n=1}^N H_n + \sum_{l=1}^L H_l \right) = S(f) \cdot H(f) \quad (3.78)$$

De la ecuación (3.78) se puede definir la respuesta impulsiva como:

$$h(t) = \mathbb{F}^{-1}[H(f)] \quad (3.79)$$

Finalmente, la presión sonora en el receptor en función del tiempo estará dado por:

$$p(t) = s(t) * h(t) \quad (3.80)$$

3.8.5. Distribución Temporal de las Reflexiones

En espacios cerrados en un punto aleatorio del campo acústico, las reflexiones recibidas tendrán un tiempo de arribo, una energía y una dirección desde la cual es recibida; esto puede ser representado por una secuencia de pulsos en una gráfica de energía versus tiempo como se muestra la Figura 3.20, obteniendo un diagrama de reflexiones o ecograma.

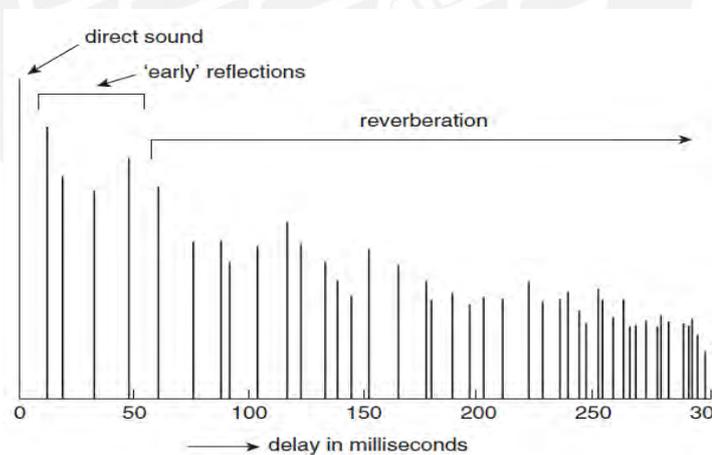


Figura 3.20. Diagrama esquemático de reflexión. (Kuttruff 2009).

De la Figura 3.20 se puede observar la siguiente distribución: en primer lugar, el sonido directo representado en el tiempo cero; seguido de las reflexiones tempranas y finalmente las reflexiones tardías que forman la cola de reverberación.

3.8.6. Reverberación Tardía

La reverberación tardía está compuesta predominantemente por reflexiones tardías difusas, donde se ha perdido información de fase, es decir no es posible determinar la dirección de arribo del sonido, creando la impresión de reverberancia y envolvimiento al oyente [1].

En la reverberación tardía la energía dispersa se sobrepone a la energía de las reflexiones especulares a partir del orden 3 de reflexión [1] (como lo muestra Kuttruff [2] para espacios cerrados), la figura muestra una distribución de la energía en función del orden de reflexión.

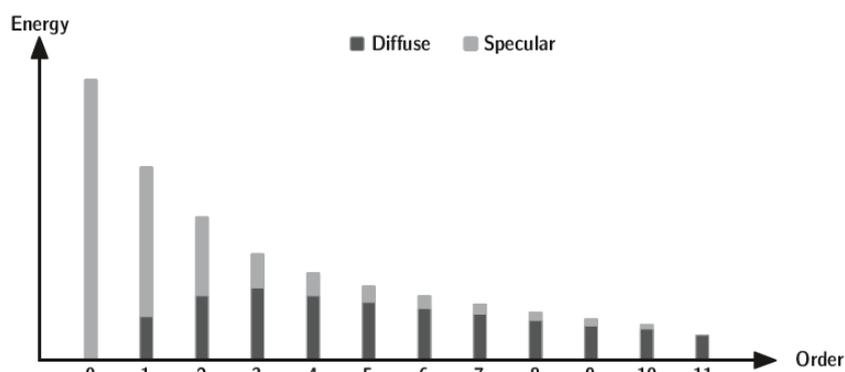


Figura 3.21. Conversión de energía sonora reflejada de forma especular en difusa. (Vorländer 2008).

3.9. Dispersión Superficial

En el presente apartado se describe a la dispersión superficial, la cual es utilizada en el modelo de reflexión de la superficie de la interfase agua-aire para la simulación y síntesis del campo sonoro. En el proceso se define las reflexiones difusas y especulares, así como su relación en el proceso de redistribución de la energía, se define la radiosidad, el coeficiente de dispersión y la redistribución de la energía reflejada utilizando la ley de coseno de Lambert para las reflexiones difusas.

Las reflexiones difusas son producidas por las irregularidades de las superficies que dispersan el sonido redistribuyendo la energía sonora incidente en todas las direcciones [2] con una distribución espacial particular [5], mientras la reflexión especular mantiene una dependencia angular con la onda incidente y la superficie reflectora. El ancho de banda de las ondas sonoras determina si el campo disperso total en el punto observación puede aproximarse mediante formulaciones energéticas o si se producirán distintos lóbulos de dispersión espectral y direccional [1].

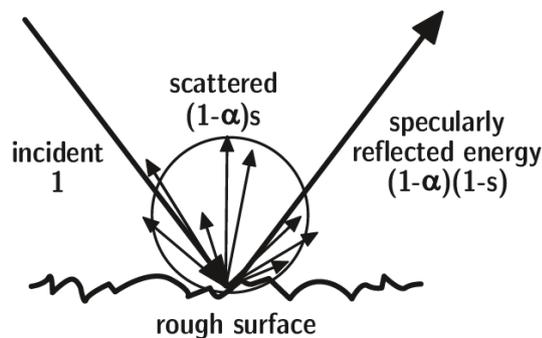


Figura 3.22. Energía reflejada desde una superficie rugosa con una parte especular y otra dispersa. (Vorländer 2008).

Como se observa en la Figura 3.22 las energías de las reflexiones pueden ser normalizadas con respecto a la onda incidente como se define en las siguientes ecuaciones (según Vorländer [1]):

$$E_{esp} = (1 - \alpha)(1 - s) \quad (3.81)$$

$$E_{dis} = (1 - \alpha)s \quad (3.82)$$

$$E_{total} = (1 - \alpha) \quad (3.83)$$

Donde:

E_{total} es por definición la energía total reflejada.

E_{esp} es la energía reflejada especularmente.

E_{dis} es la energía reflejada dispersa.

α es el coeficiente de absorción de la superficie.

s es llamado “coeficiente de dispersión” [2].

3.9.1. Dispersión en la Superficie del Agua

El coeficiente de reflexión en el agua (interfase agua-aire) con una superficie plana y uniforme es -1 (como lo indican Hoven [6] y Vorländer [1]). Sin embargo, para una superficie con ondas habrá una dispersión difusa en todas las direcciones que no sean la dirección especular, que dará como resultado una pérdida por reflexión, esta puede modelarse mediante el coeficiente de reflexión de la superficie rugosa coherente, como se muestra en la siguiente ecuación (de acuerdo con Kinsler [7] y Hoven [6]):

$$R_{coh} = (-1)e^{\left[-2\left(\frac{2\pi f}{c}\sigma_h \sin \theta_i\right)^2\right]} \quad (3.84)$$

Donde:

R_{coh} es el coeficiente de reflexión de la superficie del agua (interfase agua-aire).

f es la frecuencia.

c es la velocidad del sonido en el agua.

σ_h es el valor RMS de la rugosidad de la superficie [7].

θ_i es el ángulo de incidencia como se muestra en la Figura 3.23.

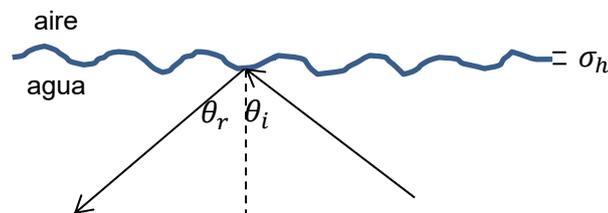


Figura 3.23. Reflexión especular sobre una superficie del agua con ondas de amplitud σ_h RMS, ángulo de incidencia θ_i y ángulo de reflexión especular θ_r .

De las ecuaciones (3.81) y (3.84) se puede deducir el coeficiente de dispersión como:

$$s = 1 - e \left[-4 \left(\frac{2\pi f}{c} \sigma_h \sin \theta_i \right)^2 \right] \quad (3.85)$$

3.9.2. Radiosidad

La reflexión es totalmente difusa en una superficie si la distribución direccional de la energía reflejada o dispersa no depende de la dirección del sonido incidente (según Kuttruff [2]). La energía reflejada de manera difusa desde una superficie se modela como irradiada desde la superficie con una distribución espacial particular, mayormente modelado de acuerdo con la ley de coseno de Lambert (de acuerdo con Cox [5]); como se muestra en la Figura 3.24.

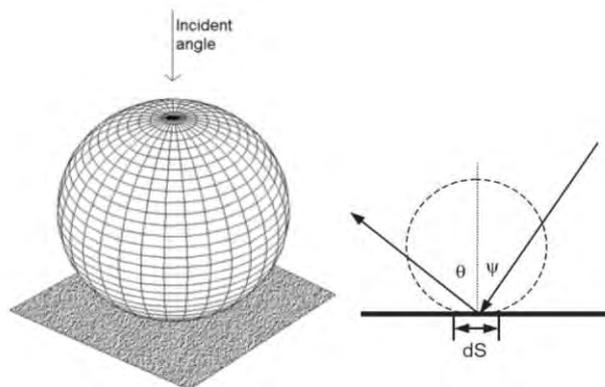


Figura 3.24. Dos vistas de la distribución de intensidad de Lambert, ángulo de incidencia ψ , ángulo de reflexión especular θ y elemento de área de la superficie dS . (Cox 2000).

Entonces, la intensidad del sonido que se dispersa I_d en una dirección caracterizada por un ángulo θ , medido en una distancia r del elemento del área dS estará dada por [2]:

$$I_d(r, \theta) = I \frac{dS \cdot \cos \psi \cdot \cos \theta \cdot (1 - \alpha) \cdot s}{\pi r^2} = I \frac{dS \cdot \cos \psi \cdot \cos \theta \cdot R^2 \cdot s}{\pi r^2} \quad (3.86)$$

Donde:

I es la intensidad que impacta en el elemento de superficie dS .

ψ es el ángulo de incidencia.

α es el coeficiente de absorción.

R es el coeficiente de reflexión de la presión.

s es el coeficiente de dispersión.

3.10. Espectro de la Función de Propagación de Reflexiones Difusas de Primer Orden

A continuación, se describe la ecuación para calcular el espectro de la función de propagación de las reflexiones difusas de primer orden, según el modelo propuesto en el proceso de síntesis y simulación campo sonoro del presente trabajo de tesis.

De la ecuación (3.86), (8.1) y (3.7) se deduce el espectro de la función de propagación para las reflexiones difusas para una fuente de onda esférica con factor de directividad D como:

$$H_l = \frac{e^{-jkr_l}}{r_{0l}(r_l - r_{0l})} \cdot D^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{dS \cdot \cos \psi_l \cdot \cos \theta_l \cdot s_l}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot R_l \quad (3.87)$$

Donde:

r_l es la distancia total desde el punto de recepción a la fuente reflejada.

r_{0l} es la distancia de la superficie dS a la fuente.

Si existen reflexiones especulares previas a la reflexión difusa de primer orden y se considera las pérdidas por absorción del medio de propagación, la ecuación (3.87) puede reescribirse como:

$$H_l = \frac{e^{-jkr_l}}{r_{0l}(r_l - r_{0l})} \cdot \left(\frac{dS \cdot \cos \psi_l \cdot S_l}{4\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot H_{Fuente} \cdot H_{Medio} \cdot H_{Lambert} \cdot \prod_{i=1}^{m_l} R_i \quad (3.88)$$

$$H_{Lambert} = 2\sqrt{\cos \theta_l} \quad (3.89)$$

Donde:

$H_{Lambert}$ es la función de directividad de la distribución dispersa de energía de las reflexiones difusas utilizando la ley de coseno de Lambert.

3.11. Modelamiento de la Fuente de Sonido y Receptor

En el presente apartado se define el modelo matemático para la simulación para la fuente de sonido en el proceso de síntesis del campo sonoro utilizando un pistón rígido, así como las ecuaciones que permiten calcular analíticamente sus parámetros y características. Del mismo modo se define del receptor y modelo matemático que lo representa.

Una fuente de sonido y un receptor son caracterizados por sus patrones de radiación o recepción, así como por su directividad [16][7]. La función de directividad de la fuente puede ser representada como:

$$H_{Fuente}(\theta, \phi, f) = \sqrt{D(f)} \cdot \Gamma(\theta, \phi, f) \quad (3.90)$$

Donde:

$D(f)$ es la directividad en función de la frecuencia f .

Γ es el factor de direccionalidad [7] en coordenadas de elevación θ y azimut ϕ de la fuente, cuyo valor máximo en el eje acústico siempre será uno ($\Gamma = 1$) [15].

El patrón de haz o patrón de directividad [16] está definido como la variación del nivel de intensidad (o nivel de presión) con el ángulo [7] como:

$$b(\theta, \phi) = 10 \log \left[\frac{I(r, \theta, \phi)}{I_{ax}(r)} \right] = 20 \log \left[\frac{P(r, \theta, \phi)}{P_{ax}(r)} \right] = 20 \log |\Gamma(\theta, \phi)| \quad (3.91)$$

Donde:

I es la intensidad a una distancia r de la fuente.

I_{ax} es la intensidad en el eje acústico.

P es la amplitud de la presión a una distancia r de la fuente.

P_{ax} es la amplitud de la presión en el eje acústico.

3.11.1. Factor de Directividad

La directividad o factor de directividad es la relación entre la intensidad en un eje acústico (donde la intensidad es máxima) de un radiador de sonido a una distancia determinada r y la intensidad que se produciría en la misma posición por una fuente puntual si irradiara la misma potencia acústica total (de acuerdo con Beranek [16]). Por definición, el factor de directividad se calcula como [16]:

$$D(f) = \frac{4\pi}{\int_0^{2\pi} \int_0^\pi |\Gamma(\theta, \phi, f)|^2 \sin \theta \, d\theta \, d\phi} \quad (3.92)$$

Para el caso especial donde el factor de direccionalidad Γ es independiente del valor de ϕ (hay un eje de simetría), la ecuación (3.92) se puede reescribirse como [16]:

$$D(f) = \frac{2}{\int_0^\pi |\Gamma(\theta, f)|^2 \sin \theta d\theta} \quad (3.93)$$

De forma discreta el factor de directividad puede ser calculado utilizando un numero N de muestras de ángulo de elevación (en radianes) como:

$$D(f) = \frac{2N}{\pi \sum_{n=0}^N |\Gamma(\theta_n, f)|^2 \sin \theta_n} \quad (3.94)$$

$$\theta_n = \frac{n\pi}{N} \quad (3.95)$$

3.11.2. Índice de Directividad

El índice de directividad DI estará dado por [15]:

$$DI = 10 \log D \quad (3.96)$$

3.11.3. Pistón Radiador en Plano Infinito

Un altavoz instalado en una pared es modelado utilizando un pistón rígido radiador en un plano infinito cuyo factor de direccionalidad estará dado por [15]:

$$\Gamma(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \quad (3.97)$$

Donde:

$J_1()$ es la función de Bessel de primer orden [15].

k es el número de onda.

a es el radio del pistón.

3.11.4. Modelo de Receptor

El receptor puede ser un micrófono cuyo factor de direccionalidad estará dado por [16]:

$$\Gamma(\theta) = \frac{1 + B \cos \theta}{1 + B} \quad (3.98)$$

Donde:

B es una constante que define la directividad de la función.

3.12. Auralización

A continuación, se define la auralización y su uso en la caracterización del espacio acústico en el proceso de simulación del campo sonoro de una piscina de nado sincronizado.

Una vez obtenida la respuesta impulsiva sintetizada del recinto subacuático, puede utilizarse esta información para realizar el proceso de convolución con un audio de prueba y de esta manera simular la experiencia de estar en el espacio acústico subacuático de forma virtualizada. La convolución puede darse en el dominio de la frecuencia utilizando la información espectral de una señal de prueba $S(f)$ y la información espectral de la respuesta impulsiva $H(f)$ representado por la siguiente ecuación:

$$A(f) = S(f) \cdot H(f) \quad (3.99)$$

Donde:

$H(f)$ es la respuesta impulsiva en el dominio de la frecuencia del recinto.

$S(f)$ es la transformada de Fourier una la señal de muestra $s(t)$.

$A(f)$ es la señal de salida en el dominio de la frecuencia.

La Figura 3.25 muestra la secuencia para un proceso de auralización monoaural utilizando la transformada de Fourier para una señal de entrada $s(t)$, convolución en frecuencia y transformada inversa de Fourier para la función de salida resultante $a(t)$.

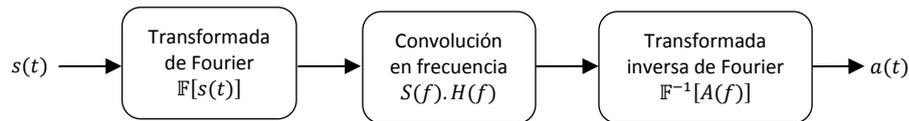


Figura 3.25. Secuencia de convolución de auralización monoaural, con $s(t)$ como la señal de muestra de entrada, $S(f)$ la transformada de Fourier de $s(t)$, $H(f)$ la respuesta impulsiva del recinto en el dominio de la frecuencia, y $a(t)$ la señal de salida siendo la transformada inversa de Fourier de $A(f)$, como resultado de la convolución entre $S(f)$ y $H(f)$.

En el presente trabajo de tesis se desarrolla un proceso de auralización monoaural, utilizando un solo canal de audio en el proceso de convolución.

3.13. Acústica de Recintos

En el presente apartado se describe la acústica de recintos y los parámetros que se utilizarán en el proceso de caracterización de la acústica al interior del vaso de la piscina de nado sincronizado, utilizando para ello la respuesta impulsiva sintetizada del campo sonoro simulado y parámetros acústicos calculados analíticamente.

La acústica de recintos abarca una extensa lista de parámetros que caracterizan el comportamiento del campo sonoro en espacios cerrados y una serie de técnicas de medición para obtener dicha información. Además, el propósito del estudio de la acústica de recintos es el control de fenómenos (producto de las reflexiones) como: eco, flutter echo, reverberación, etc., mediante condiciones de los límites del recinto como pueden ser: la forma del recinto y los materiales de acabado; y así crear un entorno acústico satisfactorio [18]. El efecto más dominante de la audición en los recintos es la sensación de reverberación, por tanto, el tiempo de reverberación como su dependencia de

la frecuencia es la magnitud más importante para la caracterización de la acústica de los recintos [1].

Se describen a continuación los parámetros acústicos e información relacionada a la acústica de recintos, que serán utilizados en el proceso de análisis y caracterización del campo sonoro al interior de la piscina de nado sincronizado.

3.13.1. Respuesta Impulsiva Energética

La respuesta de un recinto a la excitación con un impulso ideal permite hacer una interpretación acústica del espacio [1], esta puede ser representado en una gráfica de energía versus tiempo donde la densidad de pulsos de energía va en aumento con el tiempo mientras su magnitud decrece en función de la absorción del medio de propagación.

La magnitud de la densidad de energía puede ser calculada utilizando como referencia la densidad de energía a 1m (un metro) de una fuente omnidireccional con la misma potencia de excitación.

De acuerdo con la ecuación (3.78) se tendrá que:

$$\frac{E}{E_0} = |H(f)|^2 \quad (3.100)$$

Donde:

E es la densidad de energía en el receptor para una frecuencia f .

E_0 es la densidad de energía de referencia.

El nivel de densidad de energía puede ser calculado utilizando la ecuación (8.10). Para bandas de frecuencia la ecuación (3.100) se puede reescribir como:

$$\frac{E}{E_0} = \sum_{m=1}^M \left(\frac{\Delta f_m}{B} \right) |H(f_m)|^2 \quad (3.101)$$

$$B = \sum_{m=1}^M \Delta f_m \quad (3.102)$$

Donde:

f_m es la frecuencia central.

Δf_m es el ancho de banda.

B es el ancho de banda total.

3.13.2. Respuesta de Impulso Integrado

El método de respuesta de impulso integrado o “Integración invertida” [2] fue propuesto por Schroeder. Es utilizado para calcular la curva de decaimiento [1], calcular el “tiempo de decaimiento temprano” (EDT) y estimar el tiempo de reverberación. El método se basa en la integración de la respuesta impulsiva energética total y la substracción consecutiva de pulsos en función del tiempo como [2]:

$$h^2(t) = \int_0^\infty |H(\tau)|^2 d\tau - \int_0^t |H(\tau)|^2 d\tau = \int_t^\infty |H(\tau)|^2 d\tau \quad (3.103)$$

Donde:

h^2 es la curva de decaimiento.

Este proceso se realiza para cada banda de frecuencia.

3.13.3. Frecuencia de Schroeder

El valor de la frecuencia de Schroeder determina el límite entre la región de baja frecuencia, dominada por modos acústicos separados que son analizados como energía de ondas (resonancias) y la región de frecuencias altas, dominada por una densa superposición modal con propiedades estadísticas gaussianas (campos difusos), donde puede validarse los resultados de simulación y análisis basados en la acústica geométrica al considerar la propagación del sonido a través de rayos acústicos [7] y sus correspondientes reflexiones.

La frecuencia de Schroeder es determinada como (según Hopkins [17]):

$$f_s = \sqrt{\frac{3Tc^3}{8.8\pi V}} \quad (3.104)$$

Donde:

f_s es la frecuencia de Schroeder.

T es el tiempo de reverberación.

c la velocidad del sonido.

V es el volumen del recinto.

3.13.4. Modos Locales

El campo sonoro modal definido por los modos de resonancia del recinto, puede ser caracterizado por sus frecuencias de modo [17]. Para un recinto con forma de paralelepípedo rectangular (de acuerdo con Kuttruff [2]) las frecuencias de modo o "frecuencias propias" son determinadas como (de acuerdo con la Figura 3.26) [2]:

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad (3.105)$$

Donde:

n_x , n_y y n_z pueden tomar valores de cero a un valor entero positivo.

L_x , L_y y L_z son las dimensiones del recinto.

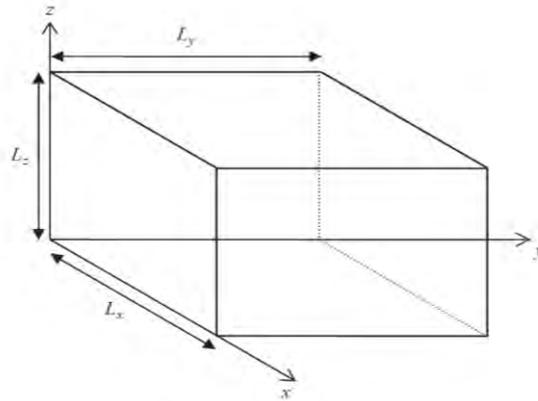


Figura 3.26. Recinto en forma de caja (paralelepípedo rectangular). (Hopkins 2007).

3.13.5. Tiempo de Reverberación

A continuación, se describe el tiempo de reverberación el cual permitirá calcular analíticamente (en el presente trabajo de tesis) parámetros como la frecuencia de Schroeder y el tiempo máximo de simulación (truncamiento), del mismo modo este será un valor de comparación con los resultados que se obtengan del decaimiento energético utilizando la respuesta impulsiva sintetizada del recinto.

La reverberación es la permanencia del sonido una vez una fuente a dejado de emitirlo, este fenómeno es producido por las reflexiones de sonido en un espacio cerrado, entonces, el tiempo en el que la energía de sonido disminuye en 60dB es definido como el tiempo de reverberación.

En el presente trabajo de investigación se ha seleccionado una ecuación que permite calcular de forma analítica el tiempo de reverberación, al mismo tiempo permite introducir parámetros como la velocidad del sonido ajustado al medio

de propagación como es el agua, así como utilizar el coeficiente de absorción de incidencia aleatoria definido en el sección 3.5.3, en ese sentido, se define una ecuación (descrita de forma general por Kuttruff [2]) para el cálculo del tiempo de reverberación basado en un modelo de recinto en forma de paralelepípedo rectangular en el cual se ha asumido un decaimiento energético de 60dB, esta ecuación está representada como [2]:

$$T = \frac{1}{c} \left(\frac{24V \ln 10}{4\alpha_t V - S \ln(1 - \bar{\alpha})} \right) \quad (3.106)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \alpha_i \quad (3.107)$$

Donde:

V es el volumen del recinto.

c es la velocidad del sonido.

α_t es el coeficiente de absorción del medio de propagación según la ecuación (3.48).

$\bar{\alpha}$ es el coeficiente medio de absorción del recinto.

α_i es el coeficiente de absorción (de incidencia aleatoria, definida en la sección 3.5.3) de la superficie de área S_i .

S es el área total.

El tiempo de reverberación expresado en la ecuación (3.106) es calculada para cada banda de frecuencia.

3.13.6. Inteligibilidad de la Palabra

A continuación, se definen los parámetros que serán utilizados para describir la inteligibilidad de la palabra en el proceso de caracterización del campo sonoro al interior de la piscina de nado sincronizado.

Uno de los aspectos más importantes en la acústica de recintos es el estudio de la inteligibilidad de la palabra. Ya sea que un discurso sea entendido por los oyentes o la música en ejecución esté acondicionada de forma “adecuada”. Si bien esta información puede ser subjetiva (dependiendo del oyente) [2], se han realizado diferentes esfuerzos para medir de forma objetiva la inteligibilidad de la palabra utilizando diferentes parámetros que la caractericen y representen, pudiendo incluso estar relacionados.

La relación energética de las reflexiones y señal directa juega un papel importante en la inteligibilidad de la palabra [1]. De modo que, definido parámetros como: “definición”, “índice de claridad” o “tiempo central”, que basan su criterio en el análisis de la respuesta impulsiva o ecograma del recinto, extraen información útil para caracterizarlo.

El parámetro “definición” caracteriza el efecto de las primeras reflexiones, las cuales apoyan a la inteligibilidad de la palabra [1]. Su ecuación está dada por [2]:

$$D = \left[\frac{\int_0^{50ms} [g(t)]^2 dt}{\int_0^{\infty} [g(t)]^2 dt} \right] \times 100\% \quad (3.108)$$

El “índice de claridad” intenta caracterizar la transparencia de la música en una sala de concierto [1], donde se define C_{80} para la música y C_{50} para el habla. Su ecuación está dada por [2]:

$$C_{80} = 10 \log \left[\frac{\int_0^{80ms} [g(t)]^2 dt}{\int_{80ms}^{\infty} [g(t)]^2 dt} \right] \quad (3.109)$$

El parámetro “tiempo central” también caracteriza la claridad del habla y la música. Su ecuación está definida por [2]:

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} [g(t)]^2 t dt}{\int_0^{\infty} [g(t)]^2 dt} \quad (3.110)$$

Otros parámetros que se aproximan a describir la inteligibilidad de la palabra son el STI (Speech Transmission Index) y el RASTI (Rapid Speech Transmission Index), que basan su análisis en la evaluación de la modulación de la señal del habla y su cambio debido a la reverberación y ruido de fondo del recinto. Para determinar el STI es necesario calcular el MTF (Modulation Transfer Function) para siete bandas de frecuencia en octavas desde 125Hz a 8KHz, mientras que el RASTI requiere sólo dos bandas de frecuencia en octavas de 500Hz y 2KHz, siendo este una versión corta del STI.

Los valores obtenidos de STI y RASTI se relacionan con la inteligibilidad de la palabra con valores que van de 0 a 1, la Tabla 3.1 muestra los rangos que caracterizan de forma cualitativa los valores de STI y RASTI.

Escala subjetiva	Valor STI / RASTI
Bad	0.00 – 0.30
Poor	0.30 – 0.45
Fair	0.45 – 0.60
Good	0.60 – 0.75
Excellent	0.75 – 1.00

Tabla 3.1. Relación de valores STI e inteligibilidad de la palabra.

Los valores de los parámetros como “definición”, “índice de claridad” y “tiempo central” serán calculados utilizando software de simulación propuesto para su desarrollo y uso en el proceso de síntesis del campo sonoro de la piscina de nado sincronizado, mientras que, los valores STI y RASTI serán calculados utilizando el software Dirac [45] y la respuesta impulsiva sintetizada resultante obtenida con el software de simulación propuesto para su desarrollo en el presente trabajo de tesis.

CAPÍTULO 4

DETERMINACIÓN ANALÍTICA DEL ESPACIO ACÚSTICO DE UNA PISCINA DE COMPETENCIAS DE NADO SINCRONIZADO

4.1. Introducción

En el presente capítulo se hace una descripción analítica del espacio acústico al interior de una piscina de nado sincronizado para competencias olímpicas, mostrando sus elementos y características particulares. Se hace referencia a instituciones y normas que regulan la disciplina del nado sincronizado como son la FINA (Federación Internacional de Natación), FDPN (Federación Deportiva Peruana de Natación) y RFEN (Real Federación Española de Natación); cuya información es utilizada para definir las dimensiones del interior del vaso de la piscina, las características que debe cumplir los dispositivos de reproducción de audio, la temperatura del agua, así como el espacio que deben ocupar los competidores al interior de la piscina.

A continuación, se desarrollan los siguientes análisis al interior de la piscina de nado sincronizado: refracción del sonido, cálculo de la velocidad de propagación, coeficientes de reflexión y absorción (en los límites del vaso de las interfaces: agua-aire y agua-sólido), dispersión del sonido en la superficie de la interfase agua-aire, patrón de radiación de las fuentes de sonido, así como el cálculo de los parámetros acústicos del recinto que son determinados analíticamente.

4.2. Características de Diseño de Piscina de Nado Sincronizado

Las dimensiones del campo de juego para la natación sincronizada en los juegos olímpicos y campeonatos del mundo para la modalidad de rutinas según reglamentos de la FINA, FDPN y RFEN estarán dados según se describe en la Tabla 4.1.

Dimensiones	Medidas	Descripción
Zona de rutina	12mx12m	Zona de ejecución de las rutinas del nado sincronizado.
Profundidad mínima	1.8m	Profundidad mínima para la ejecución de las rutinas de nado sincronizado.
Profundidad mínima recomendada	3m	Profundidad mínima para la ejecución de las rutinas de nado sincronizado para juegos olímpicos y campeonatos del mundo.
Área del vaso mínimo	12mx25m	Área de la superficie de la piscina mínima.
Área del vaso máximo	20mx30m	Área de la superficie de la piscina máxima.
Resto de profundidades	1.8m	Profundidad mínima del resto del fondo de la piscina
Resto de profundidades recomendadas	2.5m	Profundidad mínima del resto del fondo de la piscina para juegos olímpicos y campeonatos del mundo.
Transición mínima	8m	Distancia mínima de transición entre profundidades (entre zona de ejecución de rutinas y resto de profundidades).

Tabla 4.1. Características de las dimensiones de la piscina para la competencia de nado sincronizado.

La Figura 4.1 describe las dimensiones de la piscina requeridas para la ejecución de la rutina de nado sincronizado según los requisitos establecidos en los juegos olímpicos y campeonatos del mundo (según FINA[27] y RFEN [30]).

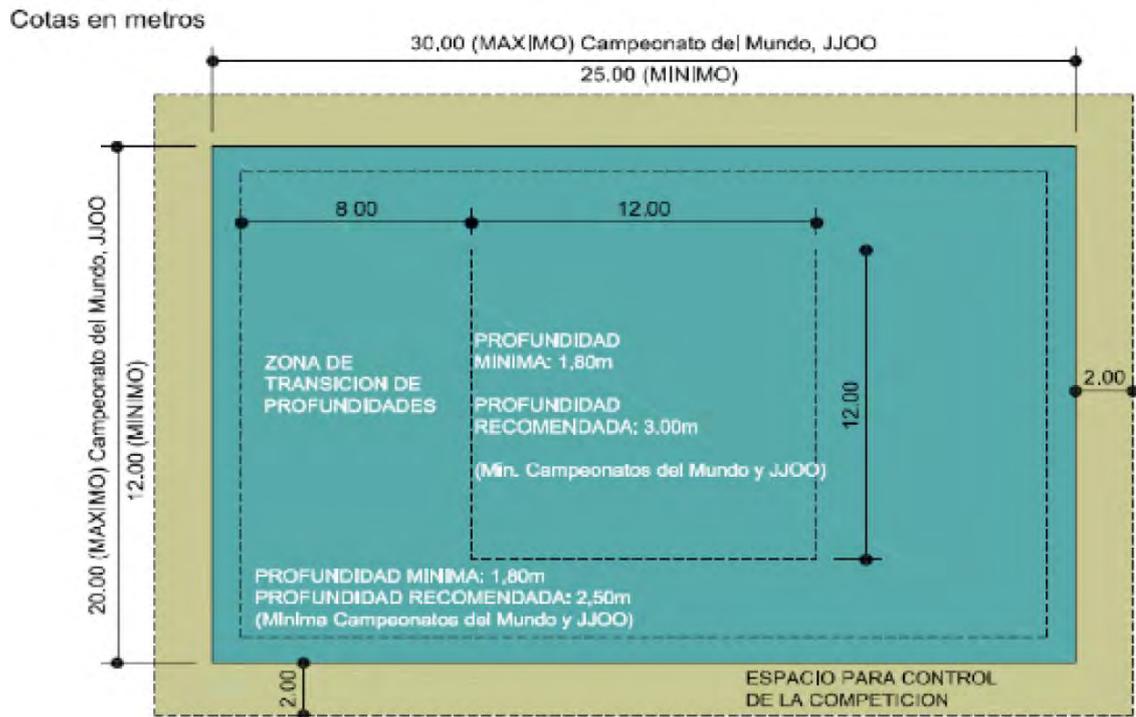


Figura 4.1. Dimensiones requeridas de la piscina para la ejecución de la rutina de nado sincronizado. (RFEN 2019).

El vaso de la piscina puede ser diseñado con paredes y fondo completamente rectangular o con un fondo compuesto por niveles graduales con pendientes reguladas según se indica en la Tabla 4.1 y según se muestra en la Figura 4.1.

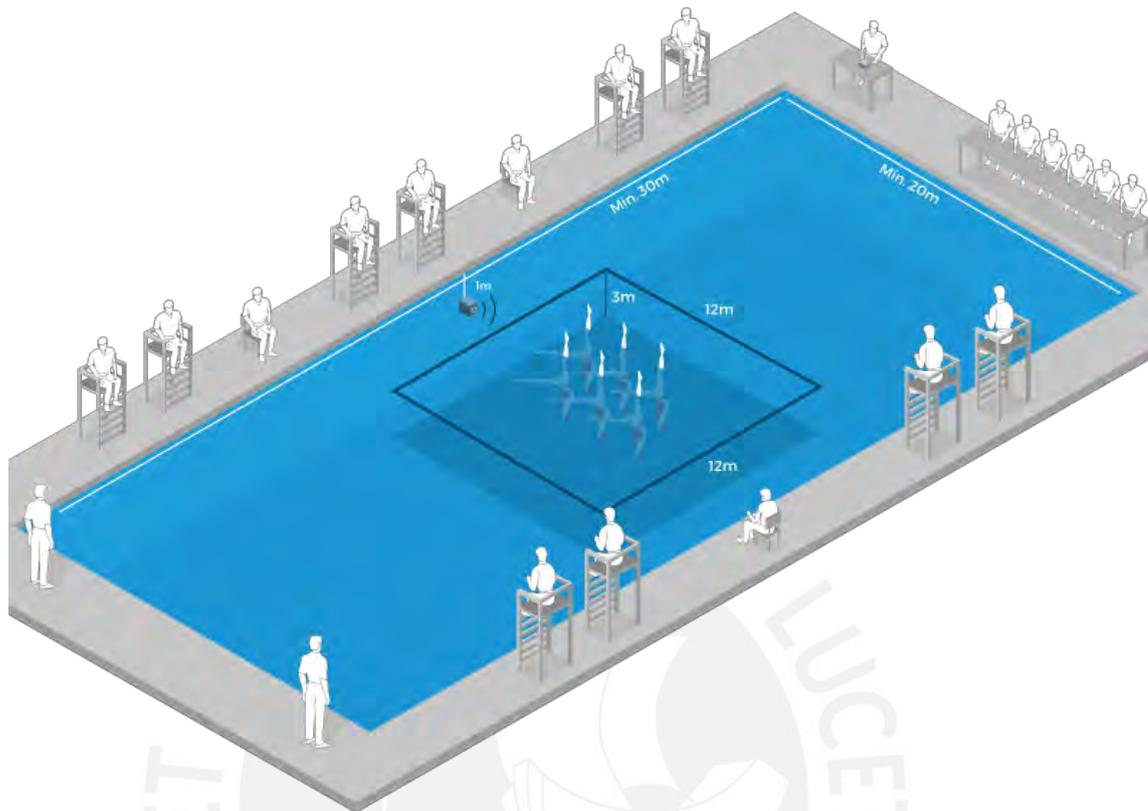


Figura 4.2. Dimensiones de la piscina de nado sincronizado en la modalidad de rutinas. (MARCA 2016).

La Figura 4.2 muestra un diseño de piscina para nado sincronizado en modalidad de rutinas para un área de vaso de 30mx20m y una profundidad de 3m, que se utilizará en adelante para la caracterización del campo acústico y en el proceso de simulación.

4.2.1. Especificaciones de Temperatura

La temperatura al interior de la piscina no deberá ser menor a $27^{\circ}\pm 1^{\circ}\text{C}$ [27] y la temperatura del aire será entre 1°C y 2°C superior a la del agua, por razones técnicas y fisiológicas con un máximo de 28°C [30].

4.2.2. Altavoces Subacuáticos

Según la RFEN los altavoces subacuáticos o UWS (Under Water Speaker) deberán: "...obtener un sonido claro y uniforme bajo el agua por encima de cualquier ruido de interferencia y con niveles aceptables para los competidores" (RFEN 2019). FINA establece las características para los UWS como [27]:

- Deberá ser capaz de producir 98dB A sin distorsión.
- El máximo valor de SLP no deberá exceder 110dB SPL A.
- La respuesta en frecuencia deberá estar ser al menos de 200Hz a 10KHz.

La Figura 4.3 muestra los diferentes tipos de UWS del tipo portátil y tipo empotrado, que se instalan en las paredes de las piscinas a una profundidad determinada. La mayoría de los altavoces son fabricados con discos piezoeléctricos con diámetros que van desde 200mm a 280mm, y respuesta en frecuencia en el rango de 100Hz a 20KHz.



Figura 4.3. Diferentes modelos de altavoces subacuáticos o UWS (Under Water Speaker). (a) Altavoces del tipo portátil, (b) Altavoces del tipo empotrado. (Imágenes: LUBEL LAB'S [33], OCEANEARS [35], CLARKSYNTHESIS [34], KHZ TECHNOLOGIES [36]).

Instalación de Altavoces

Según recomendaciones de los fabricantes de UWS estos pueden ser instalados en el rango de 0.5m a 2m de profundidad, la Figura 4.4 muestra la instalación de altavoces UWS portátiles en una piscina de nado sincronizado.

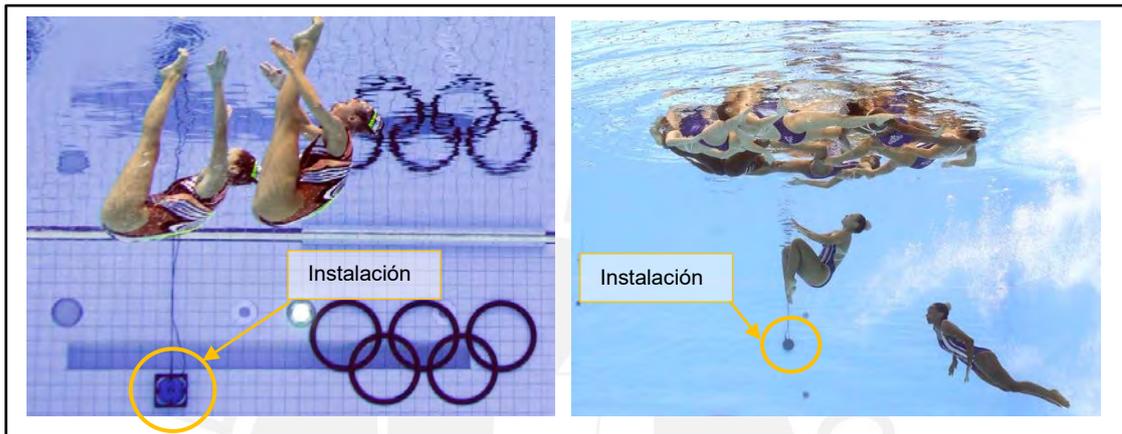


Figura 4.4. Instalación de altavoces UWS portátiles en una piscina de nado sincronizado. Fotografías de nado sincronizado (ISIDER, www.insider.com).

La Figura 4.5 muestra los detalles para la instalación de un altavoz empotrado en la pared de la piscina.

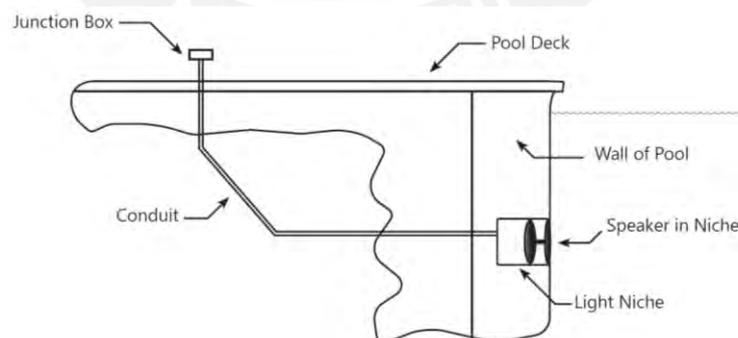


Figura 4.5. Instalación de altavoces UWS empotrado en la pared de la piscina. (CLARKSYNTHESIS, www.clarksynthesis.com).

4.3. Determinación de la Zona de Audición

La zona de audición puede ser determinada por la zona reglamentaria en la que se ejecutan las rutinas del nado sincronizado. La Figura 4.6 muestra el área delimitada de 12mx12m (según la FDPN [29]) en la que se ejecutan las rutinas.

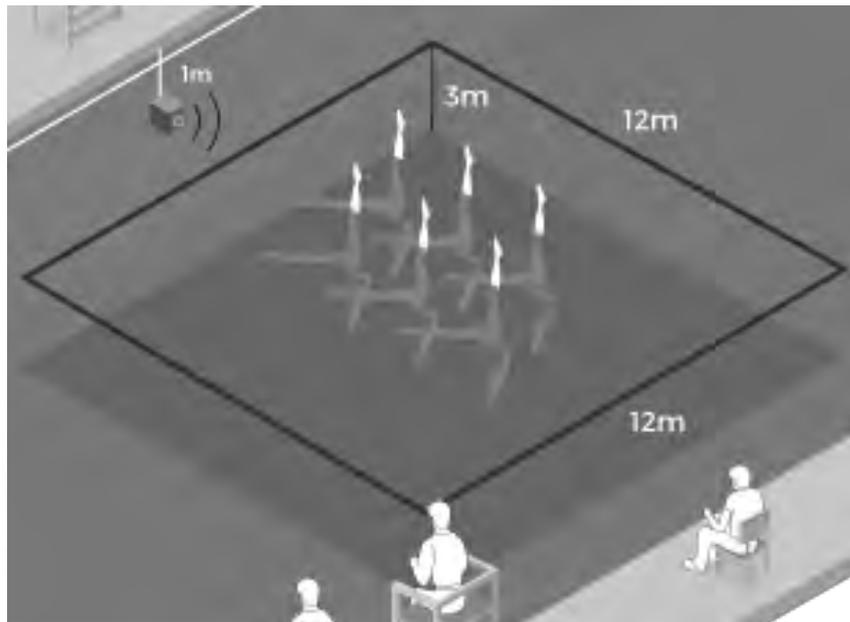


Figura 4.6. Zona de ejecución de las rutinas de nado sincronizado. (MARCA 2016).

La profundidad estará determinada por la posición (de acuerdo con la FINA [28]) que se esté ejecutando en las rutinas. Como ejemplo en la Figura 4.7 se muestran algunas posiciones básicas en la ejecución de rutinas y la profundidad aproximada del punto de audición. Las posiciones del punto de audición pueden variar desde el borde de la superficie del agua hasta estar completamente sumergido, por ejemplo: aplicando técnica del “Delfin” [28] se puede alcanzar una profundidad de 2.5m (dependiendo del tamaño del nadador).

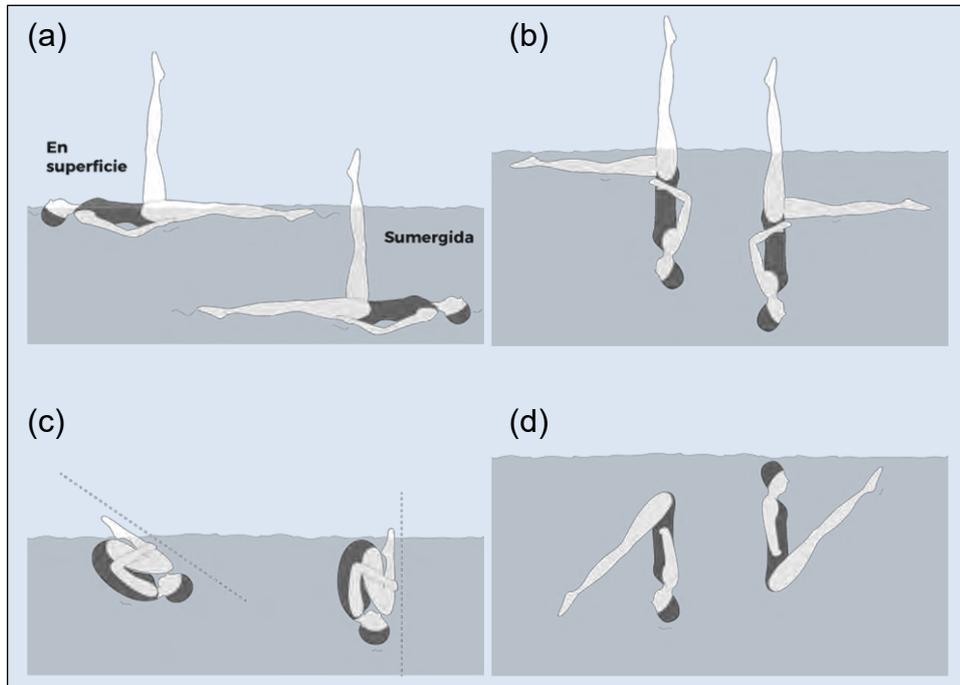


Figura 4.7. Algunas posiciones básicas en ejecución de rutinas de nado sincronizado. (a) Posición de la pierna de ballet en superficie (0.04m) y sumergida (0.6m), (b) posición de la grúa (0.8m y 1.05m), (c) posición encogida (0.24m y 0.5m), (d) posición carpa de espalda (0.95m y 0.12m). (Ilustración: MARCA 2016)

4.4. Cálculo de la Velocidad del Sonido

La velocidad del sonido en el agua al interior de la piscina estará en función de la profundidad y temperatura, esta es calculada de acuerdo con la ecuación (3.17) y representada en la Figura 4.8 para diferentes valores de profundidad y de temperatura.

La Figura 4.8 muestra los resultados del cálculo de la velocidad del sonido asumiendo un gradiente de temperatura de $-0.666^{\circ}/m$, iniciando en $28^{\circ}C$ a una profundidad de 0m (en la superficie de la piscina) hasta una profundidad máxima de 3m (fondo de la piscina). Esto representa una temperatura máxima superficial recomendada por la FINA y un valor interior de la piscina hipotético de $26^{\circ}C$ a 3 metros de profundidad.

Con el gradiente de temperatura se logra una variación de temperatura de 28°C a 0m de profundidad y 26°C a 3m. A una profundidad de 1.5m se tendría una temperatura de 27°C y una velocidad del sonido calculada de 1502.17m/s.

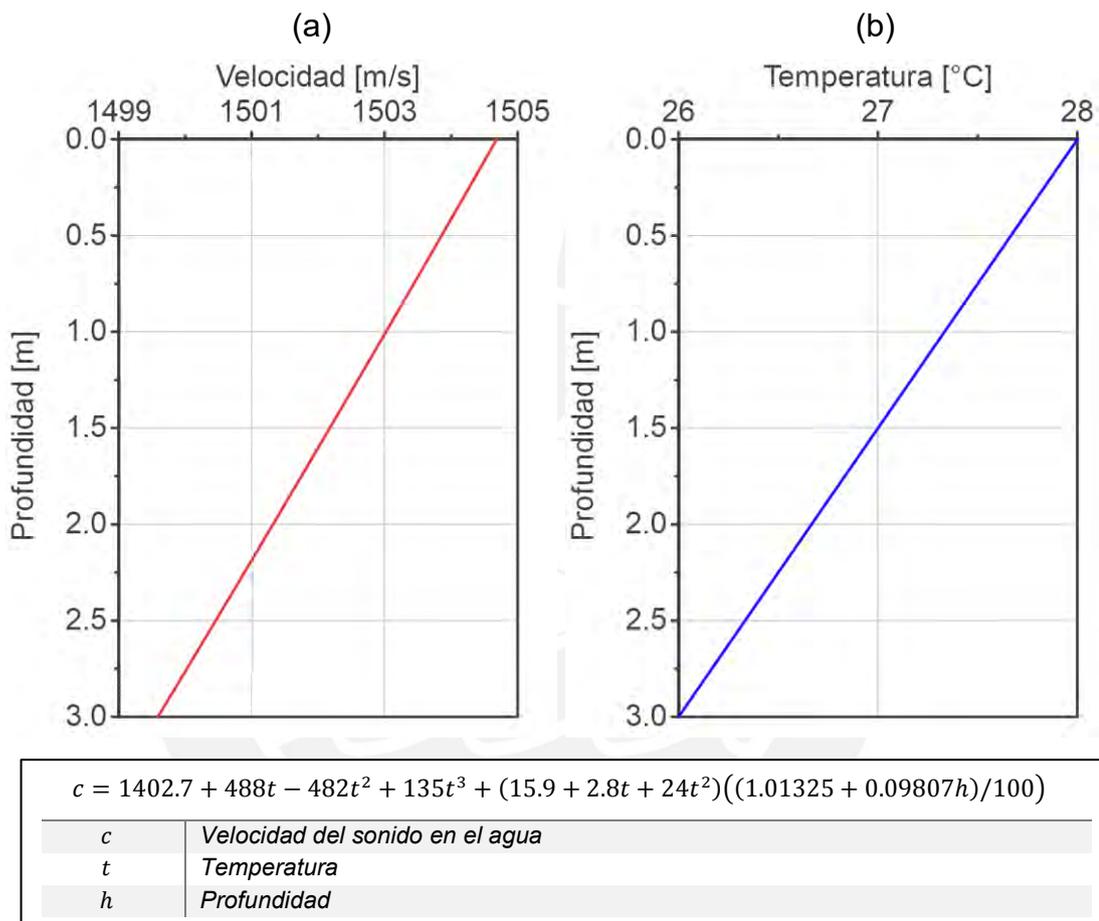
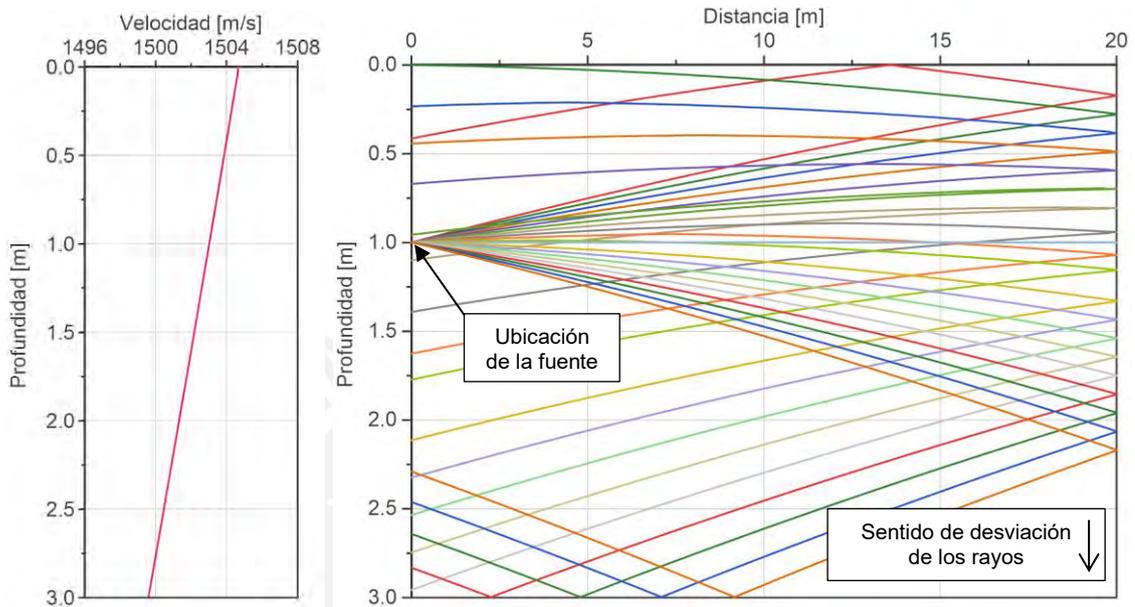


Figura 4.8. Variación de la velocidad del sonido para un gradiente de temperatura de $-0.666^\circ/\text{m}$ con una temperatura inicial de 28°C a 0m (en la superficie de la piscina) y una profundidad máxima de 3m (fondo de la piscina). (a) Velocidad del sonido versus profundidad, (b) Temperatura versus profundidad.

4.5. Análisis de Refracción

Para el análisis de refracción se considera una fuente de sonido colocada a 1m de profundidad, con 3m de profundidad del fondo de piscina y pared lateral de 20m de distancia. La Figura 4.9 muestra los efectos de refracción de los rayos de sonido que salen de la fuente para un gradiente de velocidad

aproximadamente constante de -1.69 s^{-1} de acuerdo a lo calculado en la sección 4.4.



$$r_{i+1} - r_i = \frac{1}{\xi g_i} \left[\sqrt{1 - \xi^2 c_i^2} - \sqrt{1 - \xi^2 c_{i+1}^2} \right], \quad g_i = \frac{c_{i+1} - c_i}{\Delta h}, \quad \xi = \frac{\cos \theta(h)}{c(h)}$$

c	Velocidad del sonido en el agua para una profundidad específica
r	Distancia recorrida por el rayo hacia la pared
h	Profundidad recorrida por el rayo
ξ	Parámetro del rayo constante para un recorrido en particular
θ	Ángulo de inicio de proyección del rayo
g	Gradiente de velocidad en función de la profundidad
i	Secuencia de avance del rayo

Figura 4.9. Ecuaciones y cálculo de refracción de rayos de sonido en una piscina de nado sincronizado para una gradiente de velocidad aproximada constante de -1.69 s^{-1} . Fuente ubicada a 1m de profundidad, profundidad máxima de piscina de 3m, pared lateral a 20m de distancia.

Los rayos son refractados “ligeramente” hacia abajo de acuerdo a los mostrado en la sección 3.7 (Figura 3.7 (c)) para gradientes de velocidad negativa, no siendo un efecto muy significativo según los resultados mostrados en la Figura 4.9. Por lo tanto, estos efectos pueden despreciarse considerando que los rayos viajan de forma rectilínea, permitiendo la implementación del modelo de trazado de rayos acústicos como se describe en la sección 3.8.1.

4.6. Análisis del Patrón de Radiación de la Fuente

Los altavoces subacuáticos UWS son modelados en la presente tesis como pistones rígidos radiadores en un plano infinito cuyo factor de direccionalidad está definido por la ecuación (3.97) y representado en las figuras: Figura 4.10 y Figura 4.11.

La Figura 4.10 muestra el patrón de haz y los índices de directividad a diferentes frecuencias para un UWS con radio de disco de 100mm (diámetro 200mm).

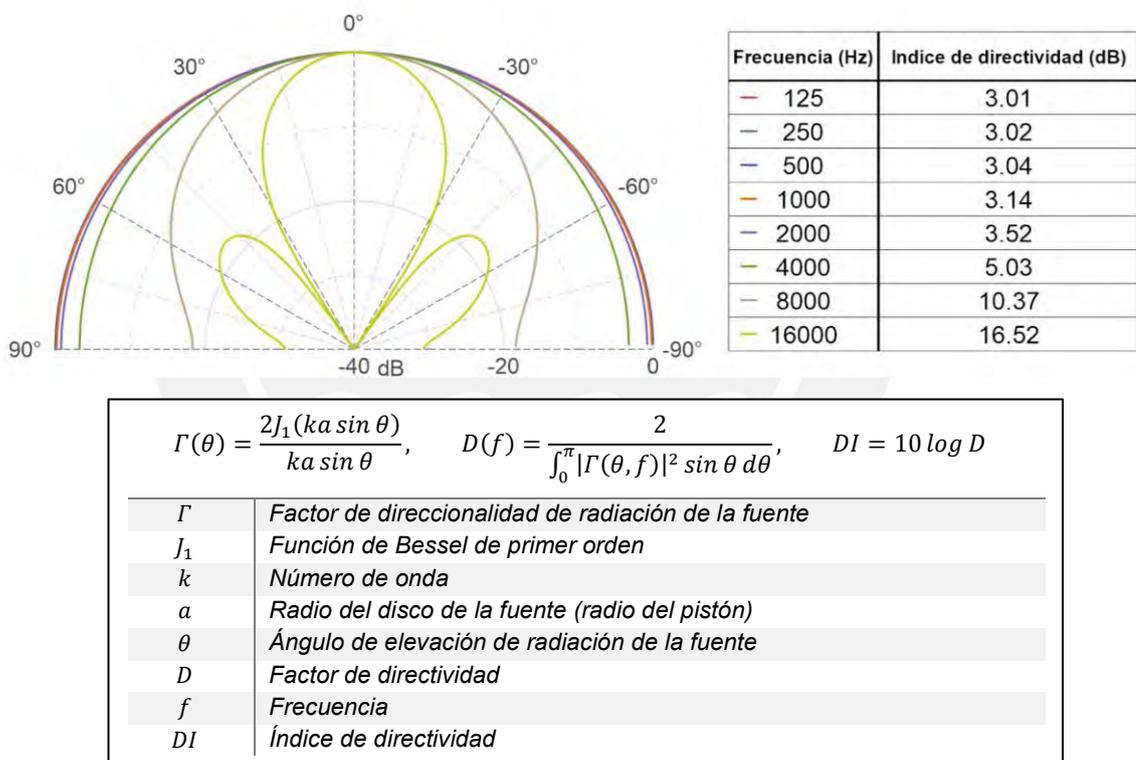
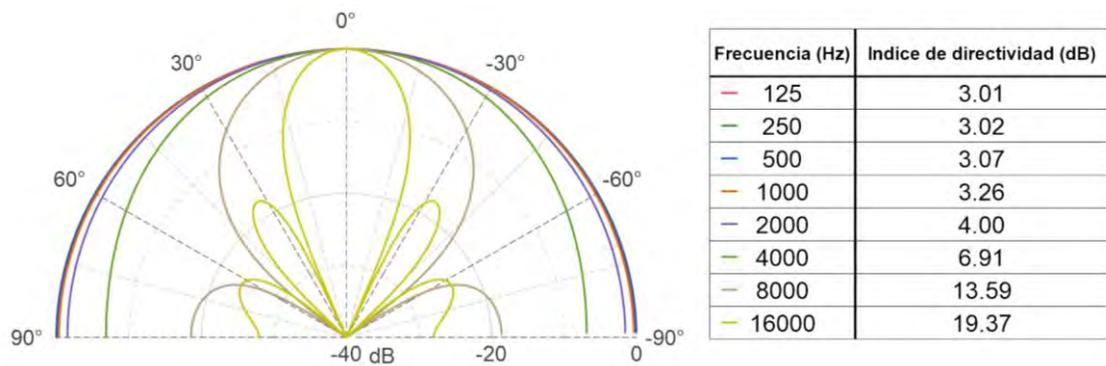


Figura 4.10. Patrón de haz e índices de directividad a diferentes frecuencias para un UWS con radio de disco de 100mm.



$$\Gamma(\theta) = \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta}, \quad D(f) = \frac{2}{\int_0^\pi |\Gamma(\theta, f)|^2 \sin \theta d\theta}, \quad DI = 10 \log D$$

Γ	Factor de direccionalidad de radiación de la fuente
J_1	Función de Bessel de primer orden
k	Número de onda
a	Radio del disco de la fuente (radio del pistón)
θ	Ángulo de elevación de radiación de la fuente
D	Factor de directividad
f	Frecuencia
DI	Índice de directividad

Figura 4.11. Patrón de haz e índices de directividad a diferentes frecuencias para un UWS con radio de disco de 140mm.

La Figura 4.11 muestra el patrón de haz y los índices de directividad a diferentes frecuencias para un UWS con radio de disco de 140mm (diámetro 280mm). Como se observa el índice de directividad aumenta conforme aumenta la frecuencia, del mismo modo al aumentar del radio del disco. Los pistones radiadores han sido modelados como pistones rígidos, ya que de otra manera se tendría que considerar los modos de vibración en la superficie del disco real para valores de $ka > 1$, los cuales afectarían al patrón de radiación.

4.7. Análisis de Reflexión y Absorción

El análisis abarca los cálculos de los coeficientes de reflexión de presión de sonido, reflexión de intensidad y absorción en las superficies de las interfaces agua-aire y aire-agua; así como los cálculos de los coeficientes de reflexión de presión de sonido, reflexión de intensidad y absorción en las paredes del interior de la piscina, considerado como interfase agua-sólido.

4.7.1. Interfase agua-aire

La reflexión de presión del sonido en la interfase agua-aire puede ser modelado utilizando la ecuación (3.32) correspondiente a reflexiones entre fluidos, representado en el esquema de la Figura 4.12.

La Figura 4.13 muestra el coeficiente de reflexión de presión (magnitud y fase), y la Figura 4.14 el coeficiente de reflexión de intensidad y absorción en la interfase, según los parámetros mostrados en la Tabla 4.2 para una temperatura de 28°C y diferentes ángulos de incidencia.

Parámetro	Valor	Descripción
T	28°C	Temperatura en la interfase agua-aire.
c_{aire}	348.1 m/s	Velocidad del sonido en el aire a 28°C.
c_{agua}	1504.7 m/s	Velocidad del sonido en el agua a 28°C y profundidad de 0m (superficie).
ρ_{aire}	1.172 kg/m ³	Densidad del aire a 28°C.
ρ_{agua}	996.25 kg/m ³	Densidad del agua a 28°C.
z_{aire}	407.97 Pa.s/m	Impedancia característica del aire a 28°C.
z_{agua}	1.499x10 ⁶ Pa.s/m	Impedancia característica del agua a 28°C.

Tabla 4.2. Parámetros de la interfase agua-aire.

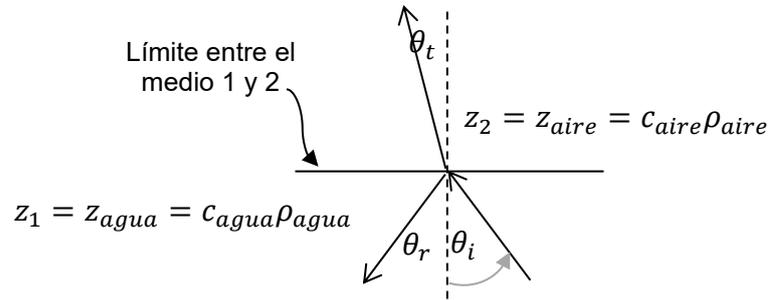
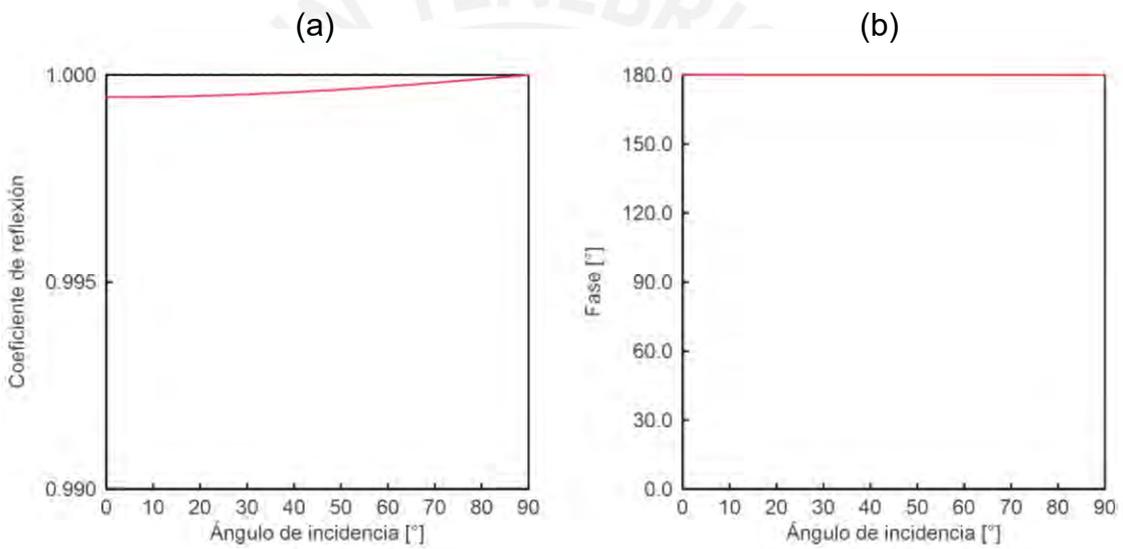


Figura 4.12. Esquema de reflexión y transmisión del sonido para una onda plana de incidencia oblicua en un límite plano de la interfase agua-aire.



$$R = \frac{z_2 / \cos \theta_t - z_1 / \cos \theta_i}{z_2 / \cos \theta_t + z_1 / \cos \theta_i}, \quad \frac{\sin \theta_i}{c_1} = \frac{\sin \theta_t}{c_2}$$

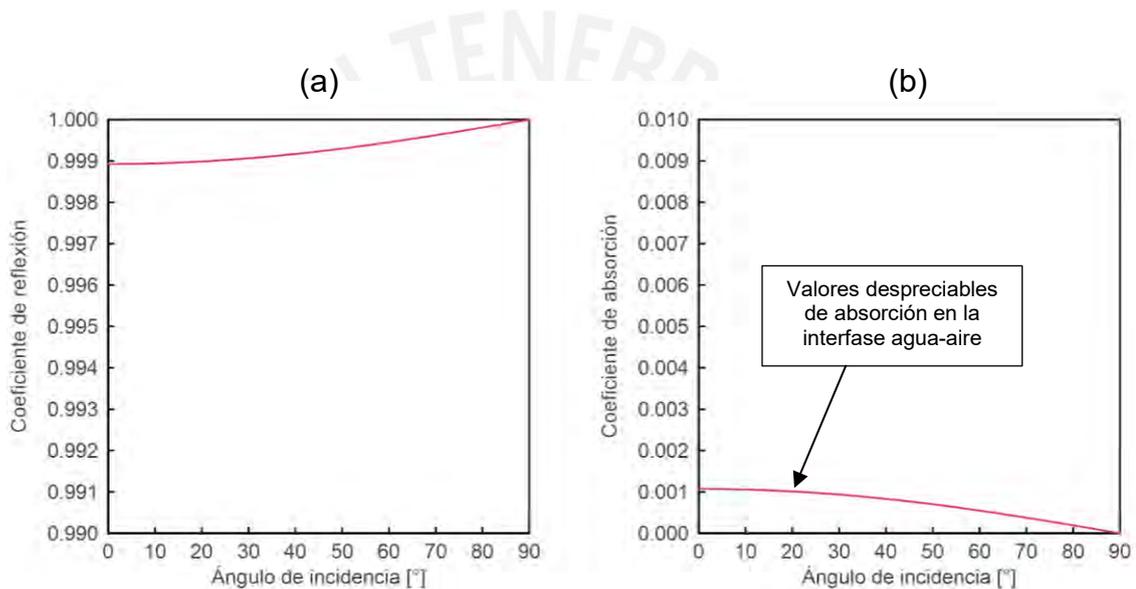
R	Coefficiente de reflexión de presión
z_1	Impedancia del medio 1 ($z_{agua} = c_{agua}\rho_{agua}$)
z_2	Impedancia del medio 2 ($z_{aire} = c_{aire}\rho_{aire}$)
θ_i	Ángulo de incidencia
θ_t	Ángulo de transmisión
c_1	Velocidad del sonido del medio 1 (c_{agua})
c_2	Velocidad del sonido del medio 2 (c_{aire})

Figura 4.13. (a) Coeficiente de reflexión de presión y (b) fase en función del ángulo de incidencia en la interfase agua-aire para una temperatura de 28°C. La fase tiene un valor constante de 180° (le da el signo negativo a la reflexión).

De acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 4.13, el coeficiente de reflexión de presión del sonido de la interfase agua-aire puede ser aproximado

un valor de -1 debido a su valor de magnitud y de fase (180°), el cual no posee ángulo crítico y/o de intromisión.

La Figura 4.14 muestra los valores del coeficiente de reflexión de intensidad de sonido y absorción en la interfase agua-aire, con valores despreciables de absorción en función de los ángulos de incidencia del sonido, cuyo valor máximo se aproxima a 0.001 para un ángulo de incidencia de 0°.



$R = \frac{z_2 / \cos \theta_t - z_1 / \cos \theta_i}{z_2 / \cos \theta_t + z_1 / \cos \theta_i}, \quad \frac{\sin \theta_i}{c_1} = \frac{\sin \theta_t}{c_2}, \quad \alpha = 1 - R ^2$	
R	Coeficiente de reflexión de presión
$ R ^2$	Coeficiente de reflexión de intensidad de sonido
α	Coeficiente de absorción
z_1	Impedancia del medio 1 ($z_{agua} = c_{agua} \rho_{agua}$)
z_2	Impedancia del medio 2 ($z_{aire} = c_{aire} \rho_{aire}$)
θ_i	Ángulo de incidencia
θ_t	Ángulo de transmisión
c_1	Velocidad del sonido del medio 1 (c_{agua})
c_2	Velocidad del sonido del medio 2 (c_{aire})

Figura 4.14. (a) Coeficiente de reflexión de intensidad de sonido y (b) absorción en la interfase agua-aire para una temperatura de 28°C. Se muestra valores despreciables de absorción.

De la ecuación (3.42) ($\alpha_{uni} = \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \sin(2\theta) d\theta$) se obtiene también el coeficiente de absorción para incidencia aleatoria igual a 0.72×10^{-4} .

Estos resultados indican que la transmisión del sonido a la superficie es despreciable, no permitiendo la salida de audio fuera del volumen subacuático; es decir, no sería posible escuchar en la superficie el sonido producido en el interior de la piscina.

4.7.2. Interfase aire-agua

La Figura 4.16 muestra el coeficiente de reflexión de presión y fase de la interfase aire-agua según los parámetros de la Tabla 4.3, modelado utilizando la ecuación (3.32) correspondiente a reflexiones entre fluidos y representado en el esquema de la Figura 4.15.

Parámetro	Valor	Descripción
T	28°C	Temperatura en la interfase agua-aire.
c_{aire}	348.1 m/s	Velocidad del sonido en el aire a 28°C.
c_{agua}	1504.7 m/s	Velocidad del sonido en el agua a 28°C y profundidad de 0m (superficie).
ρ_{aire}	1.172 kg/m ³	Densidad del aire a 28°C.
ρ_{agua}	996.25 kg/m ³	Densidad del agua a 28°C.
z_{aire}	407.97 Pa.s/m	Impedancia característica del aire a 28°C.
z_{agua}	1.499x10 ⁶ Pa.s/m	Impedancia característica del agua a 28°C.

Tabla 4.3. Parámetros de la interfase aire-agua.

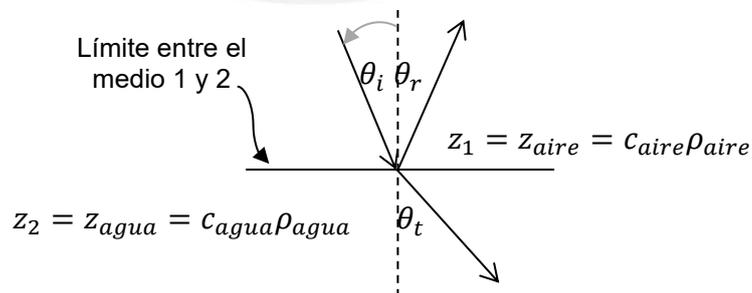
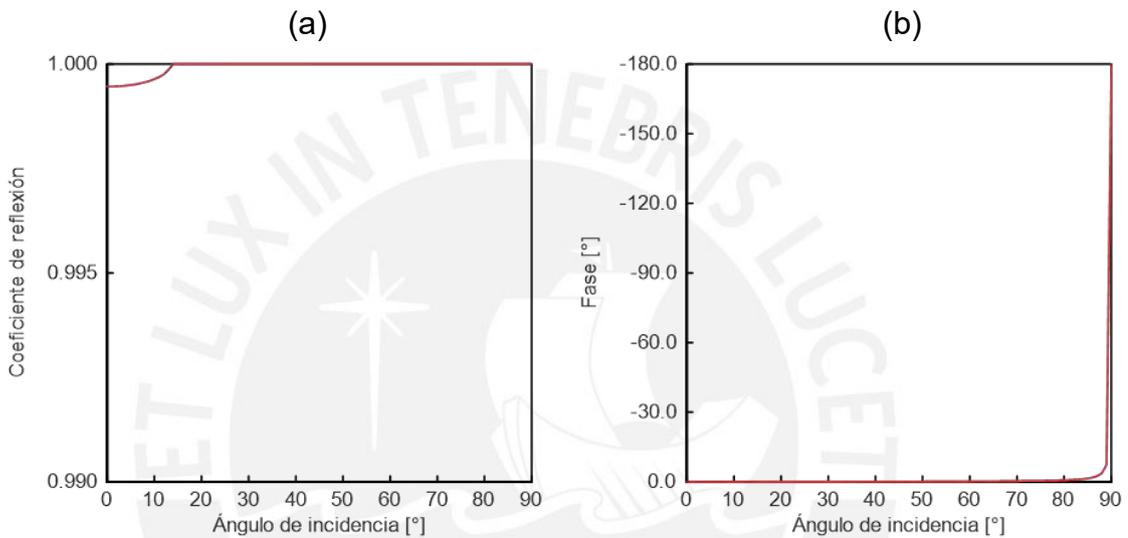


Figura 4.15. Esquema de reflexión y transmisión del sonido para una onda plana de incidencia oblicua en un límite plano de la interfase aire-agua.

Como se observa en la Figura 4.16 el coeficiente de reflexión de presión puede aproximarse a 1 (con fase constante igual a cero). La interfase tiene un ángulo crítico a 13.38°, lo que indica: el ángulo máximo hasta donde el sonido puede ser transmitido al interior de la piscina, pero con valores de transmisión despreciables; luego de este ángulo el sonido será reflejado completamente.

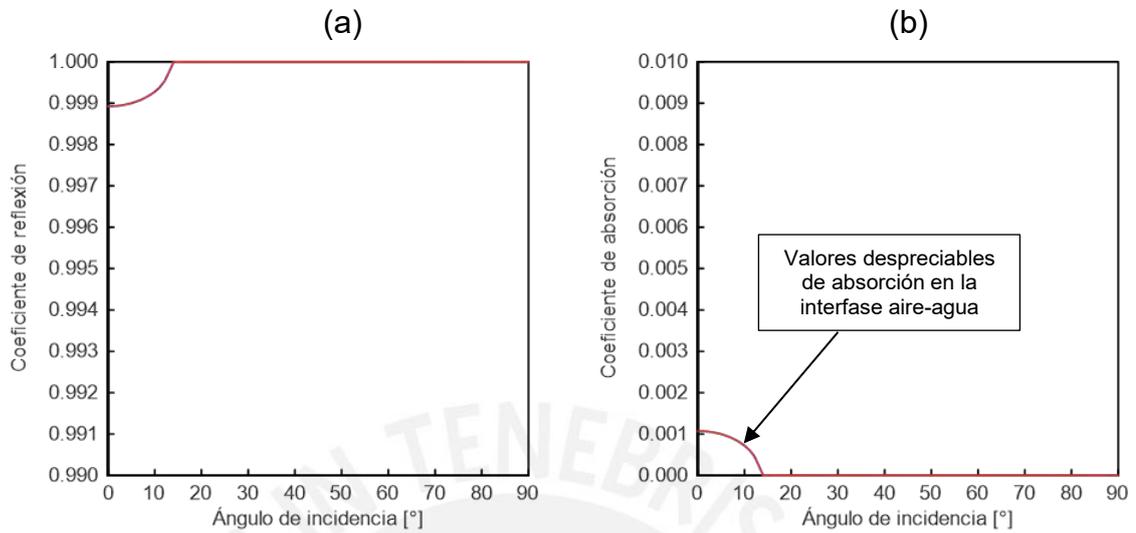


$$R = \frac{z_2 / \cos \theta_t - z_1 / \cos \theta_i}{z_2 / \cos \theta_t + z_1 / \cos \theta_i}, \quad \frac{\sin \theta_i}{c_1} = \frac{\sin \theta_t}{c_2}$$

R	Coeficiente de reflexión de presión
z_1	Impedancia del medio 1 ($z_{\text{aire}} = c_{\text{aire}} \rho_{\text{aire}}$)
z_2	Impedancia del medio 2 ($z_{\text{agua}} = c_{\text{agua}} \rho_{\text{agua}}$)
θ_i	Ángulo de incidencia
θ_t	Ángulo de transmisión
c_1	Velocidad del sonido del medio 1 (c_{aire})
c_2	Velocidad del sonido del medio 2 (c_{agua})

Figura 4.16. (a) Coeficiente de reflexión de presión y (b) fase en función del ángulo de incidencia en la interfase aire-agua para una temperatura de 28°C.

La Figura 4.17 muestra también los resultados de los valores del coeficiente de reflexión de intensidad del sonido y absorción, cuyo valor máximo se aproxima a 0.001 para un ángulo de incidencia de 0°.



$$R = \frac{z_2 / \cos \theta_t - z_1 / \cos \theta_i}{z_2 / \cos \theta_t + z_1 / \cos \theta_i}, \quad \frac{\sin \theta_i}{c_1} = \frac{\sin \theta_t}{c_2}, \quad \alpha = 1 - |R|^2$$

R	Coeficiente de reflexión de presión
$ R ^2$	Coeficiente de reflexión de intensidad de sonido
α	Coeficiente de absorción
z_1	Impedancia del medio 1 ($z_{\text{aire}} = c_{\text{aire}}\rho_{\text{aire}}$)
z_2	Impedancia del medio 2 ($z_{\text{agua}} = c_{\text{agua}}\rho_{\text{agua}}$)
θ_i	Ángulo de incidencia
θ_t	Ángulo de transmisión
c_1	Velocidad del sonido del medio 1 (c_{aire})
c_2	Velocidad del sonido del medio 2 (c_{agua})

Figura 4.17. (a) Coeficiente de reflexión de intensidad de sonido y (b) absorción en la interfase aire-agua para una temperatura de 28°C. Se muestra valores despreciables de absorción.

De acuerdo con los resultados y al igual que en la interfase agua-aire (pero en sentido opuesto) se puede decir que: no será posible escuchar bajo el agua el sonido generado en la superficie.

4.7.3. Interfase agua-sólido

El vaso de la piscina suele construirse de concreto cubierto de azulejos de porcelana (Figura 4.18) como material de revestimiento para permitir la estanqueidad del agua, estos pueden tener de 3mm a 10mm de espesor; son colocados en la superficie de concreto utilizando adhesivos cementeros de 1mm a 5mm de espesor [32]. En cuanto a las juntas de dilatación los materiales utilizados para su sellado suelen ser masillas de poliuretano de alta elasticidad para minimizar o evitar las tensiones a la que son sometidas las baldosas cerámicas [32].

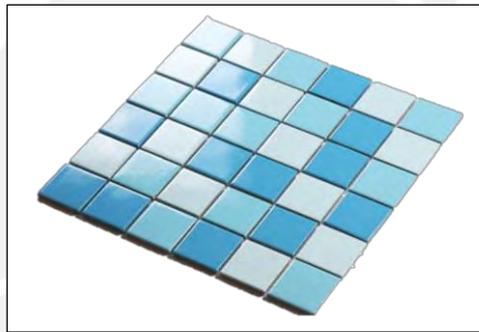


Figura 4.18. Azulejo de porcelana para el revestimiento del vaso de la piscina de nado sincronizado.

Con el propósito de darle enfoque práctico y analítico a las reflexiones producidas en las paredes del vaso de la piscina, estas serán modeladas como un solo bloque de concreto, definiéndolo como un material: sólido elástico, homogéneo, e isotrópico. Por lo tanto, se tendrá en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se desprecian los efectos de porosidad y viscosidad del material, considerándolo un medio sólido elástico, e isotrópico. Esta aproximación ya ha sido utilizada para la síntesis de reflexiones acústicas subacuáticas, como lo demuestra Zhang [19] en su estudio analítico del

lecho marino. Por otro lado, el concreto ha sido definido por Kinsler [7] como un material isotrópico.

- Las paredes se consideran homogéneas despreciando los efectos producidos por el revestimiento de cerámica. Este ajuste se realiza asumiendo que: las características acústicas del azulejo y adhesivos cementeros son muy similares a la del concreto. Considerando entonces, los efectos de reflexión de un solo material (en este caso del concreto).
- Las dimensiones exteriores e interiores de las paredes del vaso son mayores a la longitud de onda acústica de interés. Este criterio es importante, el cual permite determinar la existencia dos ondas de sonido bien definidas e independientes (corte y compresión) que se refractan y propagan al interior del material, según lo describe B.A. Auld [8].

De acuerdo con las características descritas de las paredes del interior de la piscina de nado sincronizado, el coeficiente de reflexión de presión puede ser estimado utilizando la ecuación (3.51) para la interfase agua-concreto. La Figura 4.20 muestra el coeficiente de reflexión de presión a distintos ángulos de incidencia calculado según los parámetros listados en la Tabla 4.4.

Parámetro	Valor	Descripción
T	27°C	Temperatura del agua.
c_{agua}	1502.17 m/s	Velocidad del sonido en el agua a 27°C y profundidad de 1.5m.
ρ_{agua}	996.53 kg/m ³	Densidad del agua a 27°C.
c_L	4000 m/s	Velocidad de onda de compresión en el concreto [20].
c_T	2450 m/s	Velocidad de onda de corte en el concreto [20].
$\rho_{Concreto}$	2400 kg/m ³	Densidad del concreto [20].
z_{agua}	1.497x10 ⁶ Pa.s/m	Impedancia característica del agua a 27°C.
z_L	9.6x10 ⁶ Pa.s/m	Impedancia acústica de la onda de compresión en el concreto.
z_T	5.88x10 ⁶ Pa.s/m	Impedancia acústica de la onda de corte en el concreto.

Tabla 4.4. Parámetros para el cálculo del coeficiente de reflexión y absorción en las paredes de la piscina de nado sincronizado.

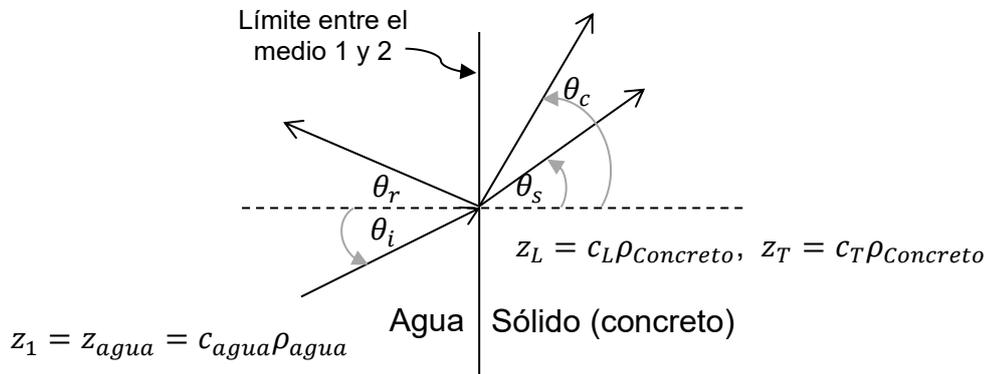
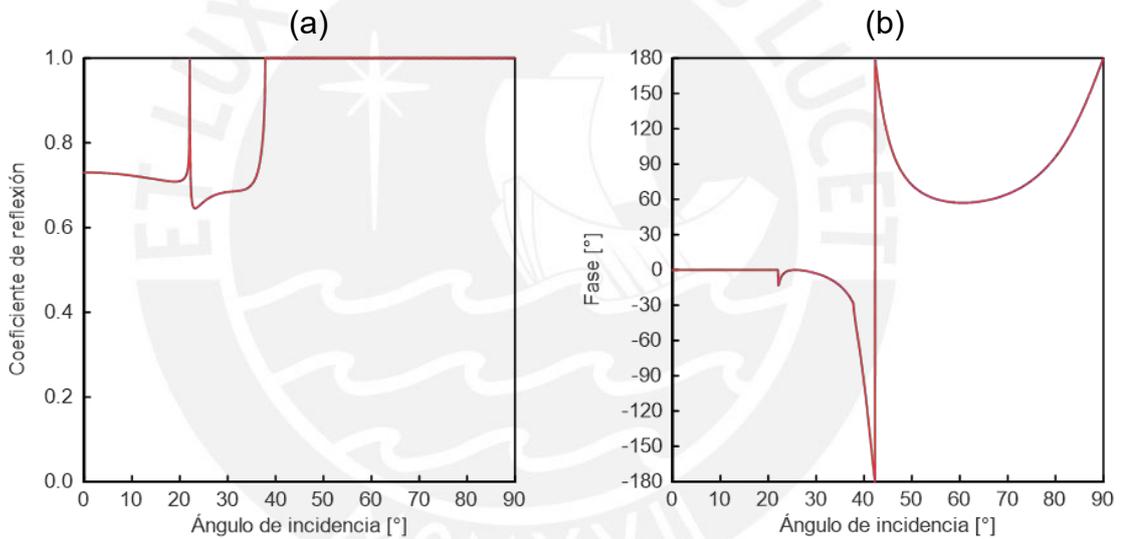


Figura 4.19. Esquema de reflexión y transmisión del sonido para una onda plana de incidencia oblicua en un límite plano de una interfase agua-sólido.



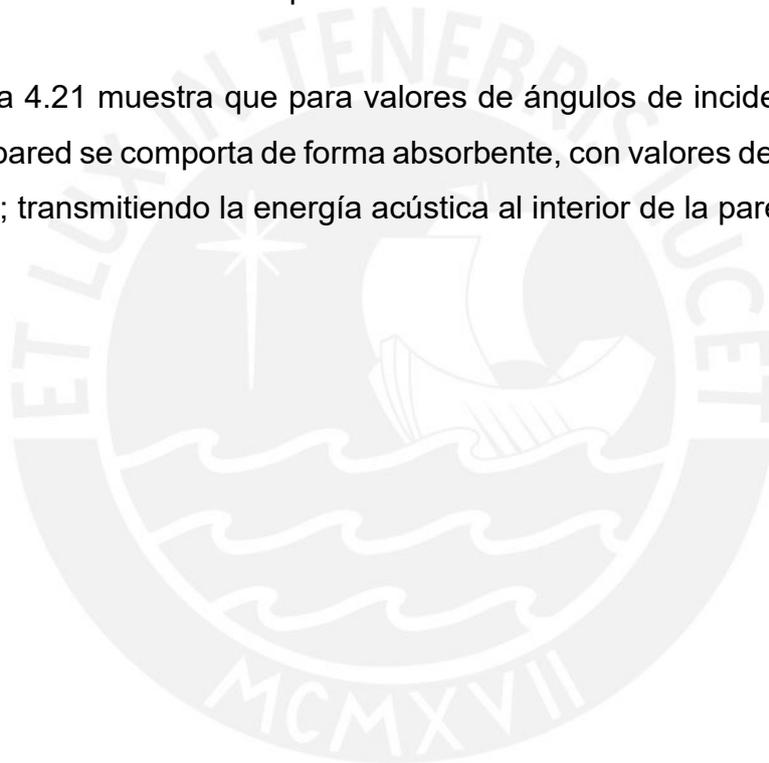
$$R = \frac{\cos \theta_i \left(\frac{z_L (\cos 2\theta_s)^2 + z_T (c_T/c_L) \sin 2\theta_c \sin 2\theta_s}{\cos \theta_c \cos 2\theta_s + (c_T/c_L) \sin 2\theta_c \sin 2\theta_s} \right) - z_1}{\cos \theta_i \left(\frac{z_L (\cos 2\theta_s)^2 + z_T (c_T/c_L) \sin 2\theta_c \sin 2\theta_s}{\cos \theta_c \cos 2\theta_s + (c_T/c_L) \sin 2\theta_c \sin 2\theta_s} \right) + z_1}, \quad \frac{\sin \theta_i}{c_1} = \frac{\sin \theta_s}{c_T} = \frac{\sin \theta_c}{c_L}$$

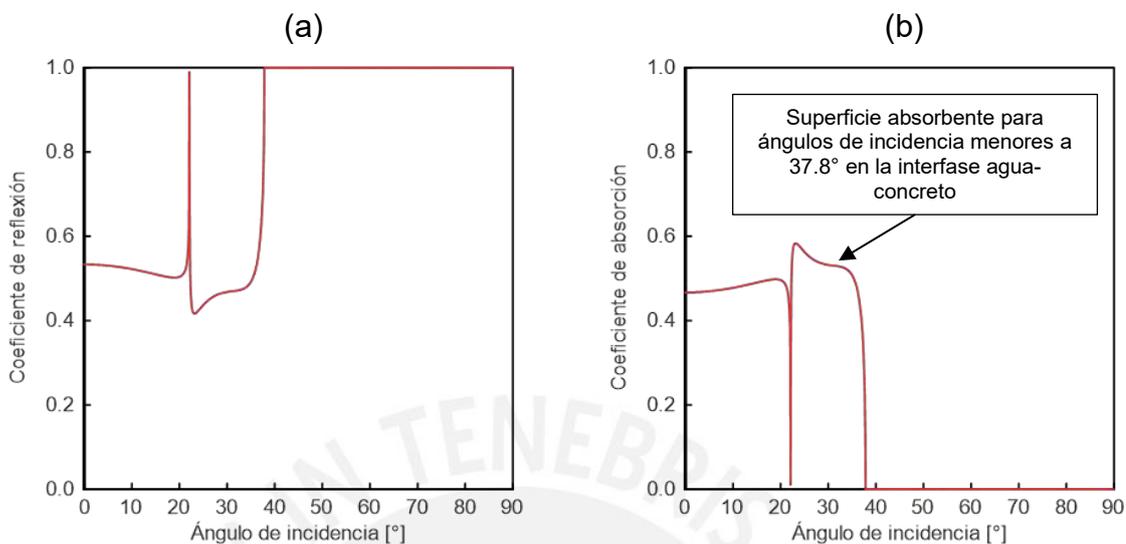
R	Coefficiente de reflexión de presión
z_1	Impedancia del medio 1 ($z_{\text{agua}} = c_{\text{agua}} \rho_{\text{agua}}$)
z_L	Impedancia acústica de la onda de compresión en el concreto ($c_L \rho_{\text{Concreto}}$)
z_T	Impedancia acústica de la onda de corte en el concreto ($c_T \rho_{\text{Concreto}}$)
θ_i	Ángulo de incidencia
θ_c	Ángulo de transmisión de las ondas de compresión
θ_s	Ángulo de transmisión de las ondas de corte
c_1	Velocidad del sonido del medio 1 (c_{agua})
c_L	Velocidad de la onda de compresión en del concreto
c_T	Velocidad de la onda de corte en del concreto

Figura 4.20. (a) Coeficiente de reflexión de presión y (b) fase en función del ángulo de incidencia en las paredes de la piscina. Interfase agua-concreto.

Como se observa en la Figura 4.20 se tiene dos ángulos críticos, uno a 22° debido a las ondas de compresión y otro a 37.8° debido a las ondas de corte. Las ondas refractadas en el interior del concreto serán de compresión y de corte para ángulos de incidencia entre 0° y 22° , en tanto que para ángulos entre 22° y 37.8° sólo se tendrá ondas de corte. Al alcanzar los ángulos críticos, las ondas serán reflejadas completamente por la interfase (agua-concreto), de modo que para ángulos de incidencia mayores 37.8° , las paredes de la piscina se comportarán de manera completamente reflectivas.

La Figura 4.21 muestra que para valores de ángulos de incidencia menores a 37.8° la pared se comporta de forma absorbente, con valores de absorción entre 0.4 y 0.6; transmitiendo la energía acústica al interior de la pared.





$$R = \frac{\cos \theta_i \left(\frac{Z_L(\cos 2\theta_s)^2 + Z_T(c_T/c_L) \sin 2\theta_c \sin 2\theta_s}{\cos \theta_c \cos 2\theta_s + (c_T/c_L) \sin 2\theta_c \sin 2\theta_s} \right) - Z_1}{\cos \theta_i \left(\frac{Z_L(\cos 2\theta_s)^2 + Z_T(c_T/c_L) \sin 2\theta_c \sin 2\theta_s}{\cos \theta_c \cos 2\theta_s + (c_T/c_L) \sin 2\theta_c \sin 2\theta_s} \right) + Z_1}, \quad \frac{\sin \theta_i}{c_1} = \frac{\sin \theta_s}{c_T} = \frac{\sin \theta_c}{c_L},$$

$$\alpha = 1 - |R|^2$$

R	Coeficiente de reflexión de presión
$ R ^2$	Coeficiente de reflexión de intensidad de sonido
α	Coeficiente de absorción
z_1	Impedancia del medio 1 ($z_{\text{agua}} = c_{\text{agua}}\rho_{\text{agua}}$)
z_L	Impedancia acústica de la onda de compresión en el concreto ($c_L\rho_{\text{concreto}}$)
z_T	Impedancia acústica de la onda de corte en el concreto ($c_T\rho_{\text{concreto}}$)
θ_i	Ángulo de incidencia
θ_c	Ángulo de transmisión de las ondas de compresión
θ_s	Ángulo de transmisión de las ondas de corte
c_1	Velocidad del sonido del medio 1 (c_{agua})
c_L	Velocidad de la onda de compresión en del concreto
c_T	Velocidad de la onda de corte en del concreto

Figura 4.21. (a) Coeficiente de reflexión de intensidad de sonido y (b) absorción en las paredes de la piscina (interfase agua-concreto) a diferentes ángulos de incidencia. Los resultados muestran a la interfase como una superficie absorbente para ángulos de incidencia menores a 37.8°.

De la ecuación (3.42) ($\alpha_{uni} = \int_0^{\pi/2} \alpha(\theta) \sin(2\theta) d\theta$) se obtiene el coeficiente de absorción para incidencia aleatoria igual a 0.189. Este resultado definiría las características acústicas de un recinto muy reverberante, sin embargo, la interpretación de este resultado cambiaría debido a la velocidad del sonido en el agua, y de acuerdo los resultados obtenidos en el cálculo del tiempo de reverberación que se muestran en la sección siguiente (4.9.1).

4.8. Análisis de Dispersión

La dispersión en la superficie del agua (interfase agua-aire) es estimada utilizando la ecuación (3.85) y representada según el esquema de distribución de energía como se muestra en la Figura 4.22.

La Figura 4.23 muestra los diferentes valores del coeficiente de dispersión en la superficie del agua a diferentes frecuencias, ángulos de incidencia y valores de rugosidad según lo especificado en la Tabla 4.5.

Parámetro	Valor	Descripción
c_{agua}	1504.7 m/s	Velocidad del sonido en el agua a 28°C y profundidad de 0m (superficie).
σ_h	0.5cm, 1cm, 1.5cm y 2cm	Rugosidad de la superficie del agua (RMS).

Tabla 4.5. Parámetros para el cálculo del coeficiente de dispersión en la superficie del agua (interfase agua-aire).

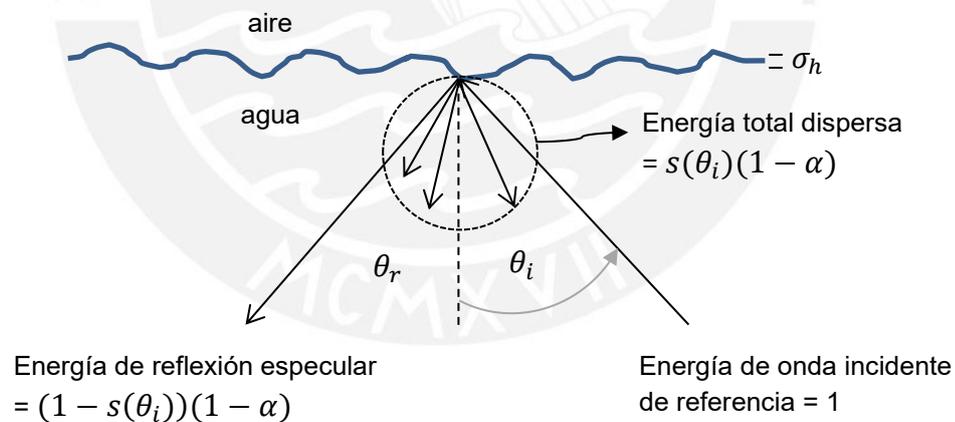
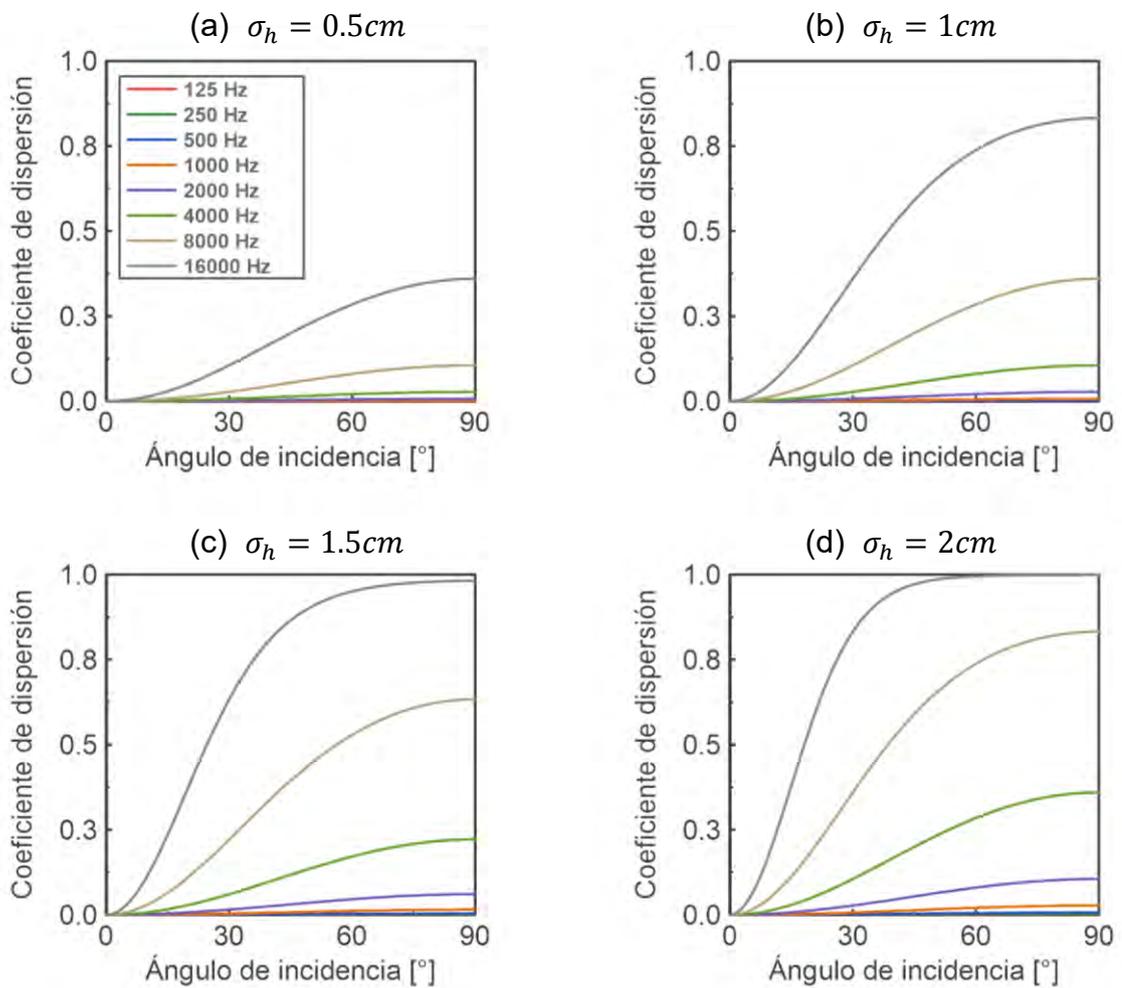


Figura 4.22. Distribución de energía sobre la superficie del agua con ondas de amplitud σ_h RMS, ángulo de incidencia θ_i y ángulo de reflexión especular θ_r . Donde α es el coeficiente de absorción de la interfase agua-aire y s es el coeficiente de dispersión en función del ángulo de incidencia θ_i .



$$s(\theta_i) = 1 - e^{\left[-4\left(\frac{2\pi f}{c}\sigma_h \sin \theta_i\right)^2\right]}$$

s	Coefficiente de dispersión
σ_h	Rugosidad de la superficie del agua con valores RMS
θ_i	Ángulo de incidencia
f	Frecuencia
c	Velocidad del sonido en el agua (c_{agua})

Figura 4.23. Coeficiente de dispersión en la superficie del agua (interfase agua-aire) para distintos valores de rugosidad, ángulos de incidencia y frecuencia.

Como se observa en la Figura 4.23 las reflexiones difusas aumentan en intensidad (contrario a las reflexiones especulares) a medida que aumenta la frecuencia y ángulo de incidencia; y en muchos casos volviéndose

completamente difusas ($s = 1$) para ciertos valores de frecuencia y ángulo de incidencia con valores de rugosidad superficial mayores a 1.5cm (RMS).

4.9. Cálculo de Previo de Parámetros Acústicos del Recinto

Se analizan los siguientes parámetros: Tiempo de reverberación, frecuencia de Schroeder y modos locales del recinto. Los cuales pueden ser calculados de forma analítica.

4.9.1. Tiempo de Reverberación

El tiempo de reverberación se calcula utilizando las ecuaciones: (3.106), (3.107) y (3.48); representados en la Figura 4.24, para distintas bandas de frecuencia (bandas de octavas).

La Figura 4.24 muestra el esquema de áreas del recinto para el cálculo del tiempo de reverberación.

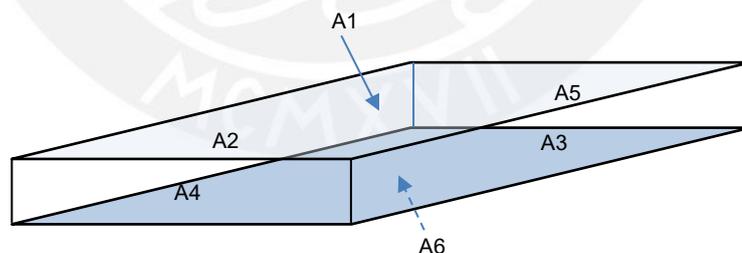
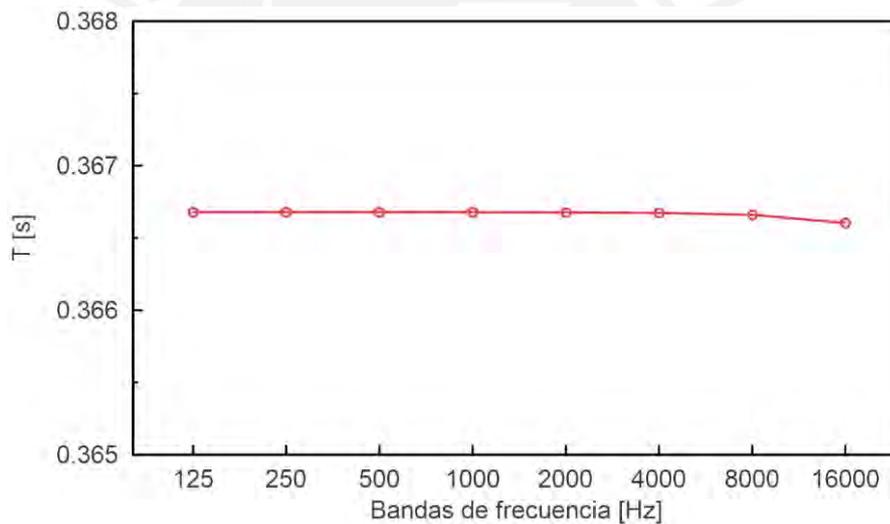


Figura 4.24. Esquema de áreas del recinto subacuático para el cálculo del tiempo de reverberación.

El tiempo de reverberación es calculado según los parámetros listados en la Tabla 4.6 para bandas de octavas.

Parámetro	Valor	Descripción
T	27°C	Temperatura del agua.
c_{agua}	1502.17 m/s	Velocidad del sonido en el agua a 27°C y profundidad de 1.5m.
$\alpha_{agua-aire}$	0.72×10^{-4}	Coefficiente de absorción de la interfase agua-aire.
$\alpha_{agua-concreto}$	0.189	Coefficiente de absorción de la interfase agua-concreto.
$A1$	600m ²	Área de la superficie del agua (interfase agua-aire)
$A2, A3$	90m ²	Paredes laterales de la piscina.
$A4, A5$	60m ²	Paredes laterales de la piscina.
$A6$	600m ²	Área del fondo de la piscina.
V	1800m ³	Volumen del vaso.

Tabla 4.6. Parámetros del recinto para el cálculo del tiempo de reverberación.



$T_{rev} = \frac{1}{c} \left(\frac{24V \ln 10}{4\alpha_t V - S \ln(1 - \bar{\alpha})} \right), \quad \bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_i S_i \alpha_i, \quad \alpha_t = \frac{4.9 \times 10^{-13} f^2 e^{-\left(\frac{T}{26} + \frac{h}{25000}\right)}}{8.7}$	
T_{rev}	Tiempo de reverberación del espacio subacuático
$\bar{\alpha}$	Coefficiente medio de absorción del recinto
α_t	Coefficiente de absorción del medio de propagación del sonido
c	Velocidad del sonido (c_{agua})
V	Volumen del recinto subacuático (volumen del vaso)
S	Área total del recinto ($A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6$)
S_i	Área parcial de las paredes del recinto ($A1, A2, A3, A4, A5, A6$)
α_i	Coefficiente de absorción de la superficie de área S_i
T	Temperatura del agua
h	Profundidad del agua
f	Frecuencia

Figura 4.25. Cálculo del tiempo de reverberación en bandas por octavas.

La Figura 4.25 muestra el tiempo de reverberación del recinto en bandas por octavas. El tiempo de reverberación estimado del recinto subacuático es de: 0.3666s (366.6ms); este resultado contrasta con valores del tiempo de reverberación que se obtendrían si la velocidad del sonido fuera la del aire (348.1 m/s), y para los mismos valores absorción del recinto, el cual produciría tiempos de reverberación mayores a 1.5s. Por lo tanto, dado el resultado del tiempo de reverberación, se puede decir que el recinto da la sensación acústica de un espacio seco (sin reflexiones).

4.9.2. Frecuencia de Schroeder

La frecuencia de Schroeder es calculada utilizando la ecuación (3.104) ($f_S = \sqrt{\frac{3Tc^3}{8.8\pi V}}$) y los parámetros de la Tabla 4.7. Donde f_S es la frecuencia de Schroeder, T es el tiempo de reverberación, c la velocidad del sonido en el agua (c_{agua}) y V es el volumen del recinto subacuático (volumen del vaso).

Parámetro	Valor	Descripción
T	0.3666s	Tiempo de reverberación.
c_{agua}	1502.17 m/s	Velocidad del sonido en el agua a 27°C y profundidad de 1.5m.
V	1800m ³	Volumen del vaso.

Tabla 4.7. Parámetros del recinto para el cálculo de la frecuencia de Schroeder.

La frecuencia de Schroeder resultante es de: 273.7Hz. Para frecuencias mayores a 273.7Hz el campo acústico puede ser modelado utilizando la acústica geométrica (rayos acústicos, fuentes imágenes, etc.) y a frecuencias inferiores por modos acústicos del recinto.

4.9.3. Modos Locales

Los modos locales del recinto son calculados utilizando la ecuación (3.105)

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

y los parámetros de la Tabla 4.8. Donde n_x , n_y y n_z pueden tomar valores de cero a un valor entero positivo, L_x , L_y y L_z son las dimensiones del recinto subacuático representado en la Figura 4.26.

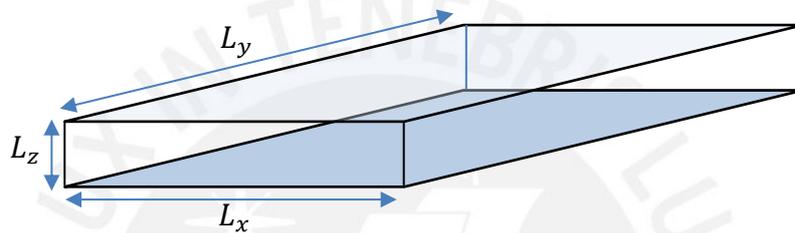


Figura 4.26. Esquema de dimensiones del recinto subacuático.

Parámetro	Valor	Descripción
f_s	273.7Hz	Frecuencia de Schroeder.
c_{agua}	1502.17 m/s	Velocidad del sonido en el agua a 27°C y profundidad de 1.5m.
L_x	30m	Largo de la piscina.
L_y	20m	Ancho de la piscina.
L_z	3m	Profundidad de la piscina.

Tabla 4.8. Parámetros del recinto para el cálculo de modos locales.

La Tabla 4.9 muestra algunos modos del recinto para frecuencias menores a la frecuencia de Schroeder.

n_x	1	0	1	2	2	0	1	3	2	4	3	4	0	1
n_y	0	1	1	0	1	2	2	1	2	0	2	1	3	3
n_z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Frecuencia (Hz)	25	37.6	45.1	50.1	62.6	75.1	79.2	84	90.3	100.1	106.2	107	112.7	115.4

Tabla 4.9. Modos acústicos del recinto subacuático.

CAPÍTULO 5

DESARROLLO DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓN Y ALGORITMOS DE PROCESAMIENTO

5.1. Introducción

En el presente capítulo se muestra el desarrollo del software de simulación, y algoritmos, para el cálculo y síntesis de los campos sonoros aplicado a un recinto subacuático. Se hace una descripción general de las características del software propuesto, casos de uso, arquitectura de software, así como su implementación utilizando técnicas de programación orientada a objetos.

5.2. Descripción General del Sistema

El software de simulación y síntesis denominado “AURASONIC” genera, como una de sus funciones principales, la respuesta impulsiva de un recinto para un entorno subacuático, el cual está basado en el modelamiento matemático del campo sonoro empleando las técnicas de: trazado de rayos acústicos, fuentes imágenes, radiosidad, etc.; así como también, utiliza las características acústicas de los elementos que conforman el espacio de simulación como son: el medio de propagación, fuentes de sonido, superficies reflectoras, etc.

De forma general se puede decir que el sistema permite la configuración y modelamiento del recinto, edición de parámetros y elementos acústicos como: difusores, reflectores, impedancias, fuentes de sonido, receptores, generador de rayos, medio de propagación, bandas de frecuencia, patrones de haz y

superficie; del mismo modo permite definir el nombre del proyecto, unidades de medida, etc.

Las reflexiones para el análisis del campo sonoro son procesadas, registradas y visualizadas en función a la configuración de proyecto de un espacio acústico definido. Las reflexiones resultantes son almacenadas en archivos de registro para su posterior análisis en el proceso de generación de reportes de los parámetros acústicos y auralización de la respuesta impulsiva resultante.

El software es desarrollado utilizando la herramienta de programación gráfica de LabVIEW [43]. Las características principales del sistema son:

- El sistema cuenta con una interfaz de configuración de los elementos acústicos y detalles del recinto para la simulación.
- La interfaz de configuración permite crear una lista de elementos acústicos (difusores, impedancias, patrones, fuentes, etc.) que pueden ser seleccionados para la configuración general de otros elementos más complejos (ejemplo: un patrón de haz para una fuente en específico) y diseño del espacio acústico con la ubicación de elementos como: fuentes, receptores y superficies.
- Los elementos acústicos como fuentes, receptores, superficies pueden ser ubicados en el eje de coordenadas (x,y,z) en el espacio acústico definido como: "escenario".
- Las reflexiones son procesadas en la interfaz de generación de reflexiones utilizando la información de proyecto con la configuración de los elementos acústicos y del escenario.
- La interfaz de reportes permite mostrar información como: respuesta en frecuencia de la respuesta impulsiva de reflexiones especulares y difusas, respuesta al impulso integrado por bandas de frecuencia, la distribución temporal de reflexiones con la respuesta impulsiva

energética, y parámetros de inteligibilidad de la palabra (definición, claridad y tiempo central).

- Los datos de los reportes de la acústica del recinto pueden ser exportados a un archivo TDM Streaming [38] para su análisis en softwares de análisis y reportes como DIAdem [44].
- La respuesta impulsiva resultante puede ser almacenada en un archivo tipo WAV para su posterior análisis en softwares más especializados en acústica arquitectónica o para el proceso de auralización.
- El software permite hacer la auralización del espacio acústico utilizando la respuesta impulsiva sintetizada y registrada en el archivo en formato WAV.
- El software permite hacer la reproducción de vídeo de la propagación de los frentes de onda simulados en formato AVI.

5.3. Arquitectura de Software

La arquitectura de software está basada en la programación orientada a objetos para la plataforma gráfica de desarrollo software de LabVIEW [38], con la definición de clases, atributos, métodos, herencias y composición de VIs (instrumentos virtuales).

El sistema está conceptualizado con el desarrollo de módulos (VI), y comunicación de módulos denominado “Actor Framework”, donde los objetos se comunican independiente unos con otros a través de estados y procesos que se ejecutan dentro de los módulos; a su vez, los módulos utilizan estructuras o patrones de diseño tipo: productor-consumidor, productor-consumidor con eventos (para el control de usuario y/o secuencia de procesamiento de datos), máquinas de estado y variables globales funcionales (FGV) para el registro de datos en memoria RAM, etc.; todos definidos en el entorno de programación de LabVIEW [41][42]. Este concepto de desarrollo permite la ejecución paralela de procesos y la escalabilidad del sistema [40][41].

5.3.1. Esquema General del Sistema

La Figura 5.1 muestra el esquema general del sistema con las interfaces de usuario y su interacción con los archivos de datos.

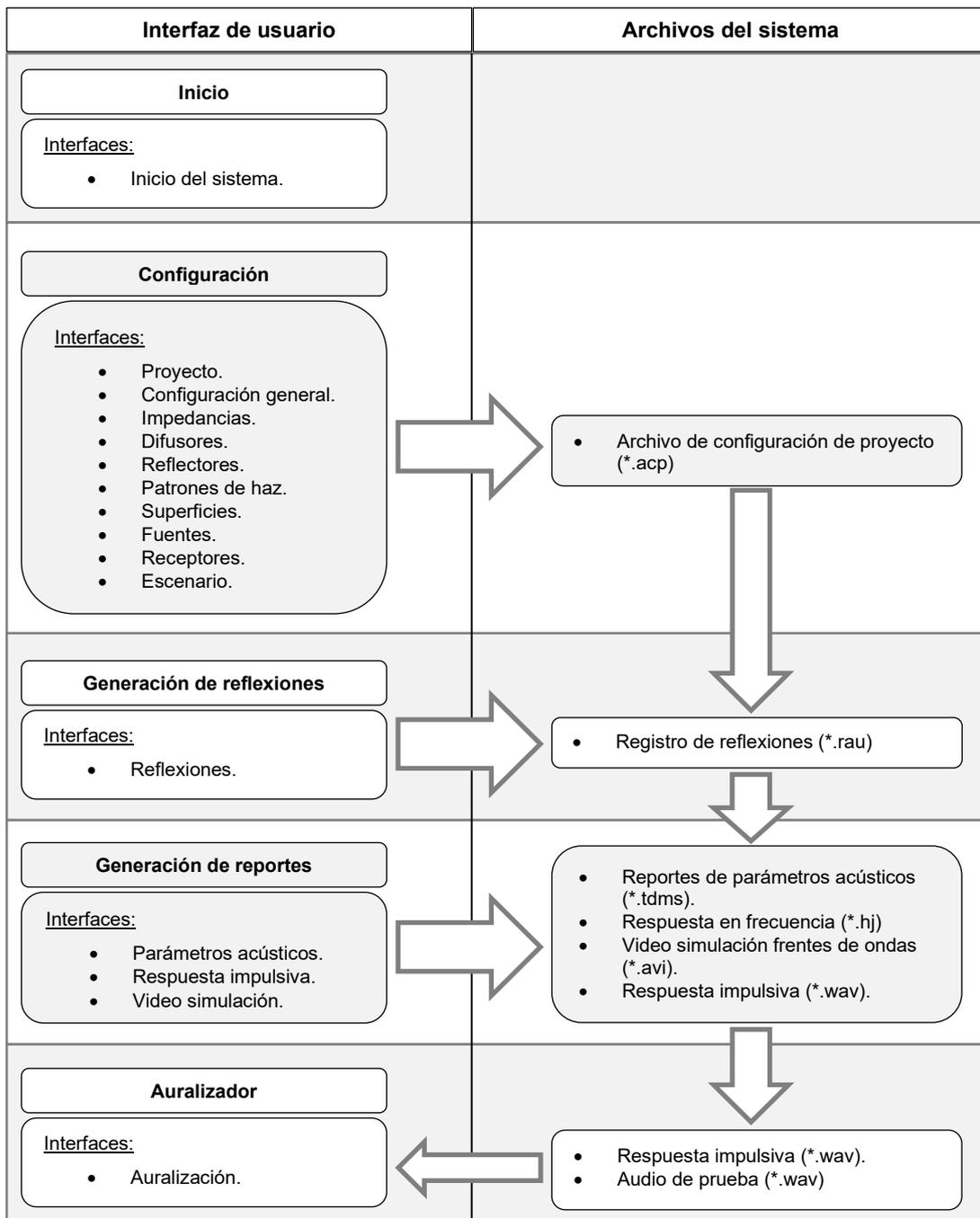


Figura 5.1. Esquema general del software de simulación y síntesis de campos sonoros.

5.3.2. Casos de Uso

La Figura 5.2 muestra los casos de uso del sistema, que define de forma general las operaciones que puede realizar el usuario en el software de simulación.

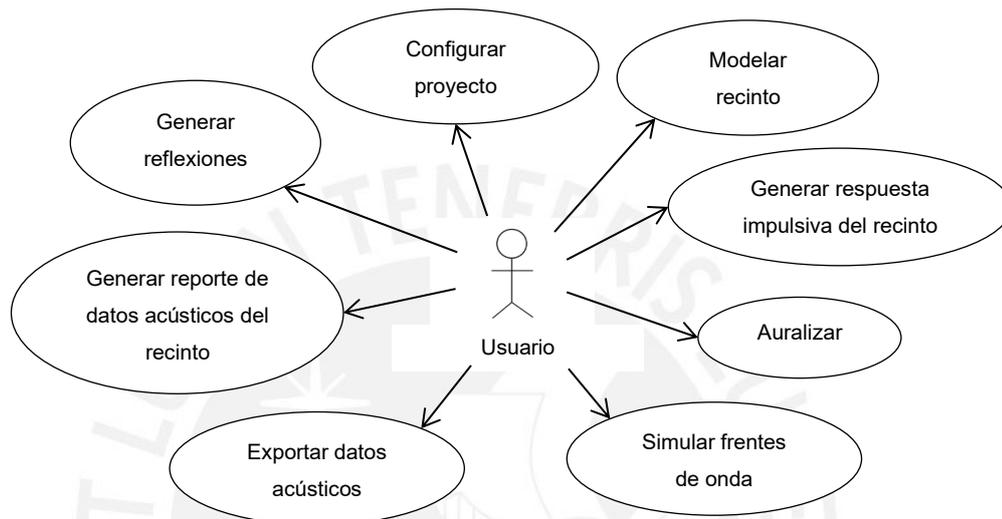


Figura 5.2. Casos de uso del sistema.

5.3.3. Descripción de Módulos y Clases

El sistema está administrado por un módulo principal denominado “controlador” con un patrón de diseño del tipo productor-consumidor con eventos. Este módulo integra las interfaces de usuario y las funciones de control del software en general, inicializa los módulos principales, gestiona el inicio y fin del sistema, procesa los eventos generados operador a través de la interfaz de usuario, ejecuta las funciones de menú, entre otras funcionalidades.

Módulos Principales del Sistema

La Tabla 8.1 muestra los módulos principales del sistema, tipo de estructura y una descripción de sus funciones principales.

Módulo	Patrón de Diseño	Descripción
Comunicación Módulos	Variable global funcional (FGV)	Genera las herramientas de comunicación entre los módulos del sistema utilizando colas de datos y notificadores.
Procesador Reflexiones	Productor-consumidor con eventos	Procesa los datos de las reflexiones en función del archivo de configuración.
Generador Reportes	Productor-consumidor con eventos	Genera los reportes de simulación en base al archivo de reflexiones.
Auralizador	Productor-consumidor con eventos	Procesa el audio utilizando la síntesis de la respuesta impulsiva del recinto simulado (archivo WAV) y lo reproduce en la tarjeta de sonido.
Logger	Máquina de estados	Registra los eventos de inicio y fin del software, así como errores del sistema.
Procesador Vídeo	Productor-consumidor con eventos	Procesa la simulación para la generación de frentes de onda, crea archivos de vídeo en formato AVI.
Manejador Errores	Case	Gestiona los errores del sistema.

Tabla 5.1. Módulos principales del sistema.

Descripción de Clases del Sistema

Las clases del sistema son un conjunto de objetos [39] que encapsulan información y métodos de acuerdo con el nivel de abstracción desarrollado en este caso para el sistema de simulación y síntesis del campo sonoro, con el cual se pueden representar los elementos acústicos del recinto o partes del sistema.

La Tabla 5.2 y Tabla 5.3 lista las clases definidas para el procesamiento de la simulación del campo sonoro y las operaciones generales del sistema.

Clase	Parentesco	Componentes (otras clases)	Descripción
Difusor		Haz	Gestiona el modelo matemático del difusor de superficie.
Reflector		Impedancia, Difusor	Gestiona el modelo matemático del tipo de reflector de superficie.
Especular	Reflector		Gestiona el modelo matemático del reflector puramente especular.
Difusor-Especular	Reflector		Gestiona el modelo matemático del reflector difuso y especular.
Impedancia			Gestiona el modelo matemático del tipo de impedancia de superficie.
Transductor		Haz	Gestiona las características del transductor y su instalación en el escenario de simulación (ubicación y orientación en el recinto).
Receptor	Transductor		Gestiona las características específicas del receptor.
Fuente	Transductor		Gestiona las características específicas de la fuente.
Superficie		Subdivisión, Reflector	Gestiona las características y dimensiones de la superficie reflectora (superficies planas) en los límites del recinto de simulación, así como su ubicación y orientación.
Subdivisión			Gestiona la división de las superficies en segmentos de área para el proceso de difusión de las reflexiones.
Haz			Gestiona el modelo matemático del patrón de haz para las fuentes de sonido, receptores y difusores del sistema.
Reflexión			Gestiona el registro de datos de las reflexiones calculadas en el proceso de simulación y síntesis del campo sonoro.
Frecuencia			Gestiona la información de las bandas de frecuencia.
G-Rayos			Gestiona el modelo matemático para la generación de rayos de las fuentes del sonido.
Medio			Gestiona el modelo matemático para el medio de propagación del sonido.
Unidad			Gestiona la información de las unidades para la configuración de los parámetros del sistema.
Rayo			Gestiona el registro de la información impacto, ubicación y orientación de los rayos generados y reflejados.
Rayo-Difuso	Rayo		Gestiona el registro de impacto de los rayos en las subdivisiones de las superficies para el procesamiento de reflexiones difusas.

Tabla 5.2. Lista de clases para el procesamiento de la simulación y síntesis del campo sonoro.

Clase	Parentesco	Componentes (otras clases)	Descripción
Proyecto		Unidad, Medio, G-Rayos, Frecuencia, Reflexión, Haz, Impedancia, Superficie, Fuente, Receptor, Reflector, Difusor	Gestiona la configuración del proyecto para la simulación y síntesis del campo sonoro.
Configuración			Configura los parámetros de los elementos acústicos del proyecto.
Interfaz			Gestiona la configuración de los controles e indicadores de las interfaces.
I-Inicio	Interfaz		Gestiona la configuración de controles e indicadores de la interfaz de inicio.
I-Configuración	Interfaz		Gestiona la configuración de controles e indicadores de la interfaz de configuración.
I-Reflexiones	Interfaz		Gestiona la configuración de controles e indicadores de la interfaz de generación de reflexiones.
I-Reportes	Interfaz		Gestiona la configuración de controles e indicadores de la interfaz de generación de reportes.
I-Auralizador	Interfaz		Gestiona la configuración de los controles e indicadores de la interfaz del auralizador.
Menú			Gestiona la configuración de las funciones del menú del software.

Tabla 5.3. Lista de clases para las operaciones generales del sistema.

La Figura 5.3 muestra el diagrama de clases relacionado a la clase “superficie” (abstracción de una superficie reflectora). El diagrama presenta los componentes, herencias, atributos y métodos de las clases relacionadas.

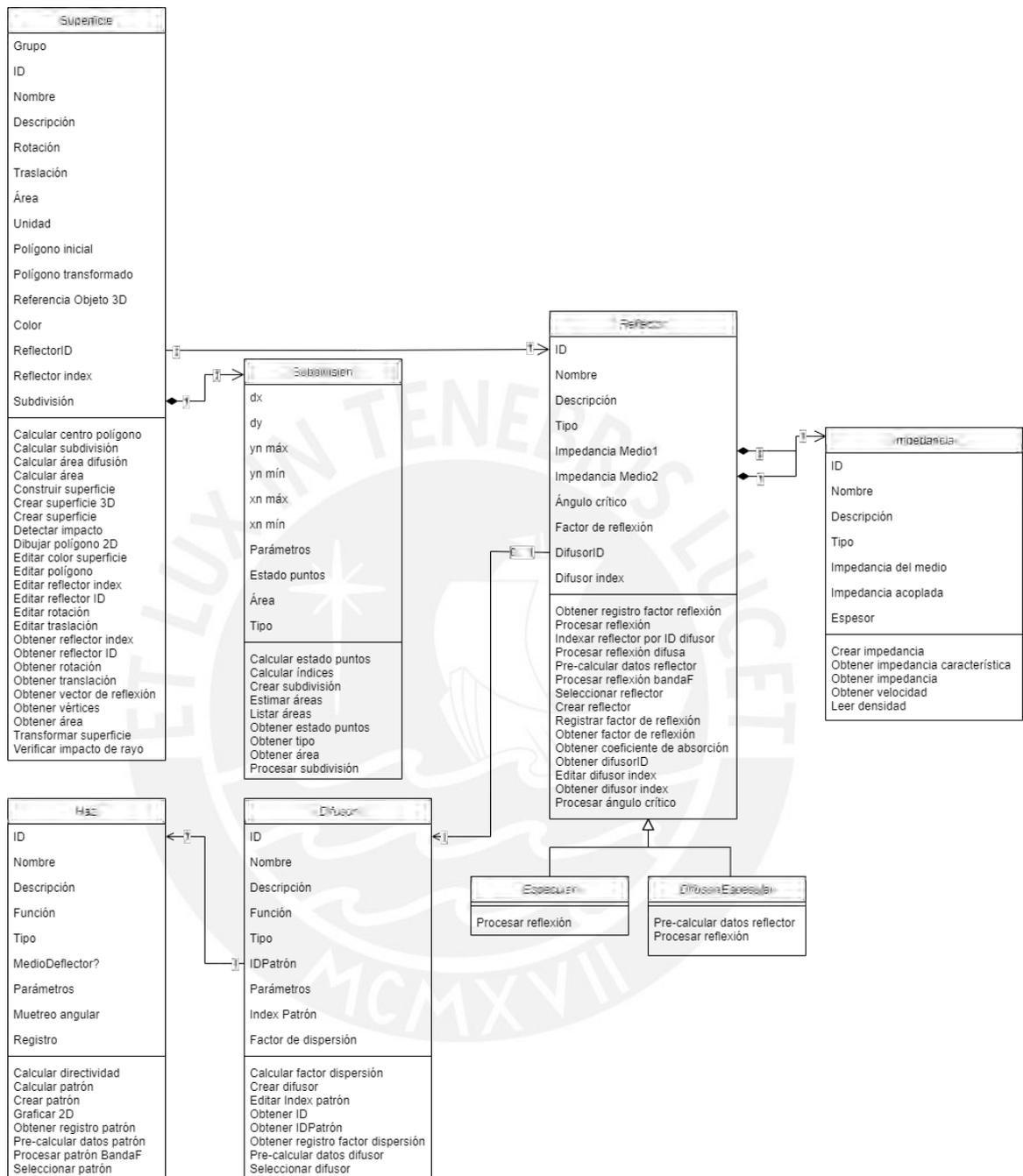


Figura 5.3. Diagrama de clases relacionado a la clase "superficie" (superficie reflectora).

5.3.4. Descripción de Procesos

A continuación, se describen los procesos involucrados en la creación de proyectos, modelamiento del recinto, generación de reflexiones, generación de parámetros acústicos, exportación de datos, simulación del frente de onda acústico y auralización.

Configuración de Proyecto

Los proyectos son configurados en la interfaz de usuario y almacenados en el archivo de configuración con extensión "ACP" (archivo de configuración de proyecto). Se configura la siguiente información:

- Proyecto. – Especifica el nombre del proyecto (nombre que se utilizará para crear los archivos del proyecto) y la descripción con información resumida del proyecto.
- Configuración general. – Especifica las unidades de medida para la distancia, velocidad y temperatura; la configuración del registro temporal de las reflexiones en memoria; configuración del medio de propagación donde se especifica el tipo de medio, velocidad, temperatura y profundidad. Se determina los parámetros del generador de rayos como son: número de rayos, rango de distancia máxima de simulación y radio máximo de detección (para los sensores); se especifica si la generación de rayos se realiza hasta un ángulo de azimut límite (para simular medio reflector). También configura la información de bandas de frecuencia: tipo (1/3 octava, octava, lineal), número muestras o bandas y frecuencia máxima.
- Impedancias. – Crea, edita y elimina objetos de la biblioteca (definición informática) de impedancias en la configuración. Configura parámetros como: tipo de impedancia y parámetros del medio (impedancia, velocidad y densidad). Si la impedancia es equivalente, se especifican los parámetros del segundo medio y el espesor.

- Patrones de haz. – Crea, edita y elimina objetos de la biblioteca de patrones de haz en la configuración. Especifica el tipo de patrón (Función, Omnidireccional, Pistón rígido, Cardioide, Lambert) y parámetros del patrón (radio del pistón, etc.). Si el patrón es una función se especifica la función en el campo “Función” y sus parámetros.
- Fuentes. – Crea, edita y elimina objetos de la biblioteca de fuentes en la configuración. Especifica la forma, área, radio, posición, rotación y potencia de la fuente, así como el ID del patrón relacionado y el color para su identificación en el escenario de simulación.
- Receptores. – Crea, edita y elimina objetos de la biblioteca de receptores en la configuración. Especifica la forma, área, radio, posición, rotación y sensibilidad del receptor, así como el ID del patrón relacionado y el color para su identificación en el escenario de simulación.
- Difusores. – Crea, edita y elimina objetos de la biblioteca de difusores en la configuración. Especifica el tipo de difusor, función, ID del patrón relacionado y sus parámetros.
- Reflectores. – Crea, edita y elimina objetos de la biblioteca de reflectores en la configuración. Especifica el tipo de medio reflector (fluido o rígido), clase (especular o difusor-especular) e ID de la impedancia de los medios. Si el reflector es de la clase difusor-especular se especifica el ID del difusor.
- Superficies. – Crea, edita y elimina objetos de la biblioteca de superficies en la configuración. Define los vértices para la forma de las superficies, posición y rotación para su instalación en el escenario de simulación, así como el color y el ID del reflector relacionado.
- Escenario. – Selecciona las superficies, fuentes y receptores para construir el escenario de simulación.

La Figura 5.4 muestra el proceso de creación y configuración del archivo de proyecto; archivo que es utilizado para la síntesis del campo sonoro y la generación de reportes.

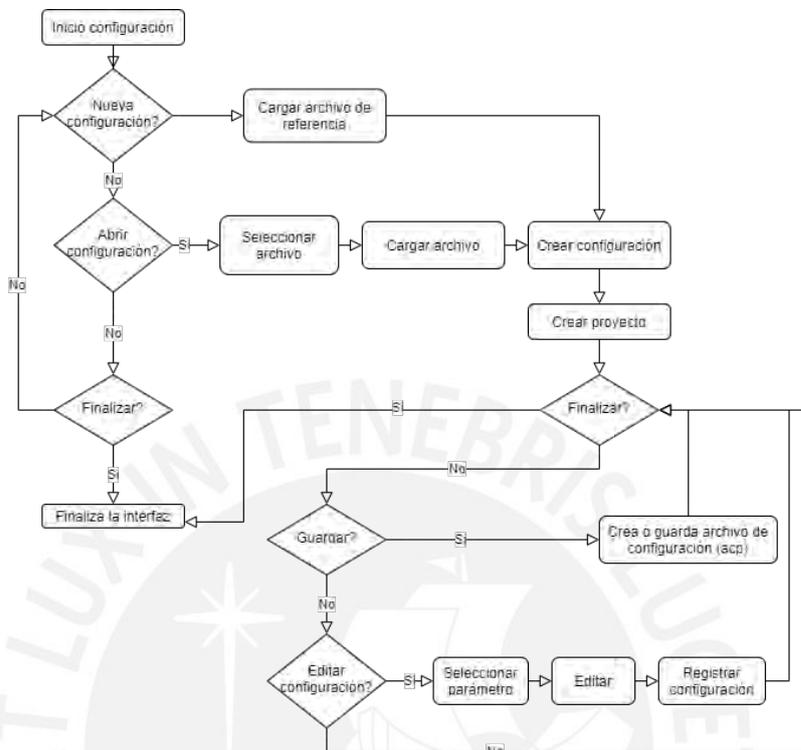


Figura 5.4. Diagrama de flujo del proceso de creación y edición de un archivo de configuración de proyecto (acp).

Modelar el Recinto

El recinto puede ser modelado utilizando y seleccionando los objetos de las bibliotecas de superficies, fuentes y receptores configurados en el proyecto. Cada elemento de simulación (impedancia, patrón, fuente, superficie, etc.) es configurado independientemente y relacionado a otro según las características acústicas y físicas del ítem que representa.

Las superficies que limitan el volumen del recinto son diseñadas utilizando figuras planas geométricas definidas por polígonos, cuyos vértices pueden formar figuras regulares e irregulares, de formas cóncavas o convexas. Las superficies son instaladas en una posición y orientación (definido por la normal al plano) dentro del espacio de simulación o escenario. A su vez, una superficie

puede estar relacionada a un tipo de reflector (incluida la impedancia del reflector), difusor y patrón de radiación (para reflexiones difusas). Del mismo modo una fuente y un receptor pueden estar relacionados a un tipo de patrón de radiación o recepción.

La Figura 5.4 muestra el proceso de selección de elementos de simulación a través de la biblioteca de superficies, fuentes y receptores.

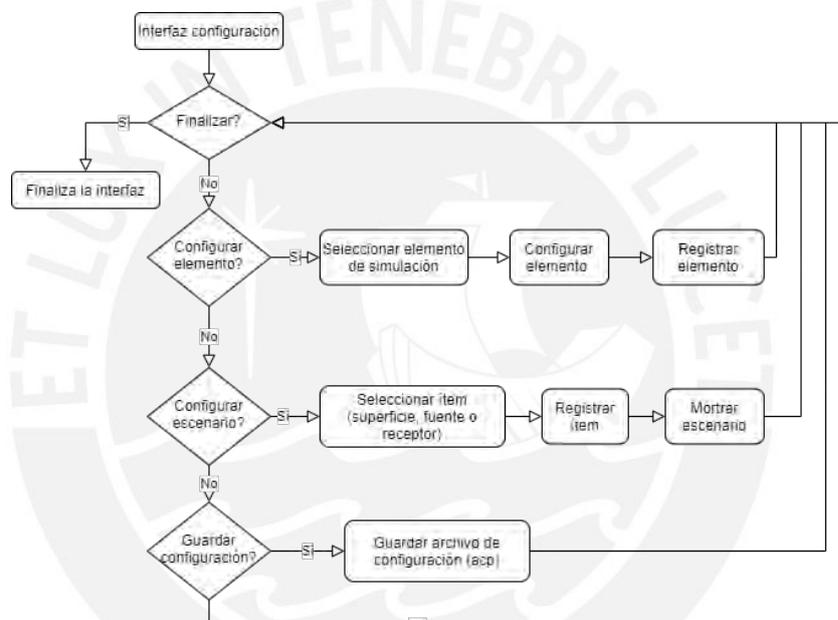


Figura 5.5. Diagrama de flujo del proceso edición y selección de elementos de simulación para el modelamiento del recinto.

Generar Reflexiones

Las reflexiones se generan a partir de un archivo de configuración de proyecto seleccionado y creado previamente. Las reflexiones son calculadas utilizando el algoritmo de trazado de rayos representado en el diagrama de flujo de la Figura 3.10 en simultáneo para cada banda de frecuencia.

Los valores de los parámetros de los elementos de simulación (patrones, impedancias, difusores, etc.) son calculados previamente en función de variables como pueden ser: frecuencias, ángulos, etc.; para valores discretos en un número finito de muestras y almacenados en memoria RAM para ser utilizados en el procesamiento de datos de las reflexiones.

Los rayos son procesados en simultáneo tanto para reflexiones especulares como difusas, calculadas y detectadas en los receptores. Luego son filtrados según su historial de impacto en las superficies reflectoras (se eliminan rayos con el mismo historial) y nivel energético. Las reflexiones resultantes son almacenadas por paquetes de datos en los archivos de registro de extensión "RAU". La trayectoria de los rayos de las reflexiones especulares resultantes es mostrada en la renderización del espacio acústico en 3D.

La Figura 5.6 muestra el proceso de generación de las reflexiones y archivos de registros (*.rau).

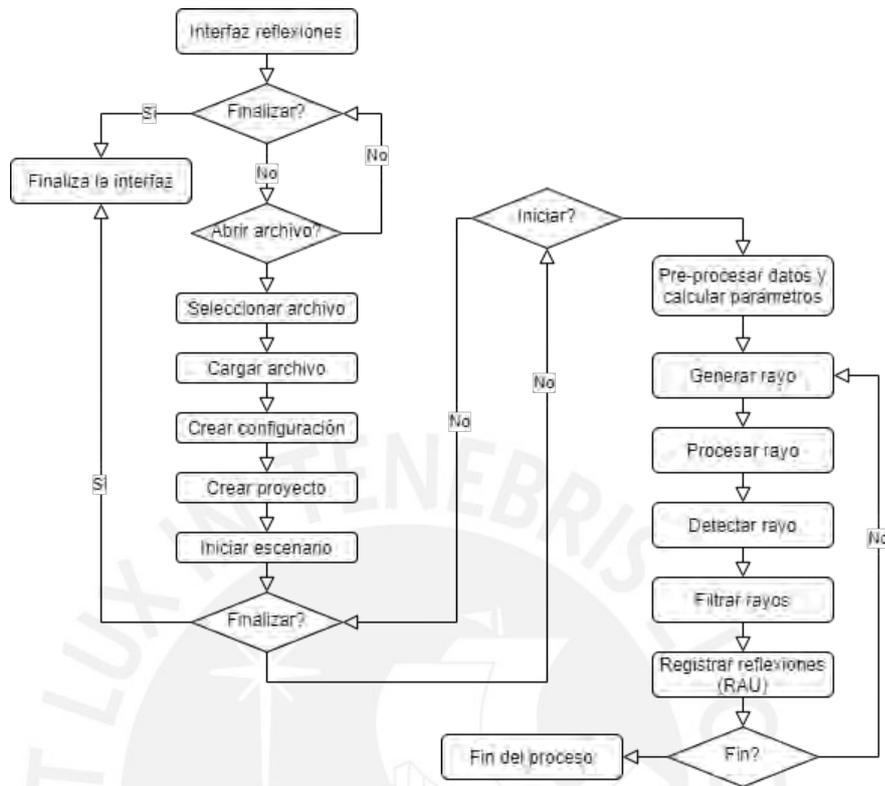


Figura 5.6. Diagrama de flujo del proceso de generación y registro de las reflexiones.

Generar Parámetros Acústicos

Los parámetros acústicos son generados a partir de los archivos de reflexiones (RAU) y el archivo de configuración de proyecto (ACP).

La respuesta en frecuencia es calculada para cada reflexión en función de los modelos matemáticos propuestos para las reflexiones especulares y difusas utilizando las ecuaciones (3.72) y (3.88); luego son almacenadas en archivos de registro en formato “HJ”.

Finalmente, el sistema utiliza la información de los archivos “HJ” y calcula la respuesta en frecuencia del recinto, respuesta impulsiva, respuesta de impulso integrado (integral de Schroeder) y la respuesta impulsiva energética.

La Figura 5.7 muestra el proceso para la generación de los parámetros acústicos.

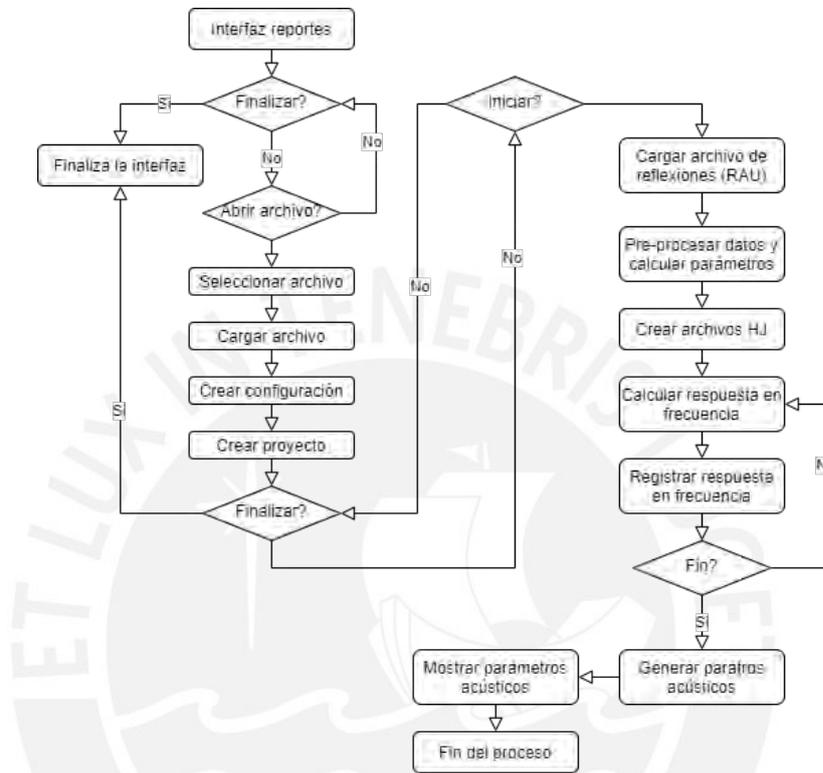


Figura 5.7. Diagrama de flujo del proceso de generación y registro de las reflexiones.

Exportar Datos Acústicos

Los datos acústicos pueden ser exportados luego del proceso de generación de parámetros acústicos en la interfaz de reportes. La información es procesada y exportada a un archivo de reportes tipo TDMS.

La Figura 5.8 muestra el proceso para exportar los datos acústicos a un archivo de reportes TDMS.

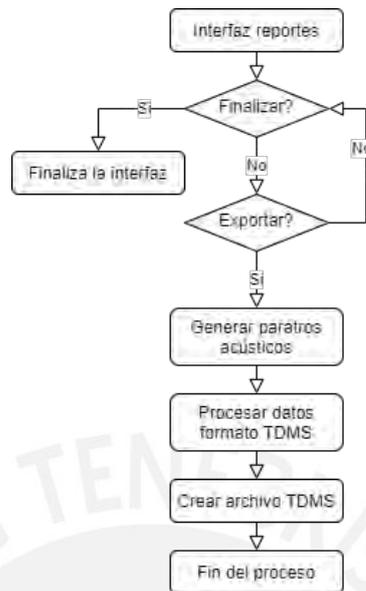


Figura 5.8. Diagrama de flujo del proceso de exportación de parámetros acústicos a un archivo de reportes TDMS.

Exportar Respuesta Impulsiva

La respuesta impulsiva sintetizada obtenida en el proceso de generación de parámetros acústicos puede ser exportada a un archivo en formato WAV. Esta información puede ser utilizada en el proceso de auralización o para el análisis de la información en programas de acústica arquitectónica especializada.

La Figura 5.9 muestra el proceso de exportación de la respuesta impulsiva a un archivo WAV.



Figura 5.9. Diagrama de flujo del proceso de exportación de la respuesta impulsiva a un archivo WAV.

Simular Frentes de Onda

La simulación del frente de onda es generada a partir del archivo de configuración de proyecto (ACP). El frente de onda inicia desde la fuente seleccionada con el número de rayos generados especificado en el archivo de configuración.

Los datos del frente de onda calculados por tramos equidistantes son mostrados en la renderización del espacio acústico en 3D y registrados en un archivo de vídeo en formato AVI. Los rayos son reflejados utilizando sólo reflexiones especulares y limitados por el rango máximo (distancia máxima de simulación).

La Figura 5.10 muestra el proceso de simulación de frentes de onda y generación de archivo de vídeo en formato AVI.

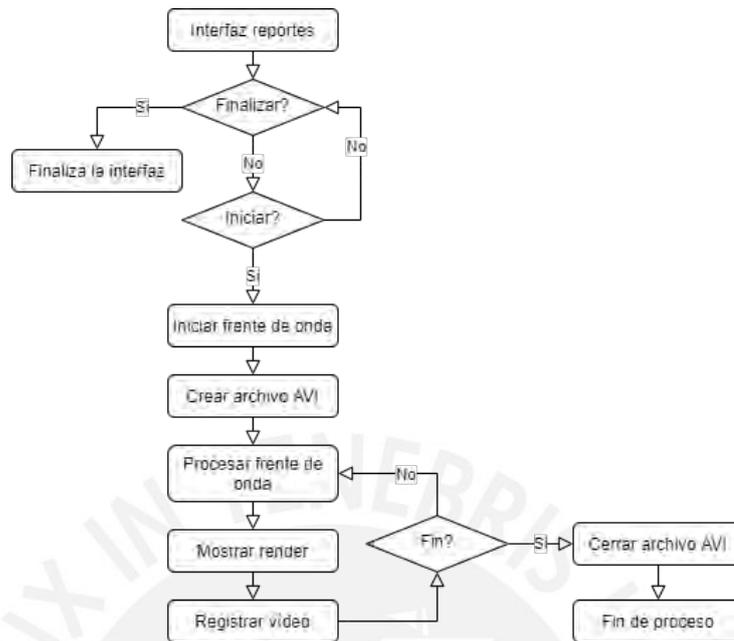


Figura 5.10. Diagrama de flujo del proceso de simulación de frentes de onda y generación de archivo de vídeo AVI.

Auralizar

El proceso de auralización se realiza utilizando la respuesta impulsiva sintetizada en formato de archivo WAV con el audio de muestra en el mismo formato. El sistema reproduce convolución entre la respuesta impulsiva y el audio de muestra, haciendo una convolución en el dominio de la frecuencia. El audio resultante es reproducido utilizando la tarjeta de sonido del computador.

La Figura 5.11 muestra el proceso de auralización utilizando la respuesta impulsiva sintetizada en archivo WAV y un audio de muestra.

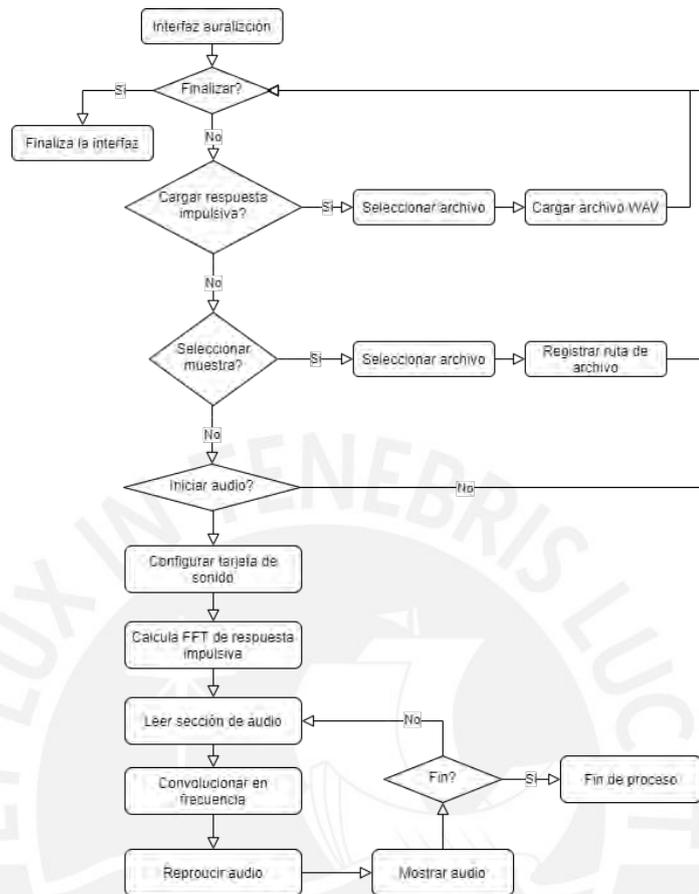


Figura 5.11. Diagrama de flujo del proceso de auralización utilizando la respuesta impulsiva sintetizada y la muestra de audio en formato WAV.

5.4. Algoritmos de Procesamiento de Datos

Se describen los algoritmos de procesamiento de datos para el cálculo de las reflexiones de un modelo de simulación, respuesta impulsiva, generación de frentes de onda y convolución en frecuencia.

5.4.1. Preprocesamiento de Datos y Cálculo de Parámetros

Al inicio del proceso para la generación de las reflexiones se calculan datos y parámetros que serán utilizados durante el procesamiento de las reflexiones reduciendo el tiempo de ejecución. Algunos parámetros son guardados en

memoria RAM con un número discreto de muestras en función de variables como: frecuencia, ángulo de elevación, azimut o incidencia.

El patrón de radiación está definido por el ángulo de elevación $\vartheta \in [0; 180^\circ]$, azimut $\varphi \in [0; 360^\circ]$, ambos discretizados y normalizados en ángulos de muestreo de 1° ; para el caso de la frecuencia, esta estará definida por el número N_f de muestras o bandas de frecuencia configurada. Finalmente se calcula los valores de magnitud del patrón de radiación en tres dimensiones que puede ser indexado en memoria. La Figura 5.12 muestra el algoritmo de indexación para obtener valores magnitud del patrón de radiación registrado en memoria en función del ángulo de elevación y azimut.

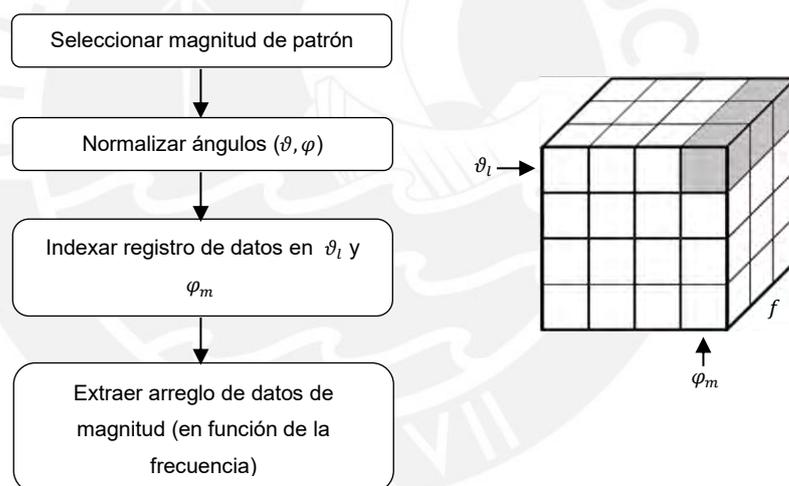


Figura 5.12. Diagrama de flujo de la extracción de datos preprocesados del patrón de radiación en función de la frecuencia, con la normalización de ángulos de elevación ϑ y azimut φ .

Los factores de reflexión son calculados para cada superficie reflectora en función de la frecuencia y ángulo de incidencia normalizados (como en el caso del patrón de radiación) formando arreglos de datos de números complejos en dos dimensiones. Los valores del factor de reflexión son indexados utilizando la información del ángulo de incidencia, obteniendo arreglos de datos en función de la frecuencia.

De forma similar al factor de reflexión, los valores de factor de dispersión de las superficies difusoras son calculados en arreglos de datos para valores discretos frecuencia y ángulo de incidencia.

Al inicio del procesamiento también son calculadas las bandas de frecuencia o muestreo en frecuencia, la absorción del medio de propagación en función de la frecuencia y la subdivisión de las superficies con reflexión difusa para la aplicación de la radiosidad.

5.4.2. Subdivisión de Superficies

La subdivisión de superficies es aplicada a superficies difusoras para procesar la radiosidad en las reflexiones difusas. El proceso inicia con la selección de un área mínima en función del área total de la superficie (1% del área total), subdividiendo el área total en pequeños cuadrados uniformes de longitudes entre 5cm a 50cm como máximo. La superficie se subdivide en cuadrados o celdas uniformes utilizando el algoritmo de Cubos en Marcha [46]. Se determina si los puntos de los vértices de las celdas están en el límite o interior del polígono de la superficie (representados por puntos negros).

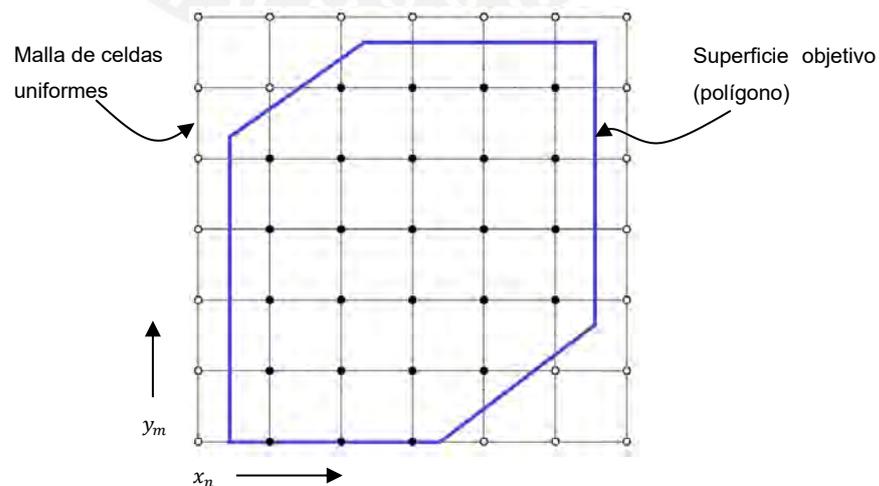


Figura 5.13. Subdivisión de la superficie de reflexión difusa para la aplicación de la radiosidad utilizando celdas uniformes con el algoritmo de cubos en marcha [46].

Cada celda es indexada para valores de x_n e y_m . El área dentro de las celdas en los límites e interior del polígono es determinada según la configuración de puntos mostrado en la Figura 5.14.

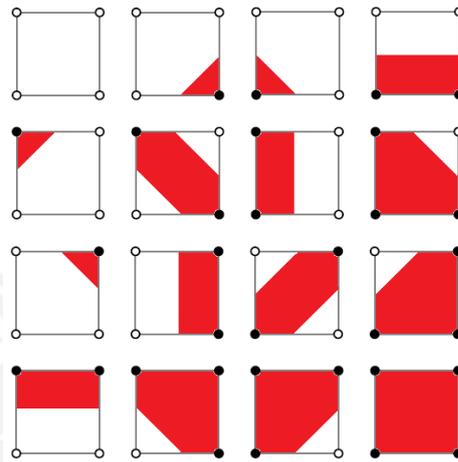


Figura 5.14. Dieciséis (16) posibilidades para determinar el área de la celda (color rojo) utilizando el algoritmo de Cubos en Marcha.

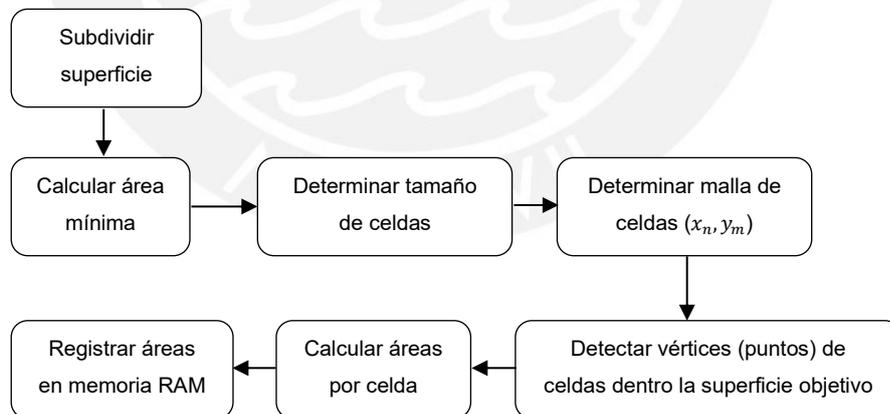


Figura 5.15. Diagrama de flujo del proceso de subdivisión de superficies reflectoras difusas.

5.4.3. Generación de Rayos

Los rayos son generados utilizando el algoritmo presentado en la sección 3.8.1 (Modelamiento de la Fuente), utilizando un número de N rayos distribuidos uniformemente en el espacio en ángulos de elevación y azimut.

5.4.4. Algoritmo de Trazado de Rayos y Registro de Reflexiones

El algoritmo de trazados de rayos se deriva de la secuencia de trazado de rayos representado en la Figura 3.10 [1]. El trazado de rayos simplifica el proceso de cálculo determinista de fuentes imágenes procesando inherentemente la prueba de audibilidad [1]. Cada vez que el rayo impacta en una superficie de reflexión difusa se producen dos rayos, uno con reflexión especular que sigue su camino y otro con reflexión difusa que va directamente sobre el receptor (si no hay obstáculos) sin producirse otra reflexión, generando reflexiones difusas sólo de primer orden.

Los rayos detectados por el receptor pasan por dos procesos:

- Si el rayo proviene de la fuente directa o de una reflexión especular, el rayo pasa por los filtros de nivel de energía mínima, e historial de impactos de superficie [1].
- Si el rayo proviene de una última reflexión de naturaleza difusa, el rayo pasa por los filtros de nivel de energía mínima e historial de impactos de superficie, así como del historial de impacto en el área específica de la superficie subdividida.

Las reflexiones resultantes son registradas con datos que permita construir la respuesta en frecuencia y respuesta impulsiva del recinto en el proceso de

generación de los parámetros acústicos. Dichos datos están compuestos por la siguiente información:

- Ángulos de inicio. – Información de ángulo de salida del rayo desde la fuente con datos de elevación ϑ y azimut φ .
- Vectores unitarios. – Registro de vectores unitarios desde la salida del rayo, hasta las reflexiones en valores de \vec{u}_i , \vec{u}_j y \vec{u}_k .
- Punto de inicio. – Información del punto de inicio del rayo en coordenadas x , y , z .
- Histórico de impacto. – Registro de los índices de las superficies reflectoras en la secuencia de impacto del rayo.
- Distancia acumulada. – Registro de las distancias acumuladas por el rayo en su recorrido entre cada impacto de superficie hasta el receptor.
- Ángulos de incidencia. – Registro de los ángulos de incidencia en las superficies reflectoras.
- Ángulo de salida. – Información del ángulo de salida desde la superficie con reflexión difusa al receptor (sólo para reflexiones difusas).
- Área de sección. – Información del área de la zona de impacto del rayo para las reflexiones difusas.
- Índices de sección. – Información los índices de superficie de la zona de impacto del rayo para las reflexiones difusas en valores de x_n , y_m .
- Tiempo acumulado. – Registro de los tiempos acumulados por el rayo en su trayecto desde las reflexiones hasta llegar al receptor.

La Figura 5.16 muestra el algoritmo de trazados de rayos y registro de reflexiones.

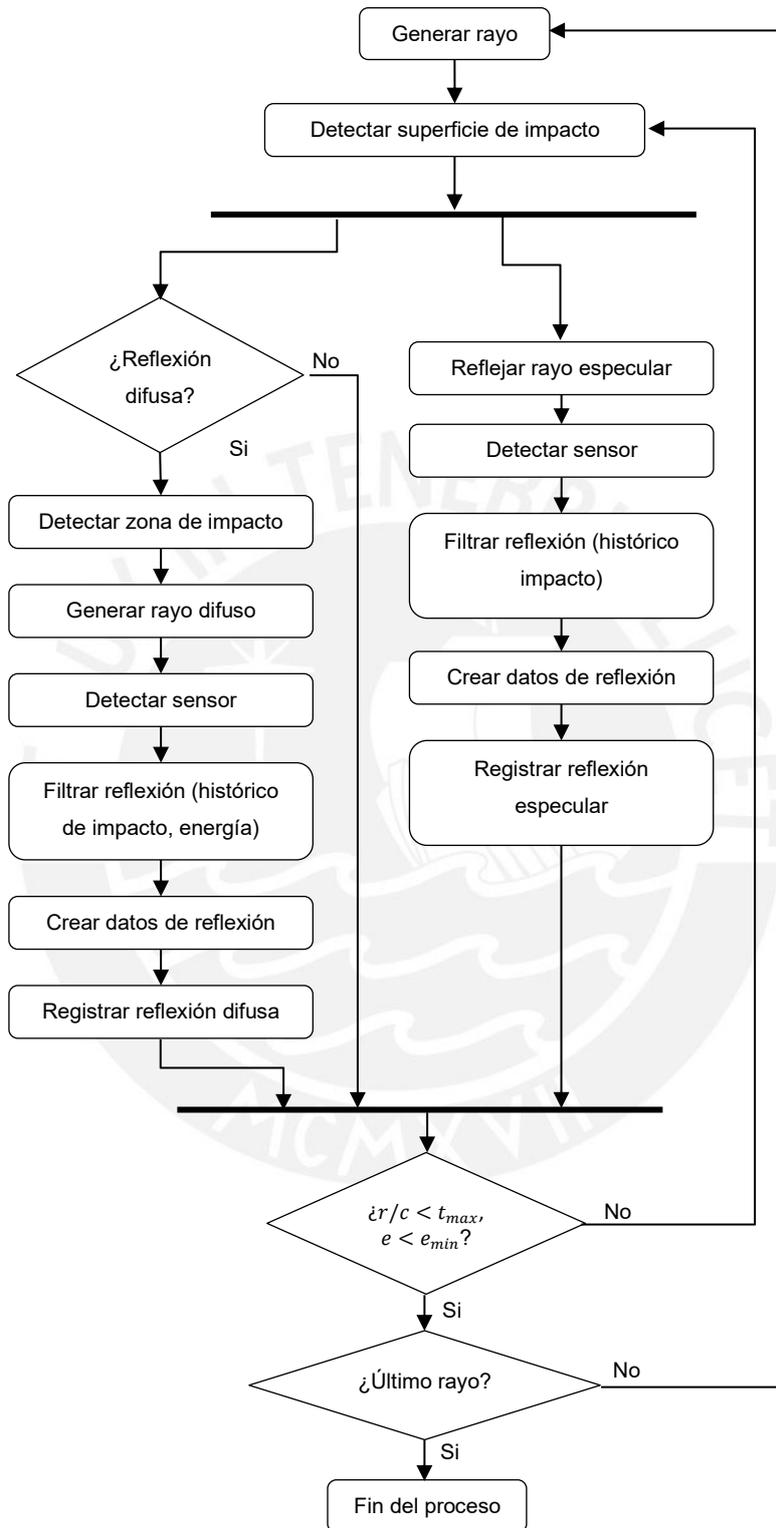


Figura 5.16. Diagrama de flujo del proceso de trazado de rayos y registro de reflexiones especulares y difusas.

5.4.5. Detección de Superficies de Impacto de Rayos

La Figura 5.17 representa el algoritmo para la detección de impacto de los rayos en las superficies. Primero se verifica que el rayo impacte en sentido opuesto a la normal \hat{n}_n de la superficie S_n , luego se determina si el rayo no es paralelo a la superficie, finalmente se determina si el rayo impacta dentro del polígono que define la forma de la superficie. Puede que más de una superficie satisfaga estas condiciones, por lo que se aplica el criterio de la distancia r_n más corta, como está representada en la Figura 5.18 .

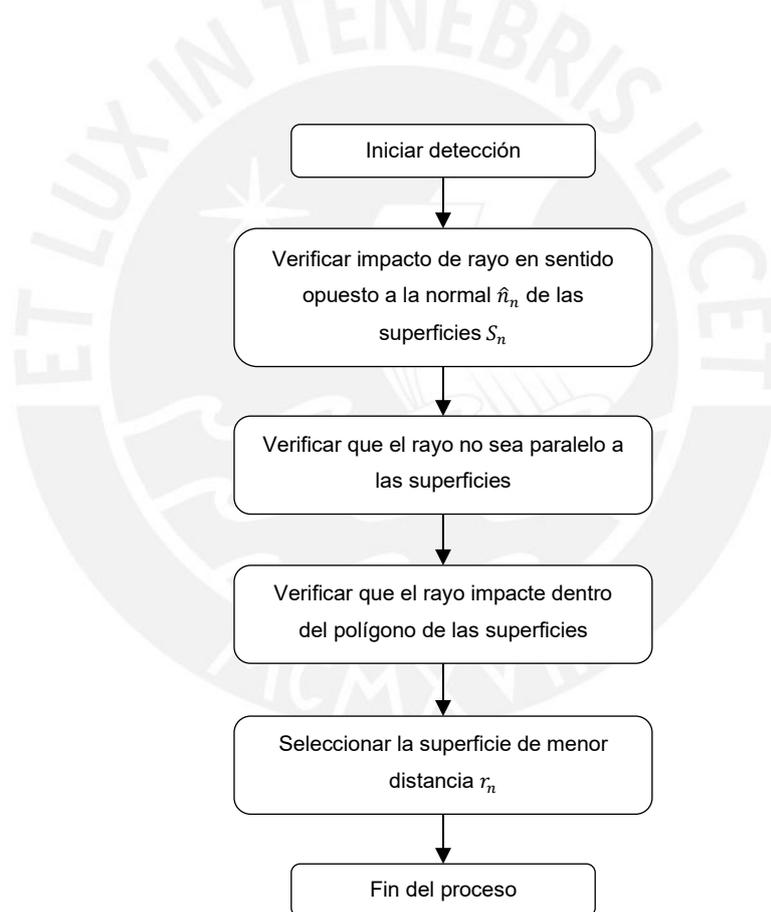


Figura 5.17. Diagrama de flujo del proceso de detección de superficie de impacto de rayo.

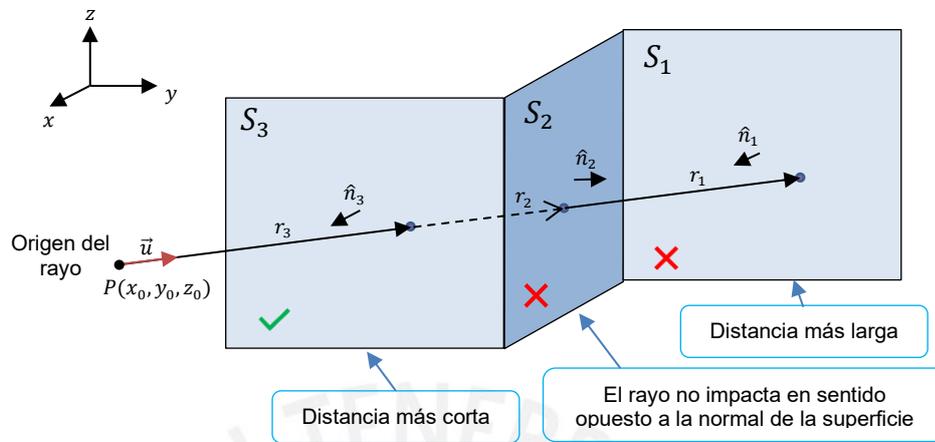


Figura 5.18. Esquema del proceso de descarte y selección de la superficie de impacto del rayo. El rayo impacta en tres superficies (S_1, S_2, S_3). El punto de impacto está dentro del área de cada superficie (dentro de cada polígono). El rayo debe impactar en sentido opuesto del vector normal \hat{n} de cada superficie. Se toma la distancia r_n más corta recorrida por el rayo.

5.4.6. Detección de Rayos por Receptores

Los rayos generados por el sistema son del tipo cónicos cuyo radio extremo va incrementándose con la distancia. El rayo es detectado por el receptor si la distancia de proyección perpendicular l_n del receptor al rayo es menor al radio del cono a la distancia r_n de la fuente como se muestra en la Figura 5.19. Además, la proyección debe caer dentro de la trayectoria del rayo.

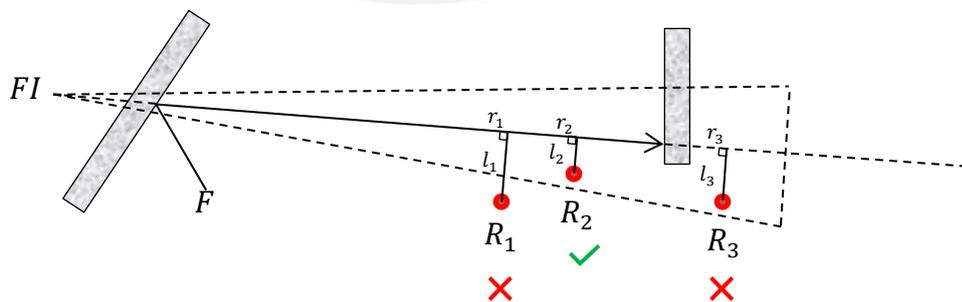


Figura 5.19. Esquema del proceso de detección del rayo cónico por los receptores. F es la fuente, FI la fuente imagen. La posición del receptor R_2 cumple con los requisitos de detección del rayo.

La Figura 5.20 muestra el algoritmo de detección de rayos cónicos por los receptores.

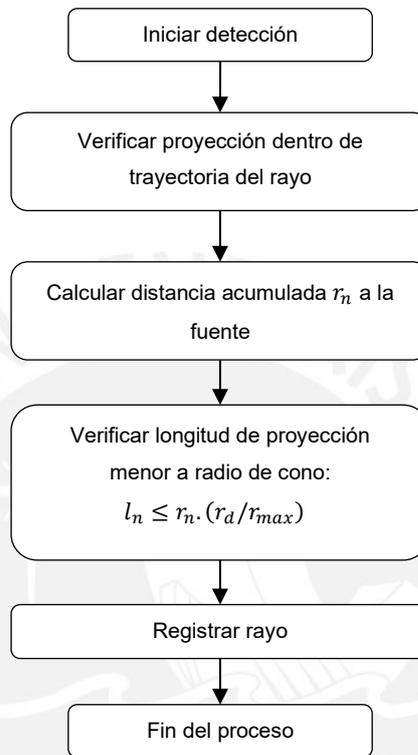


Figura 5.20. Diagrama de flujo del proceso de detección de superficie de impacto de rayo. r_d es el radio del cono a la distancia máxima de simulación r_{max} .

5.4.7. Filtro por Histórico de Impactos de Rayos

Los rayos son filtrados utilizando el histórico de impacto de las superficies reflectoras. Cada superficie tiene un único número que las identifica, dos rayos detectados no pueden tener el mismo histórico de impactos. Para el caso de las reflexiones difusas, se adiciona el índice de la sección del área de superficie impactada por el rayo.

5.4.8. Generación de Frentes de Onda

Los frentes de onda son generados para un número N de rayos distribuidos uniformemente en el espacio y reflejados solo de forma especular. Se calcula el “avance” de los rayos por intervalos constantes de distancia (ejemplo: cada 0.1m) tomando en cuenta el vector unitario que traza la trayectoria del rayo, hasta un valor de distancia máxima determinada por $c \cdot t_{max}$, donde c es la velocidad del sonido y t_{max} es el tiempo máximo de simulación.

Las reflexiones cambian la trayectoria del rayo cambiando la dirección del vector unitario de forma especular. La Figura 5.21 muestra un esquema del proceso de propagación del rayo por tramos.

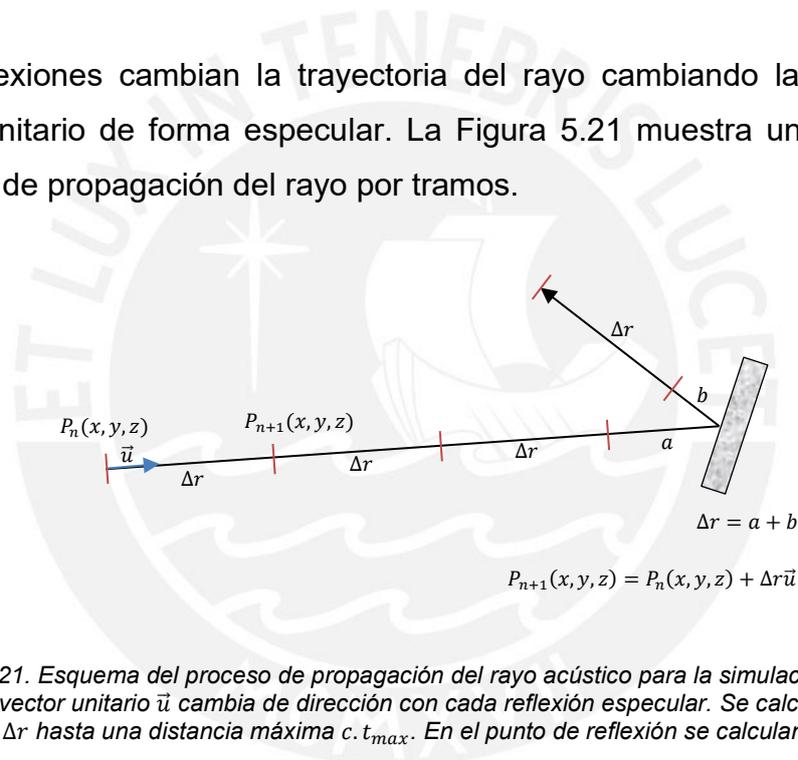


Figura 5.21. Esquema del proceso de propagación del rayo acústico para la simulación de frentes de onda. El vector unitario \vec{u} cambia de dirección con cada reflexión especular. Se calcula el avance del rayo cada Δr hasta una distancia máxima $c \cdot t_{max}$. En el punto de reflexión se calculan los valores a y b .

La Figura 5.22 muestra el algoritmo de generación de frentes de onda del sistema.

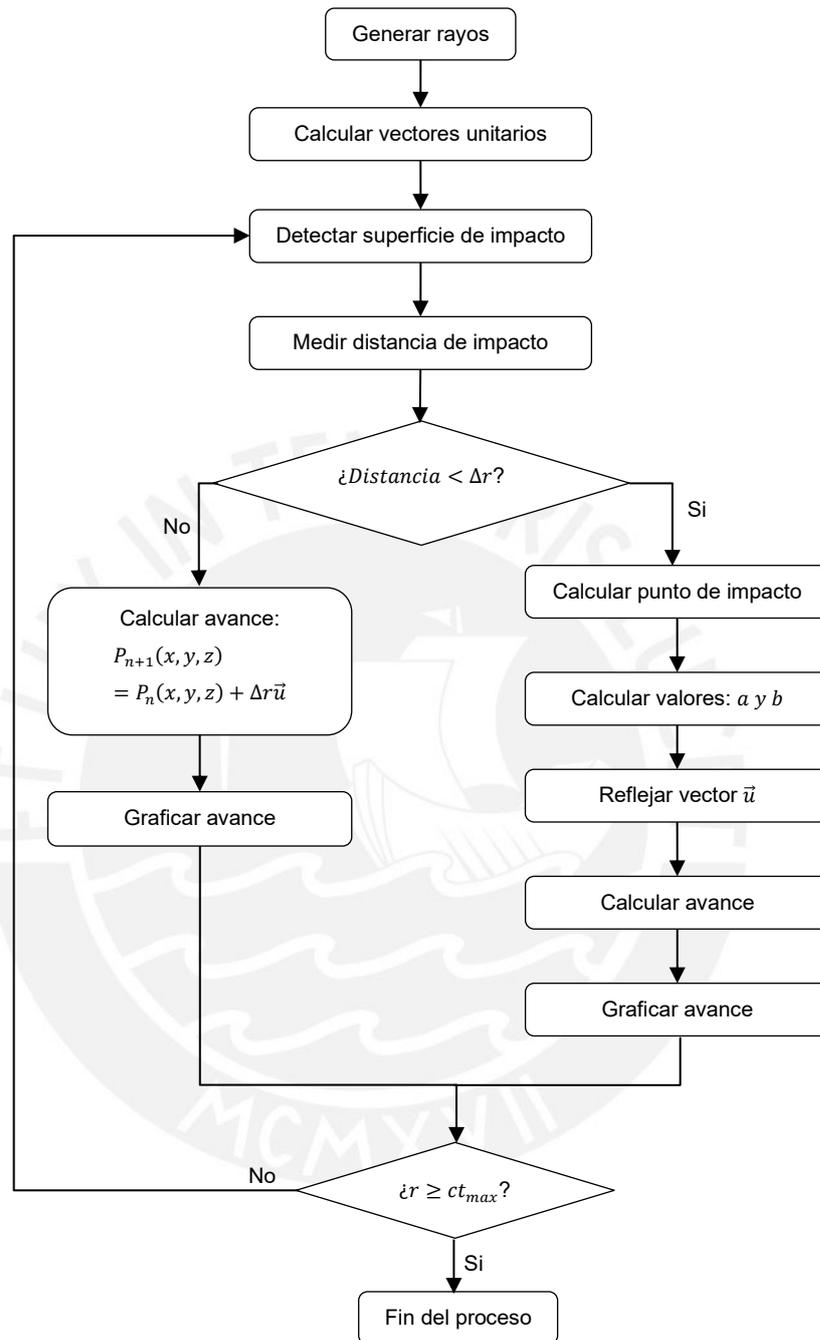


Figura 5.22. Diagrama de flujo del proceso de generación de frentes de onda.

5.4.9. Cálculo de Respuesta Impulsiva

La respuesta impulsiva es calculada a partir de la respuesta en frecuencia resultante producto de las reflexiones en el dominio de la frecuencia, utilizando la transformada Fourier inversa resumida en la ecuación (3.79).

La transformada Fourier inversa puede ser calculada de forma discreta utilizando la transformada discreta de Fourier inversa (IDFT) [21] obteniendo la respuesta impulsiva discreta definida como:

$$h(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H(2\pi k/N) e^{j2\pi kn/N} \quad (5.1)$$

Donde N es el conjunto de frecuencias discretas igualmente espaciadas Δf , con F_s como frecuencia de muestreo se tendrá que $\Delta f = F_s/N$. Si f_{max} es definida como la frecuencia máxima de simulación, por el teorema de Nyquist [21] se tendrá que $F_s \geq 2f_{max}$. Utilizando la transformada rápida de Fourier inversa (IFFT) se tendrá que $N = \lceil F_s \cdot t_{max} \rceil$, donde t_{max} está definida como el tiempo máximo de simulación.

La figura muestra el algoritmo de cálculo de la respuesta impulsiva del recinto utilizando la respuesta en frecuencia resultante.

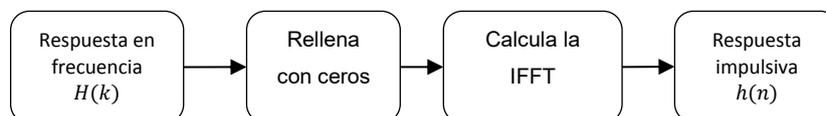


Figura 5.23. Algoritmo para el cálculo de la respuesta impulsiva del recinto.

5.4.10. Convolución en Frecuencia

La convolución en frecuencia es utilizada en el proceso de síntesis o auralización de la respuesta impulsiva obtenida sobre un audio de muestra aplicando la transformada rápida de Fourier (FFT) [1] para simular la acústica del recinto. Una técnica para aplicar la convolución en frecuencia para secuencias de datos largos es aplicar el método de solapamiento y almacenamiento [21].

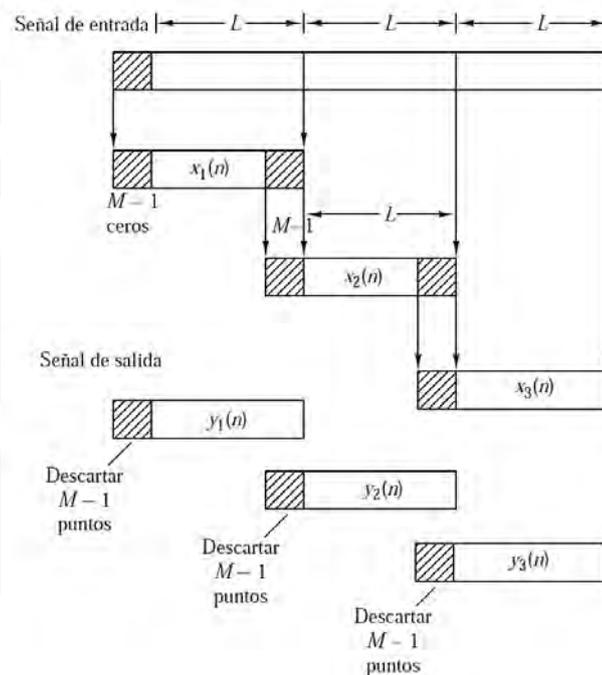


Figura 5.24. Filtrado FIR lineal mediante el método de solapamiento y almacenamiento. (Proakis, 2007).

La figura muestra el proceso de solapamiento y almacenamiento, para un número M de muestras de la respuesta impulsiva (filtro FIR) y un tamaño de secuencia de datos de entrada L . Con $N = L + M - 1$ el tamaño de la transformada de Fourier de la secuencia (añadiendo $M-1$ muestras anteriores) y respuesta impulsiva (añadiendo $L - 1$ ceros). Multiplicando las dos transformada se tiene que: $Y_m(k) = H(k)X_m(k)$, $0 \leq k \leq N - 1$. Al calcular la transformada inversa de la secuencia $Y_m(k)$ se eliminan los primeros $M - 1$ puntos.

5.5. Implementación del Software

La Figura 5.25 muestra la estructura del proyecto del software “AURASONIC” desarrollado en LabVIEW, con programación orientada a objetos.

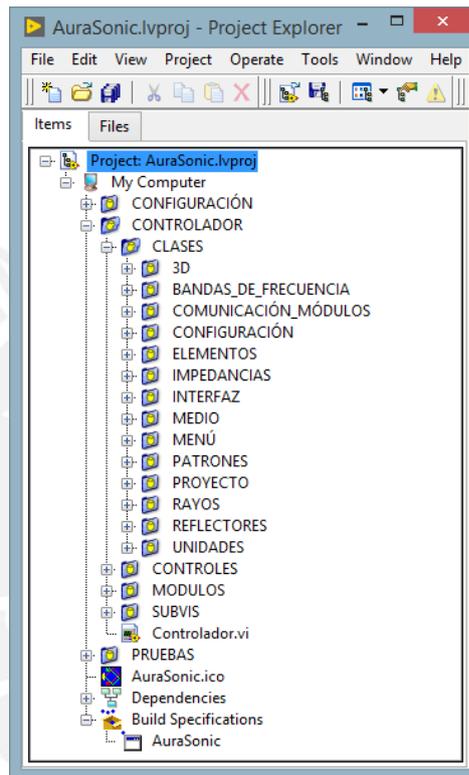


Figura 5.25. Estructura del proyecto del software denominado “AURASONIC” desarrollado para la simulación y síntesis de señales de audio bajo el agua en una piscina de competencias de nado sincronizado.

5.5.1. Jerarquía de Clases

La Figura 5.26 muestra la jerarquía de clases desarrollada para el sistema.

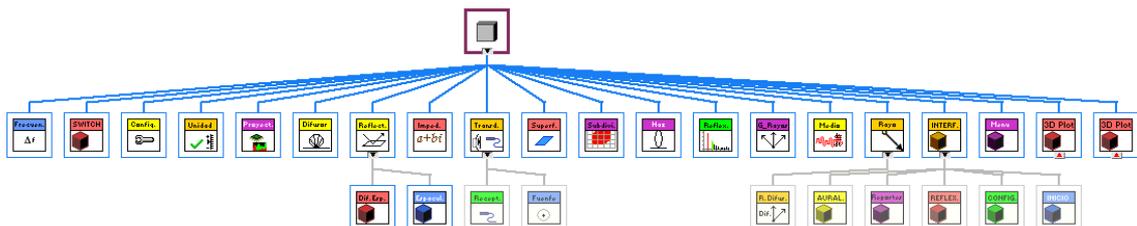


Figura 5.26. Diagrama de jerarquía de clases del sistema.

5.5.2. Interfaces de Usuario

La interfaz de usuario ha sido desarrollada utilizando la herramienta de programación gráfica de LabVIEW. El usuario puede crear bibliotecas de elementos acústicos como: superficies, fuentes y receptores, así como establecer su orientación y ubicación en el escenario de simulación. Del mismo modo el sistema permite crear y editar objetos de las bibliotecas de impedancias, patrones de radiación, etc. Así como configuraciones en generales del proyecto. A continuación se muestran algunas interfaces y funcionalidades para el control de usuario del software "AURASONIC".

Interfaz de Inicio

La interfaz de inicio del sistema permite el acceso a los diferentes módulos y funciones del sistema como son: creación y configuración de proyectos, generación de reflexiones, generación de reportes, auralización, etc. La Figura 5.27 muestra detalles de la interfaz de inicio con el acceso al menú de funciones.

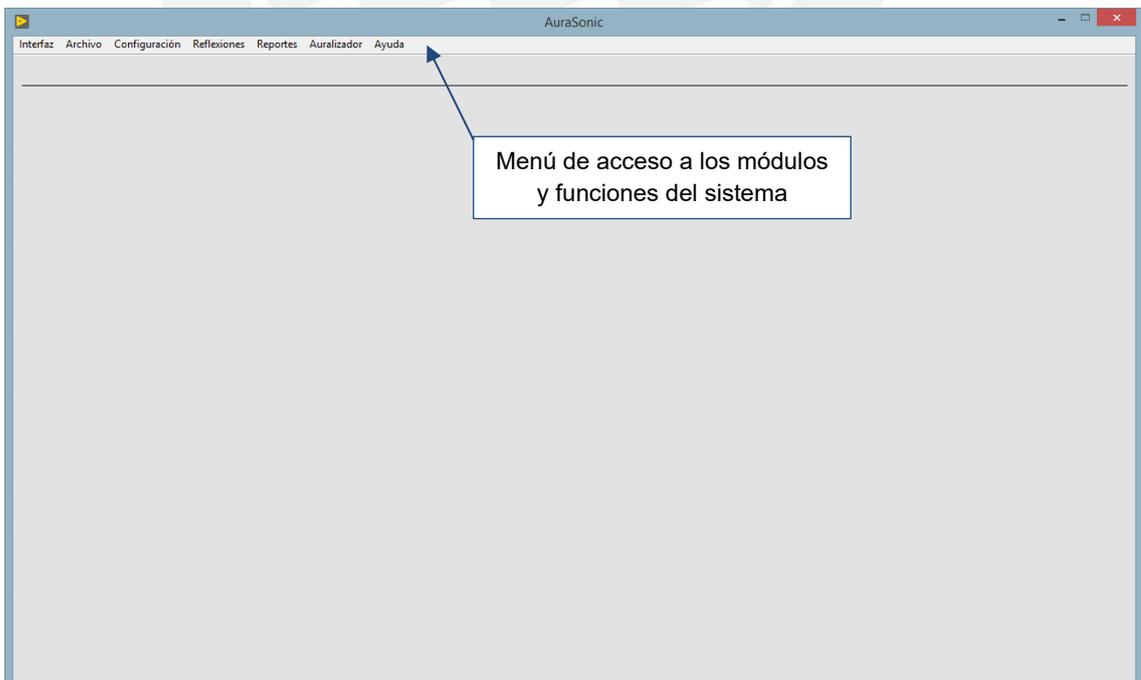


Figura 5.27. Interfaz de inicio del software "AURASONIC".

Interfaz de Configuración de Proyecto

La interfaz de configuración de proyecto permite editar o crear nuevos proyectos, establecer el número de rayos a generar por la fuente, tipo de bandas de frecuencia, definir el medio de propagación, etc. La Figura 5.28 muestra las características de la interfaz de configuración de proyecto.

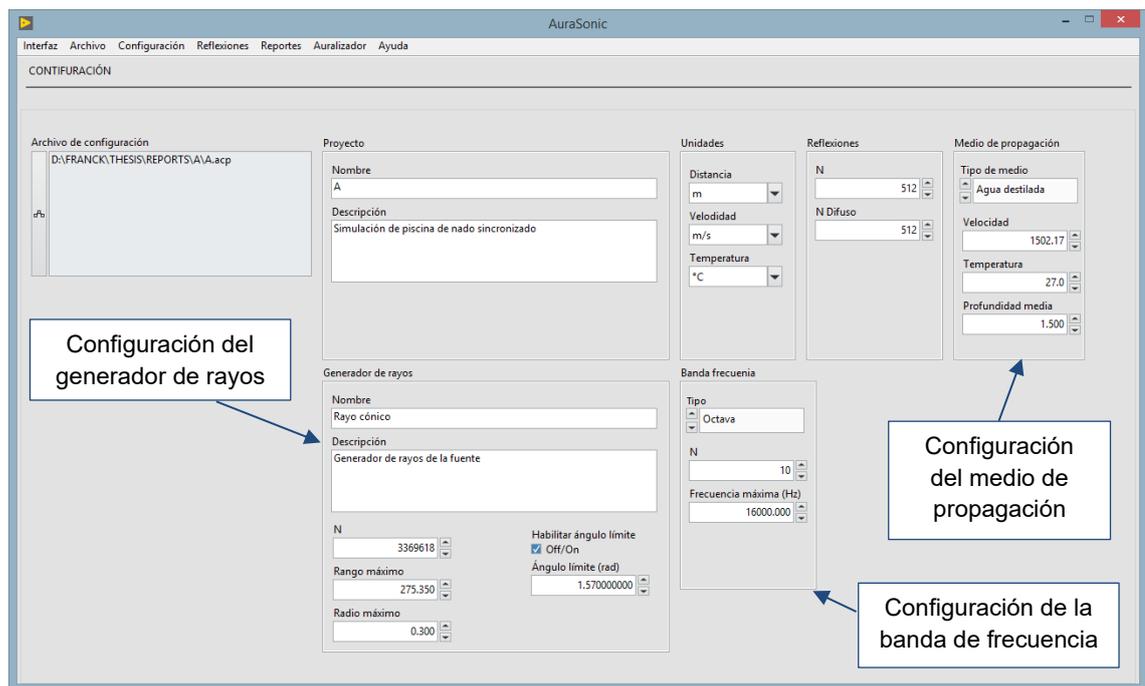


Figura 5.28. Interfaz de configuración de proyecto.

Interfaz de Configuración de Parámetros

La interfaz de configuración de parámetros permite crear y editar los objetos de las bibliotecas de elementos acústicos y configurar sus parámetros, como fuentes, impedancias, superficies reflectoras, etc. La Figura 5.29 muestra detalles de la interfaz de configuración de parámetros de impedancias.

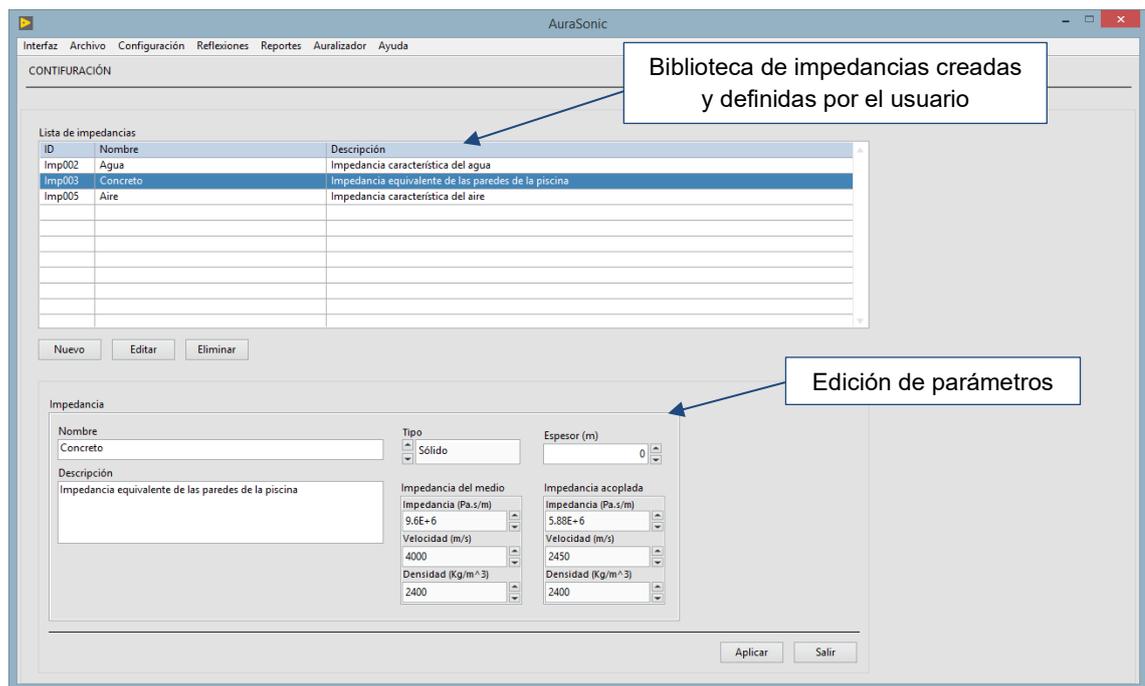


Figura 5.29. Interfaz de configuración de parámetros de impedancias.

Interfaz de Configuración del Escenario

La interfaz permite realizar la construcción del escenario de simulación con la selección de elementos acústicos de las bibliotecas de superficies, fuentes y receptores creadas y editadas previamente por el usuario. La información es ensamblada y mostrada en una presentación 3D en sus tres ejes de coordenadas (x,y,z), el usuario puede rotar y mover la imagen, lo cual le permite tener una perspectiva visual del proyecto creado así como identificar la ubicación y orientación de los elementos en el escenario de simulación. La Figura 5.30 muestra algunos detalles de la interfaz de configuración del escenario de simulación.

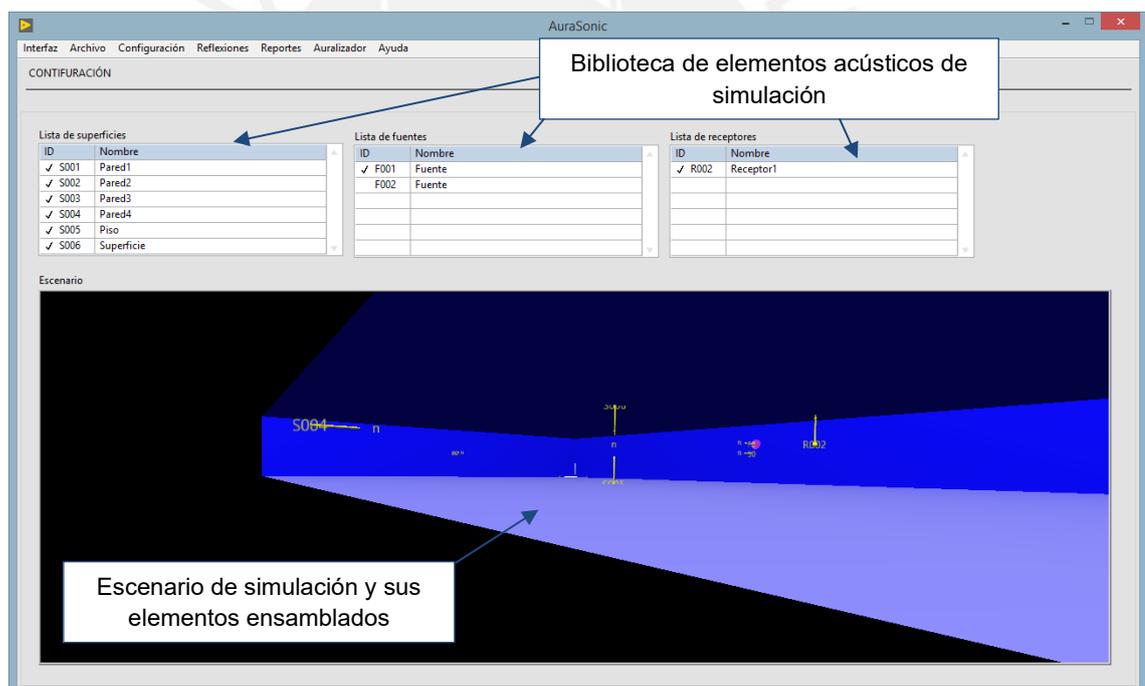


Figura 5.30. Interfaz de configuración del escenario. Selección de elementos de simulación.

Interfaz de Generación de Reflexiones

La interfaz de generación de reflexiones le permite mostrar al usuario el progreso del proceso de generación de reflexiones del proyecto, así como mostrar en tiempo real las soluciones de las reflexiones encontradas por el receptor desde la fuente, mostrando la trayectoria del rayo, así como las superficies en la cual el rayo ha impactado. La Figura 5.31 muestra un proceso de trazados de rayos con un rayo detectado por el receptor desde la fuente emisora.

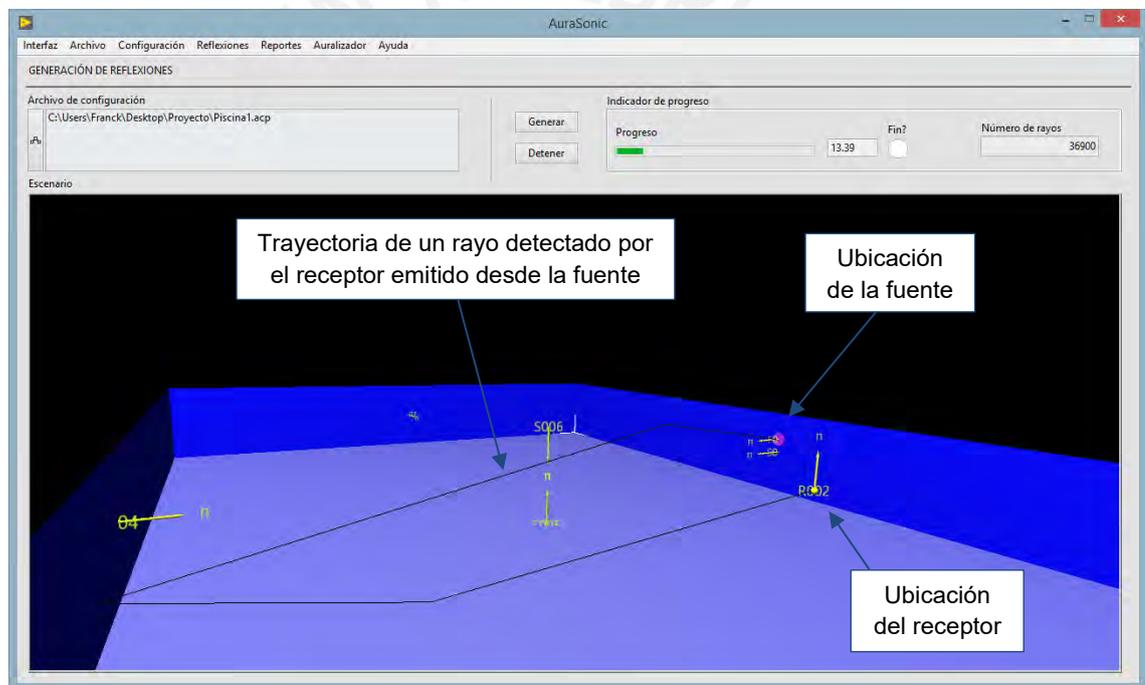


Figura 5.31. Interfaz de generación de reflexiones y visualización de rayos.

Interfaz de Generación de Reportes

La interfaz de generación de reportes permite mostrar los resultados del proceso de simulación, a través de la respuesta impulsiva energética, respuesta al impulso integrado, respuesta en frecuencia de la respuesta impulsiva (magnitud y fase), así como algunos parámetros de la inteligibilidad de la palabra como: D, C50, C80 y tiempo central. La Figura 5.32 muestra algunos detalles de la interfaz de usuario para la generación de reportes.

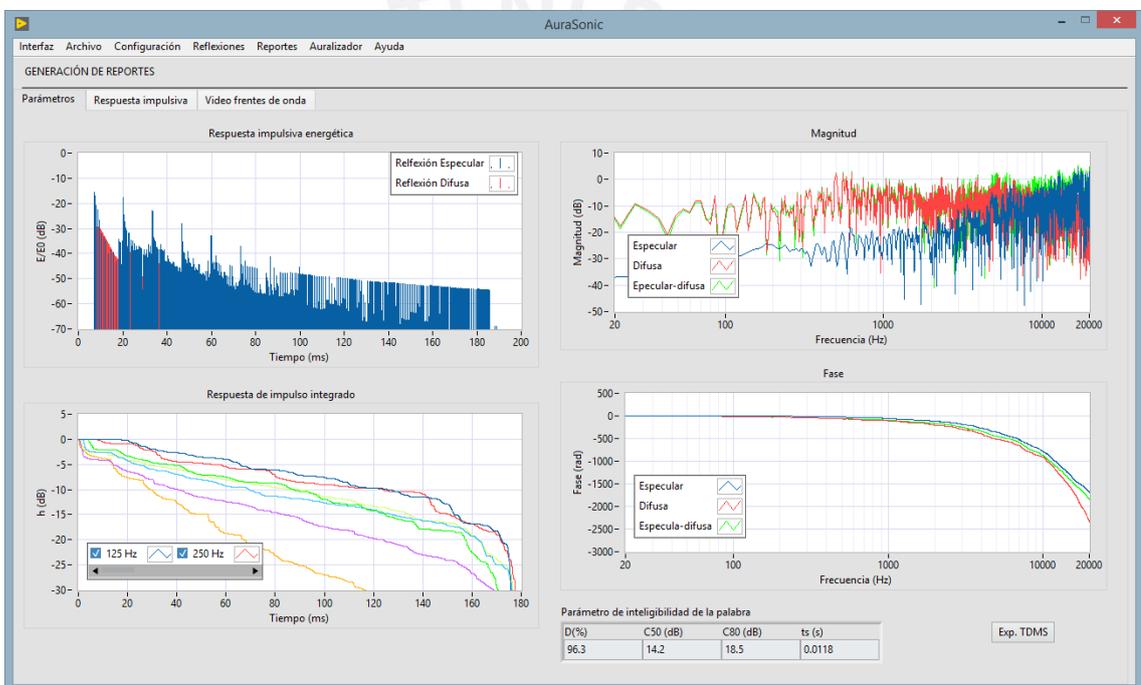


Figura 5.32. Interfaz de generación de reportes de parámetros acústicos.

Interfaz de Generación de Respuesta Impulsiva

La interfaz muestra los resultados de simulación con los datos de la respuesta impulsiva del recinto, donde se aprecia la respuesta impulsiva de las reflexiones de origen puramente especular, difusa y la combinación de ambas. La Figura 5.33 muestra los detalles de la interfaz de generación de respuesta impulsiva.

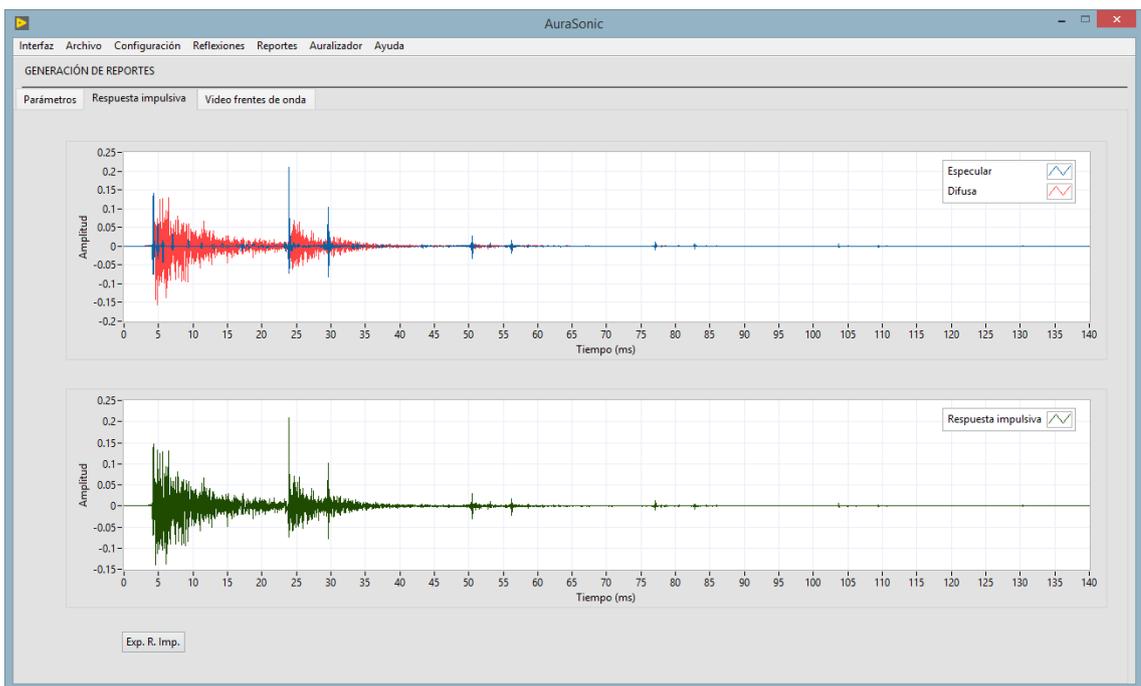


Figura 5.33. Interfaz de generación de respuesta impulsiva del recinto.

Interfaz de Generación de Frentes de Onda

La interfaz permite mostrar la simulación de formación de frentes de onda y generar archivos de video en formato AVI. El usuario puede mover la imagen en 3D mientras se encuentra el proceso de simulación, y así tener una mejor perspectiva de como se propagan las ondas en el recinto simulado. La Figura 5.34 muestra algunos detalles de la interfaz de generación de frentes de onda.

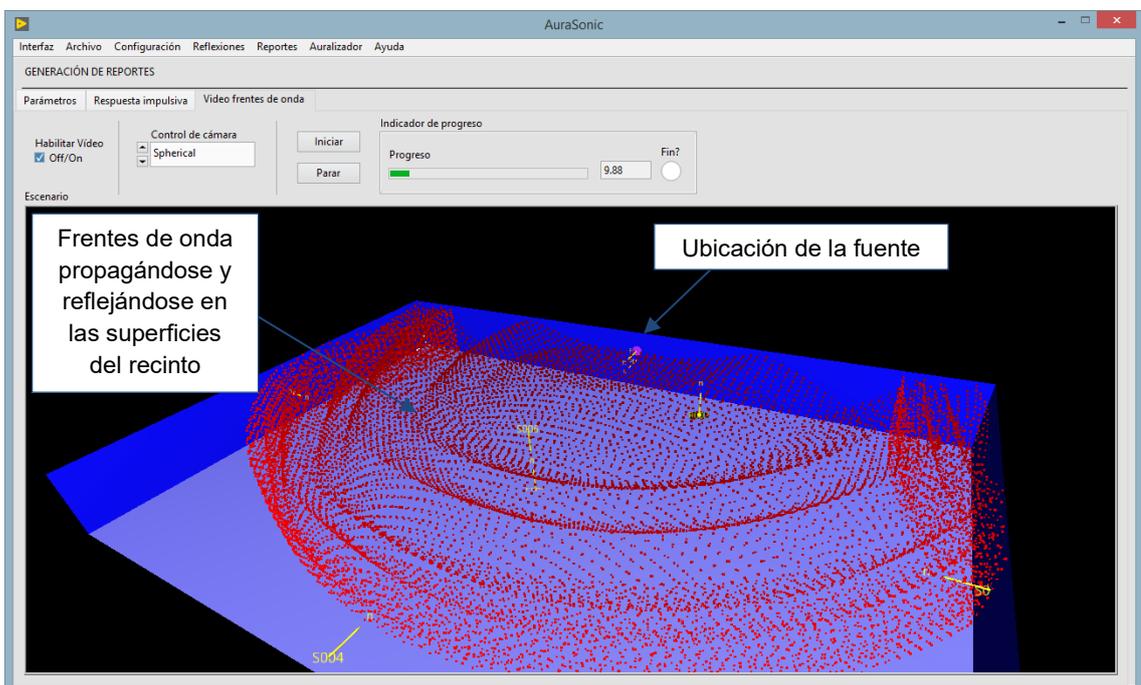


Figura 5.34. Interfaz de simulación de generación de frente de onda.

Interfaz de Auralización

La interfaz de auralización permite hacer el proceso de convolución en tiempo real de la respuesta impulsiva sintetizada de un recinto simulado con un archivo de audio de referencia, reproduciendo en sonido a través de la tarjeta de sonido de la computadora. La Figura 5.35 muestra detalles de la interfaz de auralización.

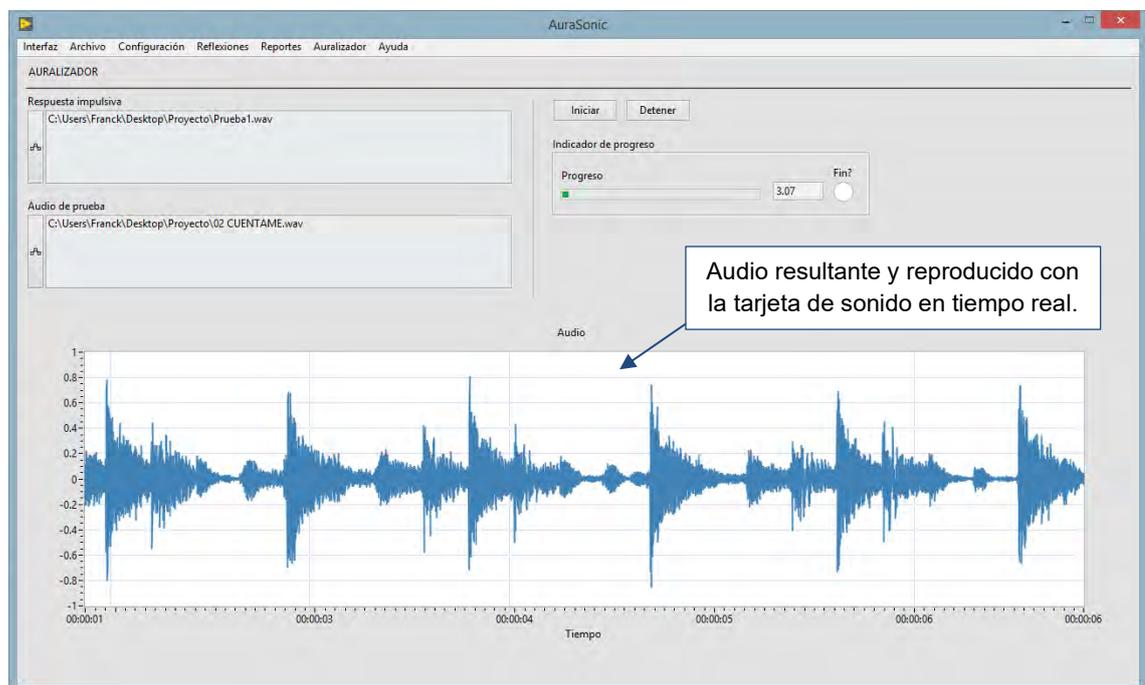


Figura 5.35. Interfaz de auralización. Audio resultante de la convolución de la respuesta impulsiva sintetizada y un archivo de audio en tiempo real.

Algunos ejemplos del código generado en LabVIEW para el desarrollo del sistema “AURASONIC” son mostradas en el Anexo V, así como un ejemplo del archivo de configuración de proyecto en el Anexo VI.

CAPÍTULO 6

CARACTERIZACIÓN DE LOS CAMPOS SONOROS UTILIZANDO EL SOFTWARE DE SIMULACIÓN

6.1. Introducción

En el presente capítulo se establecen las condiciones y configuración para la simulación del campo sonoro al interior de una la piscina de competencias olímpicas de nado sincronizado, y se realiza un análisis con los resultados obtenidos por el software de simulación desarrollado, denominado “AURASONIC”. Utilizando trece puntos de prueba definidos de forma aleatoria, se representan puntos de audición que podrían ser ocupados por competidores de nado sincronizado, y que sirven para hacer el análisis del caso de aplicación.

Los reportes generados por el software “AURASONIC” indican las reflexiones temporales del recinto, la respuesta al impulso integrado (por bandas de frecuencia), la respuesta en frecuencia, la respuesta impulsiva y parámetros de inteligibilidad de la palabra. Los datos de la respuesta impulsiva sintetizadas son exportados a archivos en formato WAV, luego utilizando y analizados por el software “AURASONIC” para el proceso de auralización; así mismo, los archivos WAV son utilizados por el software Dirac [45] para el cálculo de valores STI.

Con el software “AURASONIC” se genera la simulación del frente de onda iniciada en la fuente de sonido, mostrando una secuencia de imágenes que representa la reflexión y propagación el sonido al interior del vaso de la piscina. Finalmente se hace un análisis de los resultados obtenidos describiendo las características acústicas del recinto.

6.2. Configuración de las Pruebas

Los parámetros de configuración de las pruebas de simulación son determinados por las características y dimensiones de las piscinas de competencia (definidas en el Capítulo 4), donde se han definido parámetros como: tiempo de reverberación, radio de pistón radiador, temperatura, etc.

La Tabla 6.1 muestra la lista de parámetros para la configuración de las pruebas de los campos sonoros en la piscina de nado sincronizado.

Parámetro	Valor	Descripción
c_{aire}	347.5 m/s	Velocidad del sonido en el aire a 27°C.
ρ_{aire}	1.176 kg/m ³	Densidad del aire a 27°C.
z_{aire}	408.66 Pa.s/m	Impedancia característica del aire a 27°C.
T	27°C	Temperatura del agua.
c_{agua}	1502.17 m/s	Velocidad del sonido en el agua a 27°C.
ρ_{agua}	996.53 kg/m ³	Densidad del agua a 27°C.
c_L	4000 m/s	Velocidad de onda de compresión en el concreto [20].
c_T	2450 m/s	Velocidad de onda de corte en el concreto [20].
$\rho_{Concreto}$	2400 kg/m ³	Densidad del concreto [20].
z_{agua}	1.497x10 ⁶ Pa.s/m	Impedancia característica del agua a 27°C.
z_L	9.6x10 ⁶ Pa.s/m	Impedancia acústica de la onda de compresión en el concreto.
z_T	5.88x10 ⁶ Pa.s/m	Impedancia acústica de la onda de corte en el concreto.
Longitud	30 m	Longitud del vaso de la piscina.
Ancho	20 m	Ancho del vaso de la piscina
Profundidad	3 m	Profundidad del vaso de la piscina
a	140 mm	Radio del pistón radiador
T_{rev}	366.6 ms	Tiempo de reverberación.
t_{max}	183.3 ms	Tiempo máximo de simulación igual a: $T_{rev}/2$.
r_d	0.3 m	Radio de detección a la distancia máxima r_{max} .
r_{max}	275.35 m	Distancia máxima de simulación igual a: $c_{agua} \cdot t_{max}$
N_{ray}	3369618	Número de rayos a generar.
σ_h	1 cm	Rugosidad de la superficie del agua (RMS).
N	8192	Número de muestra de la respuesta impulsiva.
F_S	44100 Hz	Frecuencia de muestreo para la respuesta impulsiva.

Tabla 6.1. Lista de parámetros para la configuración de las pruebas de caracterización de los campos sonoros en la piscina de nado sincronizado.

Para el modelamiento de la fuente se ha seleccionado un pistón rígido de radio 140mm montado en la pared de la superficie de la piscina en la siguiente ubicación: $x=0.02\text{m}$, $y=15\text{m}$, $z=2\text{m}$ (1m de profundidad.)

Se han seleccionado 13 puntos de audición para la ubicación de los receptores, identificados con letras como se observa en la Figura 6.1 (desde el punto de vista del plano xy .) Los puntos se encuentran dentro de la zona de ejecución de las rutinas de nado sincronizados según lo definido en la sección 4.3, y que representan puntos de audición que podrían ser ocupados por competidores de nado sincronizado. La profundidad (definida en el eje z) de cada punto ha sido seleccionada de forma aleatoria en un rango de 0.04m hasta 2.5m de profundidad. La Tabla 6.2 resume la ubicación de los puntos de audición.

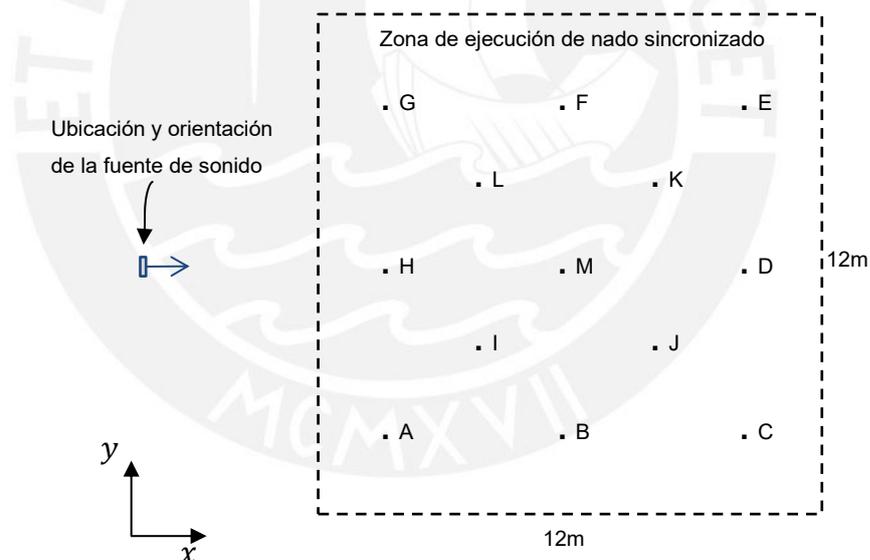


Figura 6.1. Selección de puntos de audición identificados por letras en la zona de ejecución de nado sincronizado.

Los receptores se han modelado utilizando patrones de recepción omnidireccionales.

Punto	x (m)	y (m)	z (m)	Profundidad (m)
A	5.5	10.5	1.7	1.3
B	10	10.5	2.19	0.81
C	14.5	10.5	2.73	0.27
D	14.5	15	2.92	0.08
E	14.5	19.5	2.77	0.23
F	10	19.5	1.02	1.98
G	5.5	19.5	1.81	1.19
H	5.5	15	2.77	0.23
I	7.75	12.75	1.47	1.53
J	12.25	12.75	2.16	0.84
K	12.25	17.25	2.62	0.38
L	7.75	17.25	1.42	1.58
M	10	15	1.71	1.29

Tabla 6.2. Ubicación de puntos de audición.

6.3. Reportes

A continuación se presentan los reportes generados por el software "AURASONIC" como resultado de la simulación del recinto subacuático; así mismo, se muestra un resumen de los parámetros calculados relacionados a la inteligibilidad de la palabra, representando a los trece puntos de audición seleccionados.

Adicionalmente, se muestran los resultados STI para una muestra de audio analizada por el software Dirac [45] (software especializado en acústica arquitectónica), así como una simulación del frente de onda acústico generado por el software "AURASONIC".

6.3.1. Resultados de la Simulación

A

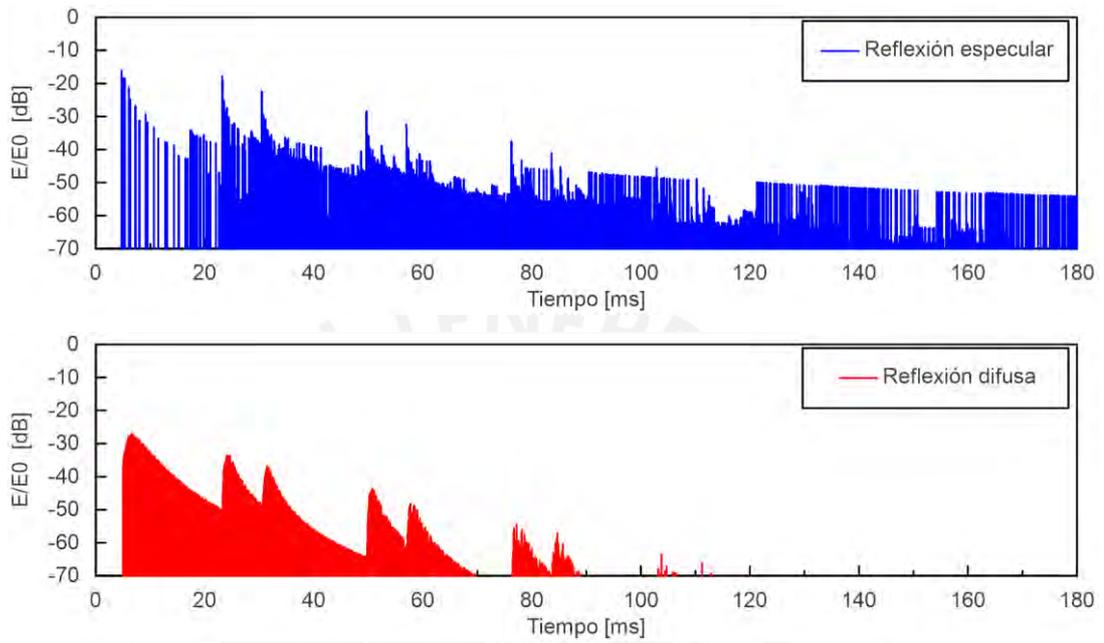


Figura 6.2. Distribución temporal de las reflexiones en el punto A.

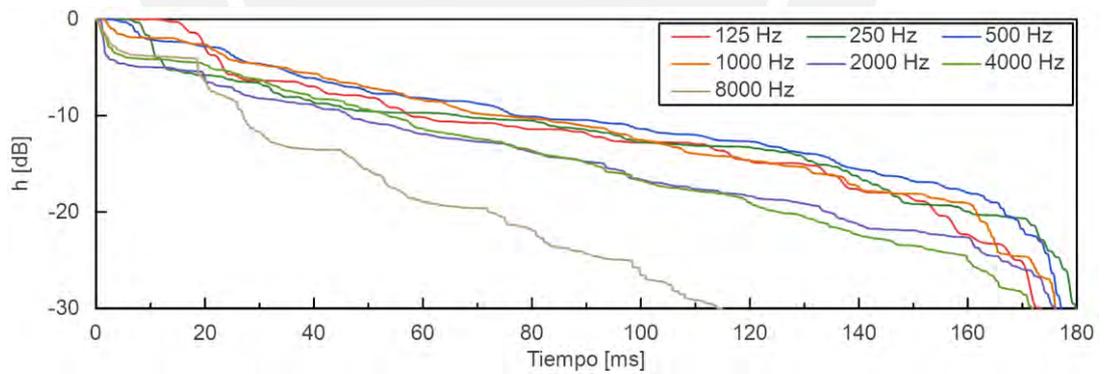


Figura 6.3. Respuesta de impulso integrado en el punto A.

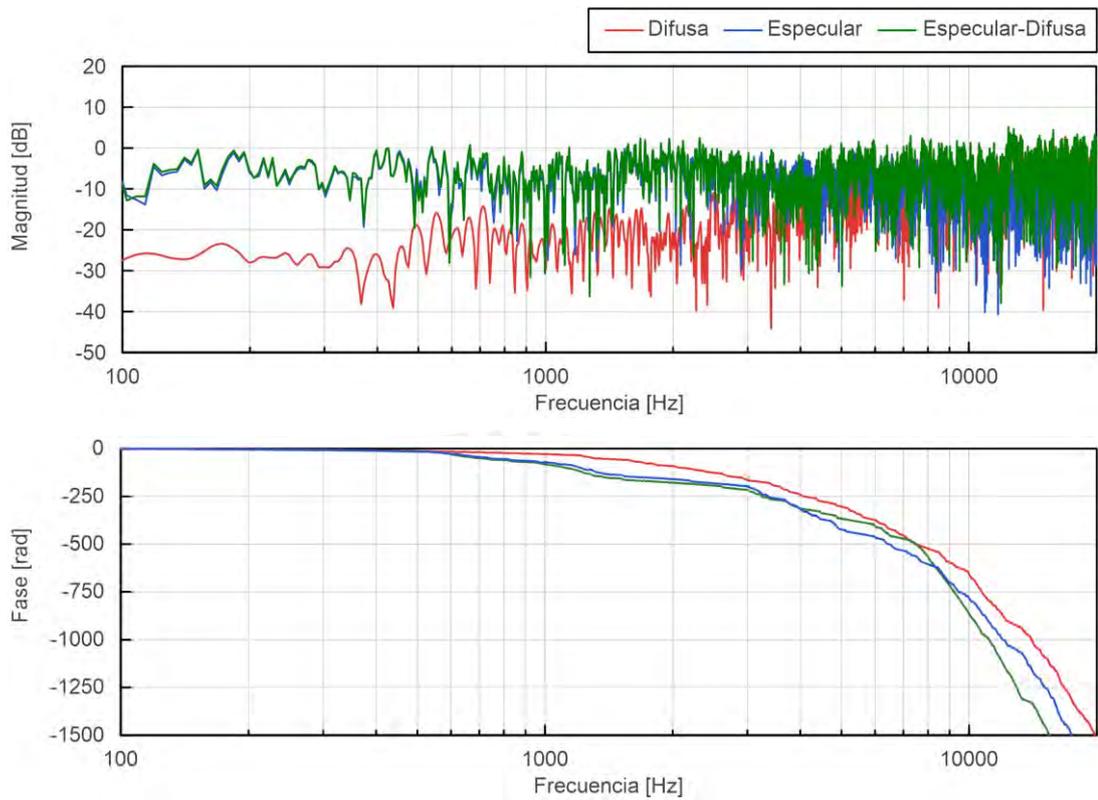


Figura 6.4. Respuesta en frecuencia en el punto A.

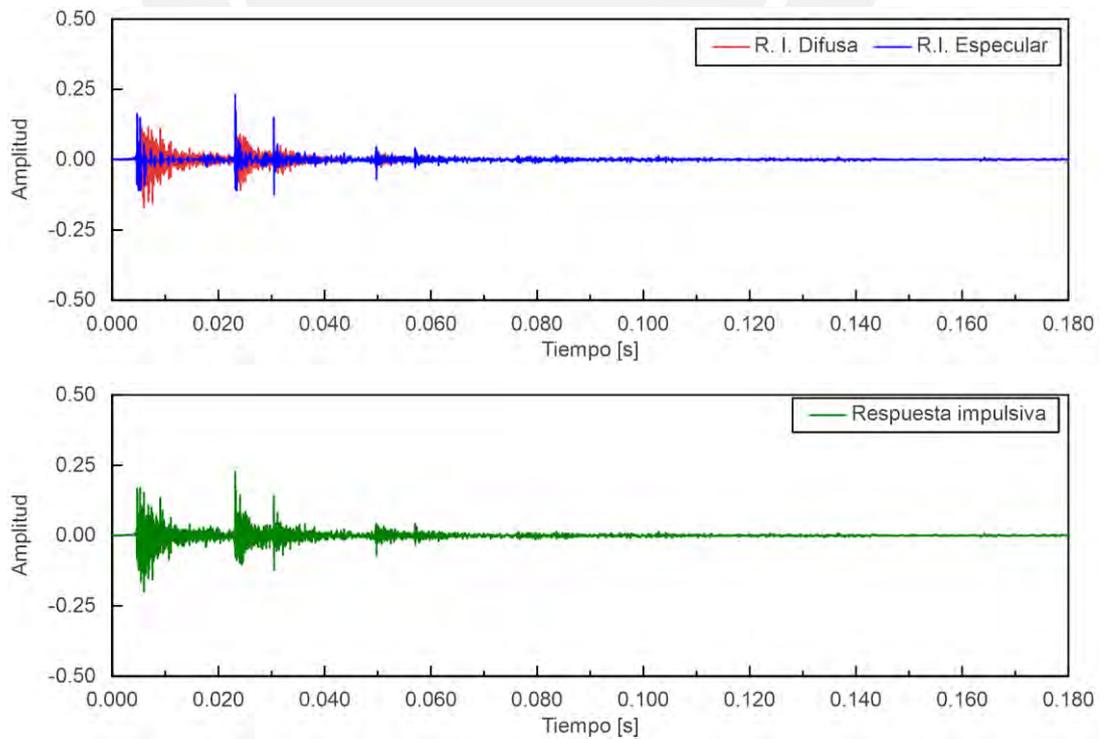


Figura 6.5. Respuesta impulsiva en el punto A.

E

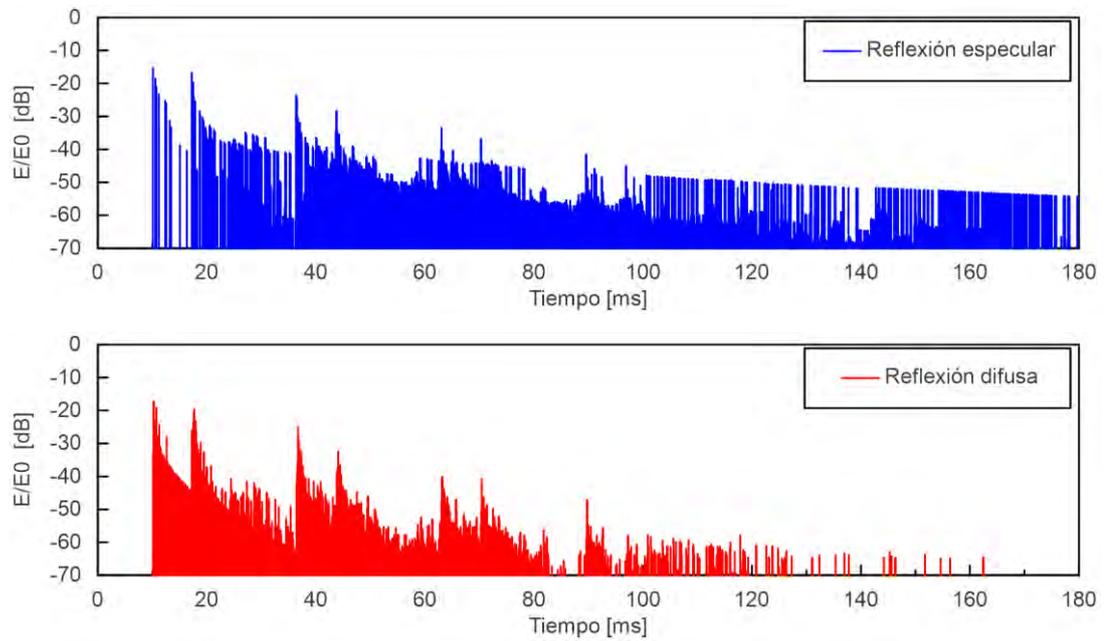


Figura 6.6. Distribución temporal de las reflexiones en el punto E.

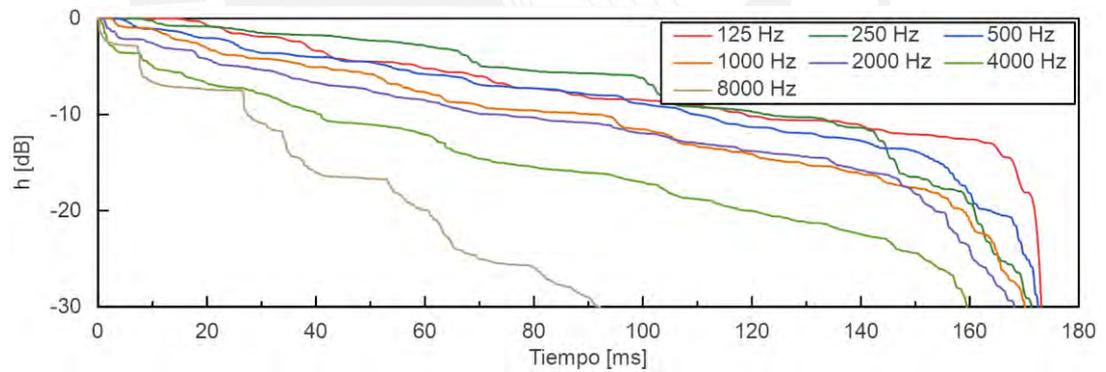


Figura 6.7. Respuesta de impulso integrado en el punto E.

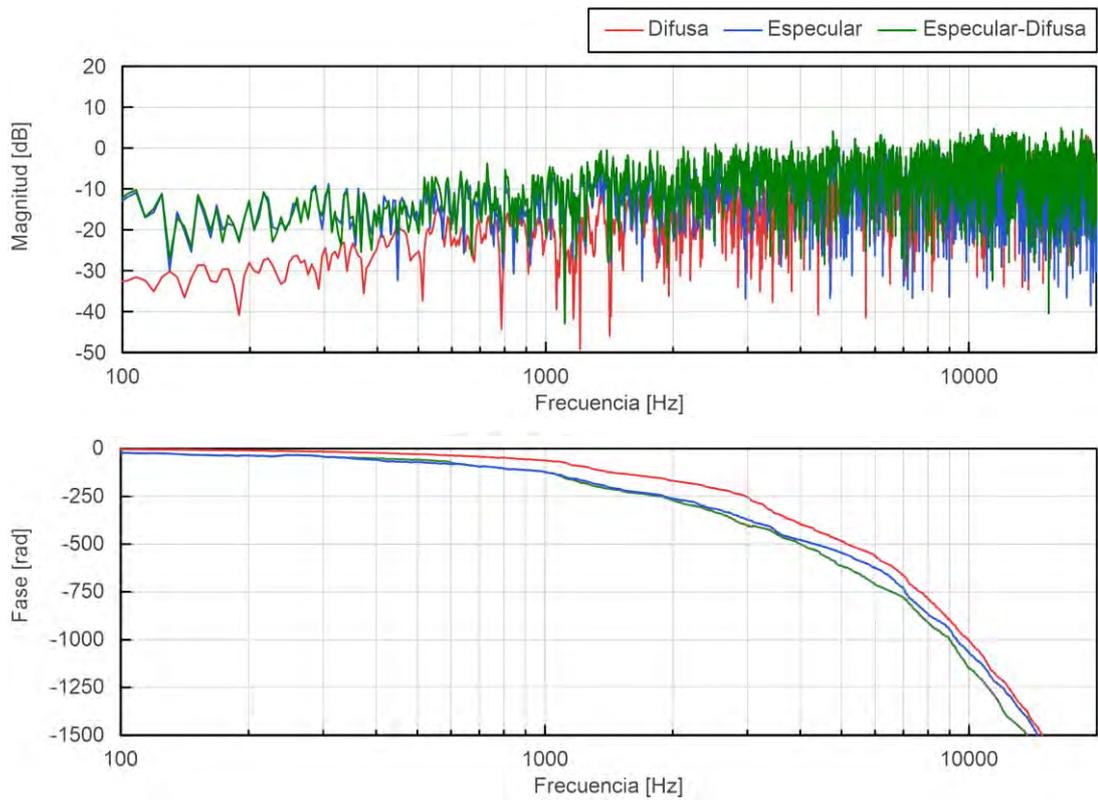


Figura 6.8. Respuesta en frecuencia en el punto E.

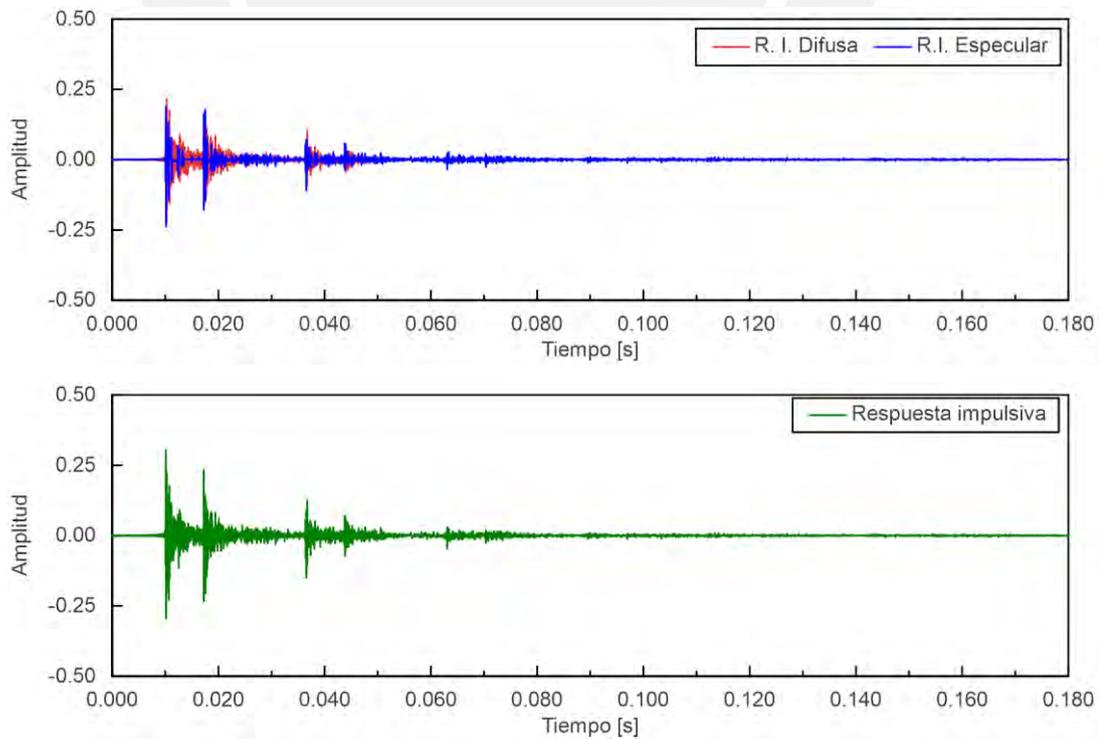


Figura 6.9. Respuesta impulsiva en el punto E.

M

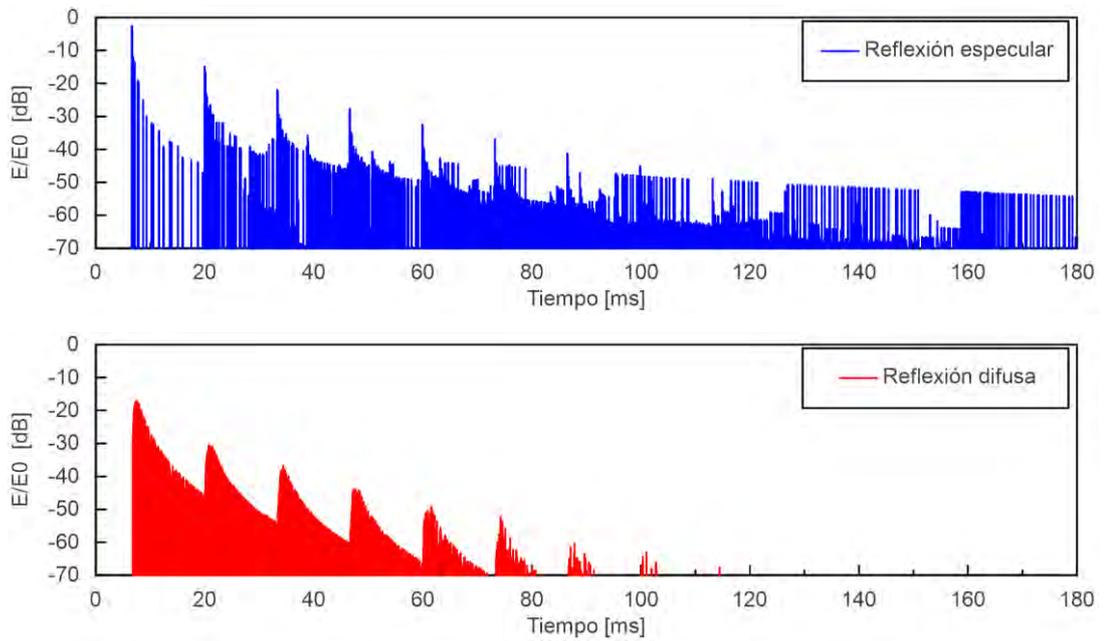


Figura 6.10. Distribución temporal de las reflexiones en el punto M.

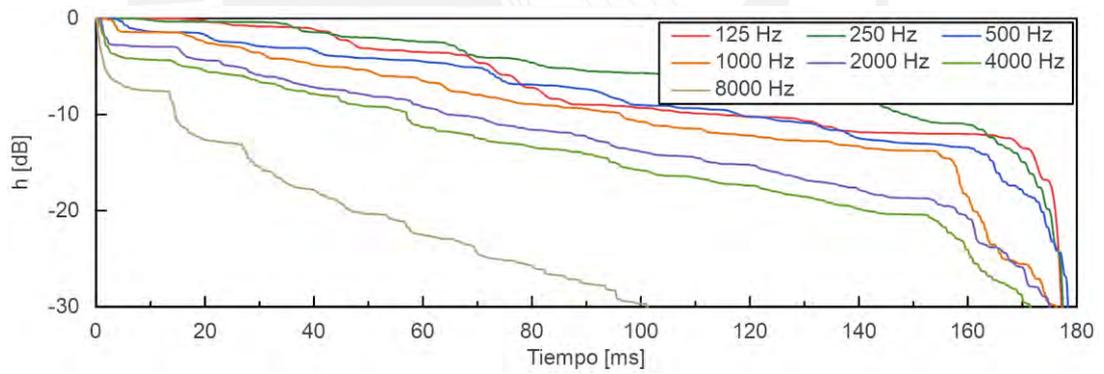


Figura 6.11. Respuesta de impulso integrado en el punto M.

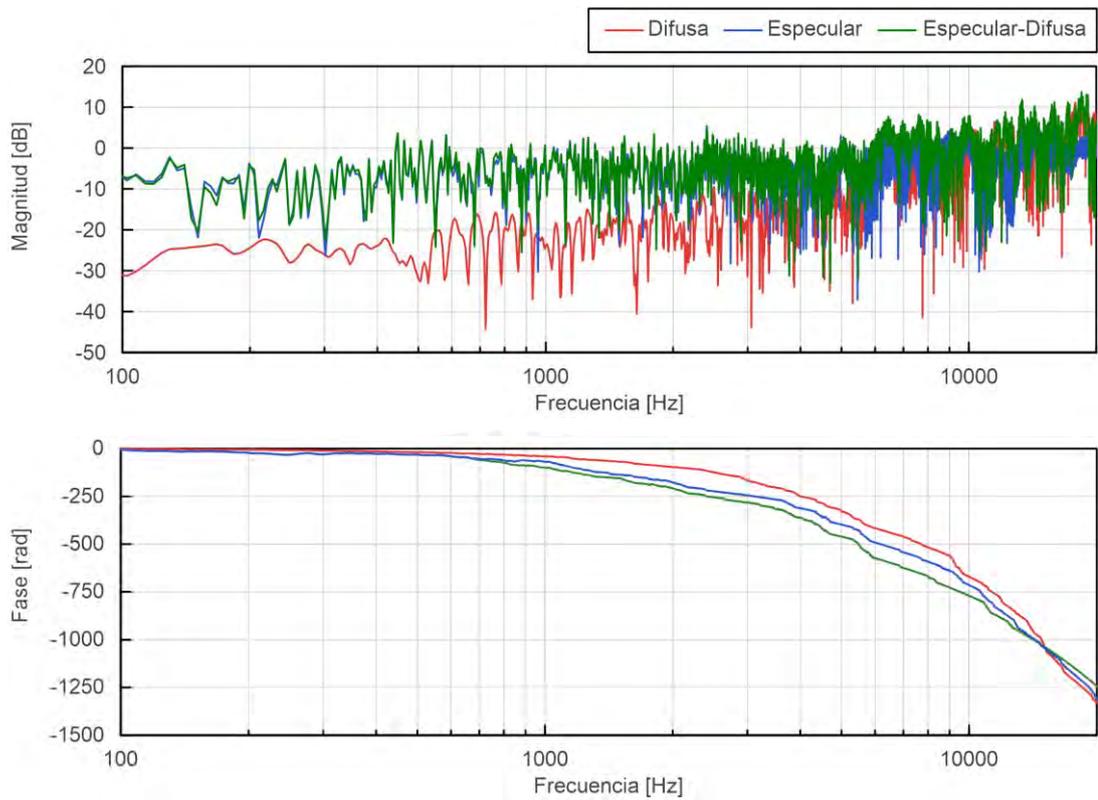


Figura 6.12. Respuesta en frecuencia en el punto M.

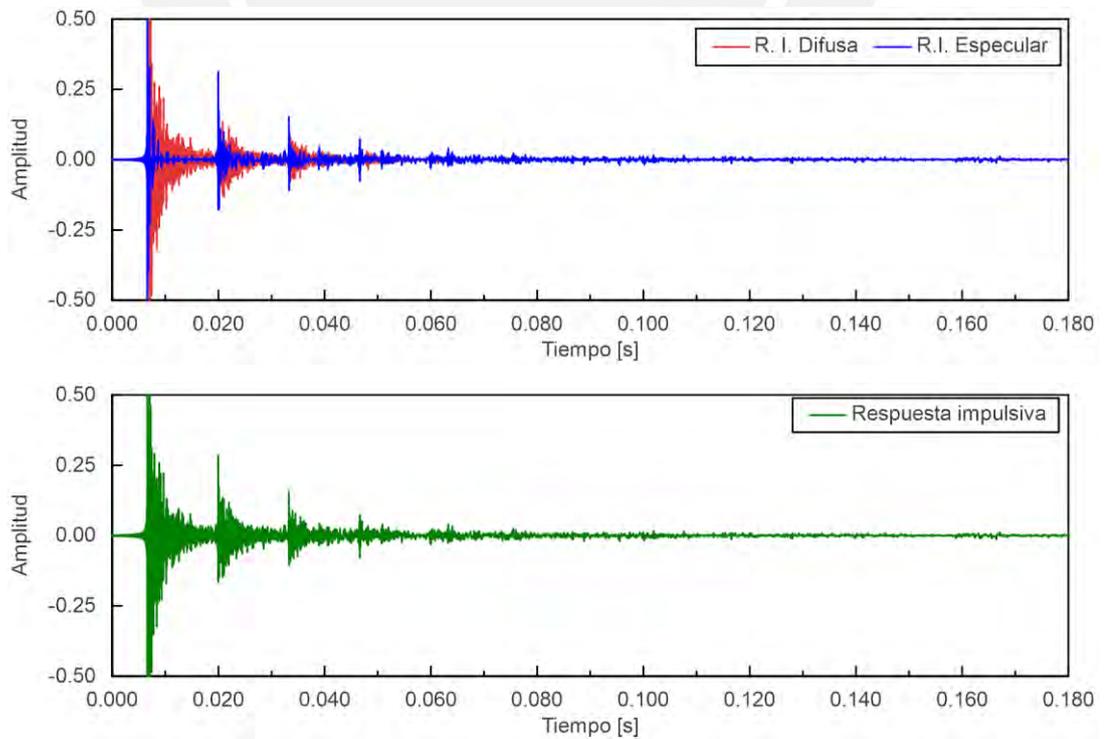


Figura 6.13. Respuesta impulsiva en el punto M.

Más resultados de simulación correspondiente de los puntos: B, C, D, F, G, H, I, J, K y L, son mostrados en el ANEXO VII.

Parámetros de Inteligibilidad de la Palabra

La Tabla 6.3 muestra los resultados de los parámetros acústicos obtenidos, relacionados a la inteligibilidad de la palabra, como son: “definición”, “claridad” y “tiempo central”, para cada punto de simulación.

Punto	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
D50 (%)	96.49	96.94	96.93	99.41	96.89	96.31	96.16	99.68	98.33	98.3	98.48	98.1	98.85
C50 (dB)	14.39	15.01	14.99	22.28	14.94	14.17	13.99	24.98	17.71	17.61	18.1	17.14	19.36
C80 (dB)	19.15	19.89	20.54	27.71	20.39	18.53	18.62	29.08	21.81	22.03	23.12	21.25	23.43
ts (s)	0.013	0.012	0.01	0.003	0.01	0.012	0.014	0.002	0.008	0.007	0.007	0.009	0.005

Tabla 6.3. Parámetros acústicos de inteligibilidad de la palabra.

6.3.2. Análisis STI Utilizando Software Especializado en Acústica de Recintos.

La Figura 6.14 muestra los resultados de STI y RASTI generados por el software Dirac [45]. La información proporcionada al software es un archivo en formato WAV, que corresponde a la respuesta impulsiva sintetizada por el programa AURASONIC en el punto “E” de audición en la zona de ejecución del nado sincronizado.

Los valores obtenidos en STI son mayores a 0,8 correspondiente a la categoría de “excelente” según lo indicado en la Tabla 3.1, del mismo modo para valores RASTI de 0.75.

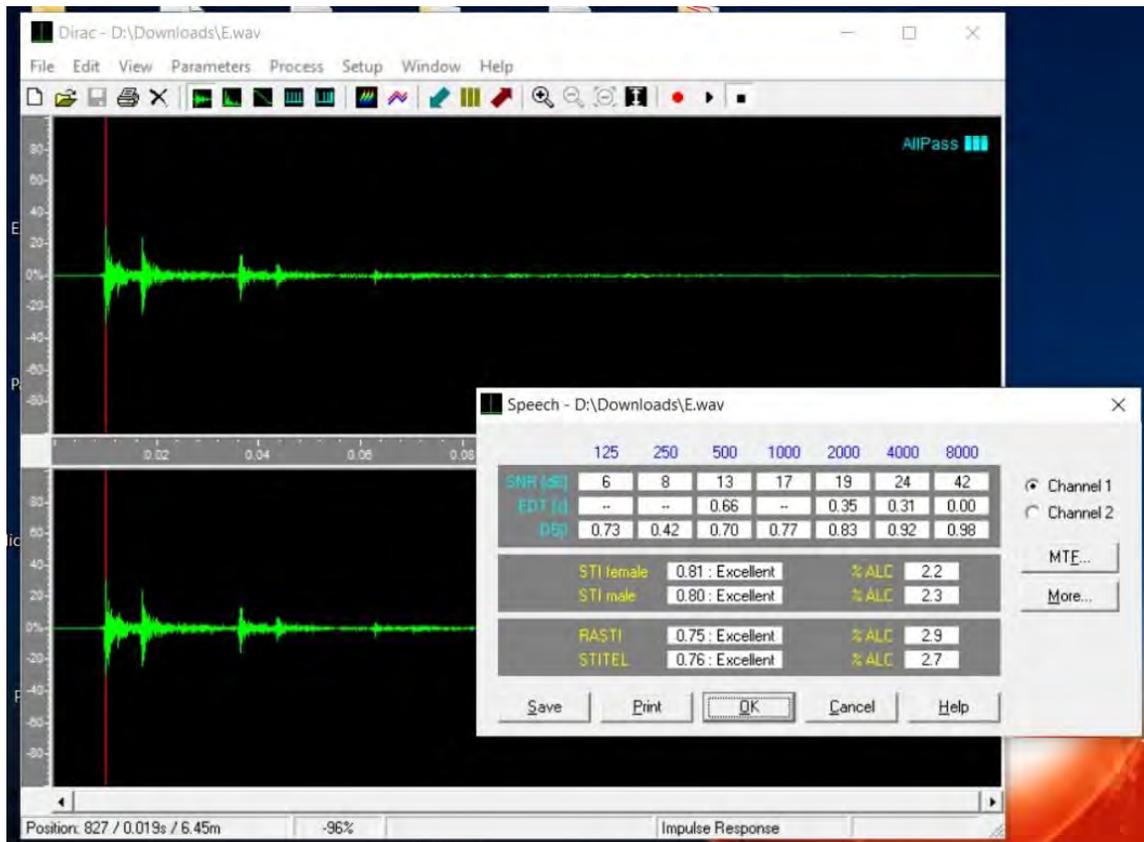


Figura 6.14. Análisis de la respuesta impulsiva en el punto E con el software Dirac[45].

6.3.3. Simulación del Frente de Onda Acústico

La Figura 6.15 muestra una secuencia de la propagación de los frentes de onda generados por el software AURASONIC desde la fuente con intervalos de 5ms hasta un tiempo de simulación de 50ms.

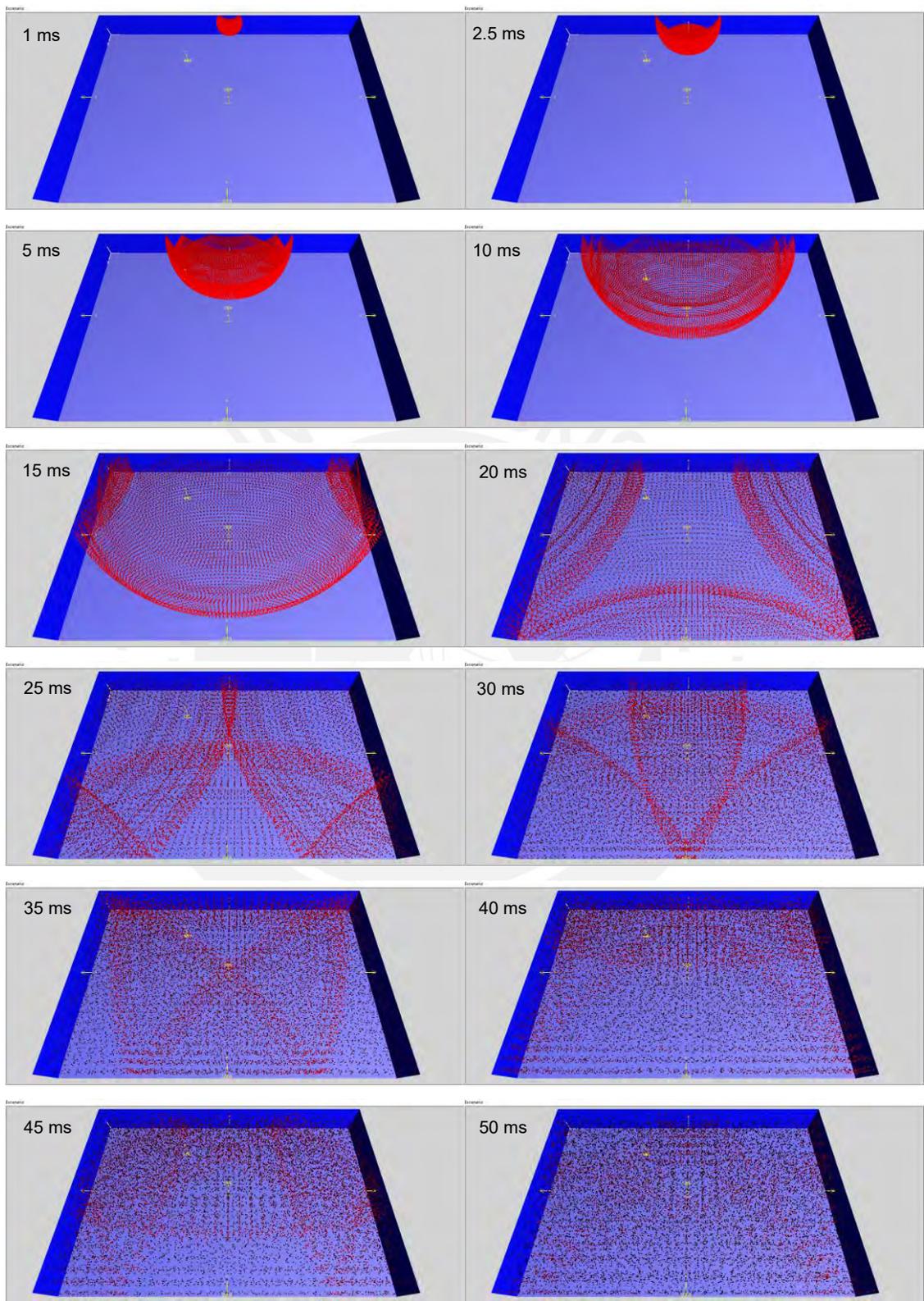


Figura 6.15. Simulación del frente de onda generado por la fuente de sonido.

6.4. Análisis de los Resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos en el proceso de simulación y síntesis del campo sonoro (del volumen subacuático seleccionado) pueden ser descritas las siguientes características:

- Existen diferencias significativas en los resultados correspondientes a cada punto de medición, evidenciadas en: variaciones de la respuesta en frecuencia (magnitud y fase), diferencias en la amplitud de las respuestas impulsivas, curvas de decaimiento energético, y distribución temporal de las reflexiones. Este resultado sustenta la necesidad de seleccionar diferentes locaciones de medición y de ese modo caracterizar de forma adecuada el campo sonoro en el interior de la piscina. Criterio que se utilizó en la acústica de recintos.
- Se hace evidente la presencia de flutter echo (eco flotante), el cual puede ser identificado de forma clara en la distribución temporal de las reflexiones y respuesta impulsiva. Sin embargo, este efecto es imperceptible de forma audible debido a que la mayor cantidad de energía está contenida dentro de los primeros 80ms. Esto se debe a que las reflexiones viajan más rápido en el interior de la piscina en comparación con el aire; a su vez, la energía va siendo transmitida a las paredes de la piscina (para ciertos ángulos de incidencia) y su valor energético va decayendo por la absorción, difusión y distancia recorrida.
- Otro efecto que se presenta en el campo sonoro es producido por la directividad de la fuente de sonido. Este se manifiesta con un mayor nivel de presión sonora para puntos de medición cercanos al centro del eje "y" de la zona de ejecución de nado sincronizado, el cual coincide con el eje acústico de la fuente.
- Las reflexiones difusas generadas por las "olas" en la superficie de la interfase agua-aire producen un espectro dominado por frecuencias altas audibles, en su mayoría superiores a 2KHz para los puntos de medición seleccionados.

- Las gráficas de respuesta al impulso integrado muestran el decaimiento energético por bandas de frecuencia (bandas de octava) donde las frecuencias más altas poseen un menor tiempo de reverberación.
- De acuerdo con los valores obtenidos y mostrados en la tabla de parámetros de la inteligibilidad de la palabra se puede concluir que: el espacio acústico es adecuado para la reproducción de audio hablado y música, lo que se respalda con valores de “definición” D50 medidos mayores a 96%, “claridad” del audio C50 mayores a 13dB, C80 mayores a 18dB y “tiempo central” no mayor de 14ms.
- El análisis STI de la respuesta impulsiva utilizando el software Dirac, también arroja un resultado favorable a la inteligibilidad de la palabra con valores mayores a 0.8, dándole la categoría de “excelente”, del mismo modo para valores RASTI de 0.75.
- La simulación del frente de onda permite visualizar de forma dinámica la propagación de una ráfaga de sonido en el volumen subacuático desde la fuente de sonido, permitiendo visualizar las reflexiones de origen especular.
- La respuesta impulsiva sintetizada de cada punto puede luego ser utilizada para el proceso de auralización. Pudiéndose comprobar a través de un audio de prueba (donde se reproduce música y voz) que la percepción del sonido resultante es coherente con los valores obtenidos de los parámetros de la inteligibilidad de la palabra.
- Los resultados obtenidos son válidos para frecuencias superiores a la frecuencia de Schroeder de 273.7Hz.

CAPÍTULO 7

DESARROLLO DEL MODELO DE NEGOCIO

7.1. Introducción

Con el objetivo de introducir al mercado el producto de software, denominado “AURASONIC”, se desarrolla un estudio de mercado con un análisis competitivo y de segmentación, se hace un análisis financiero del modelo de negocio, así como, una descripción el proceso de comercialización del producto.

7.2. Estudio de Mercado

En la industria de la acústica arquitectónica es indispensable el uso de herramientas de simulación, que permita a los diseñadores y expertos en el acondicionamiento acústico predecir el comportamiento de los campos sonoros; de modo que se pueda satisfacer los requerimientos de diseño, y a la vez ir reduciendo costos y tiempo de implementación de las soluciones. En ese sentido, la herramienta de software desarrollada puede ser utilizada extensamente en la predicción y caracterización de los campos sonoros en un entorno subacuático, como es: el interior de una piscina de nado sincronizado.

Hoy en día se ha extendido el uso recreativo del sonido subacuático para piscinas en residencias, haciendo que se incremente en el mercado la necesidad del uso de este tipo de herramientas de diseño y análisis. Por otro lado, la herramienta puede escalar su uso más allá de un entorno subacuático, por ejemplo: en la acústica arquitectónica; haciendo posible su expansión respecto de otros softwares ya disponibles en el mercado.

7.2.1. Análisis Competitivo

El software “AURASONIC” es analizado utilizando las cinco fuerzas de Porter [47] (como se muestra en la Figura 7.1), el cual permite definir la competitividad del producto en el mercado.

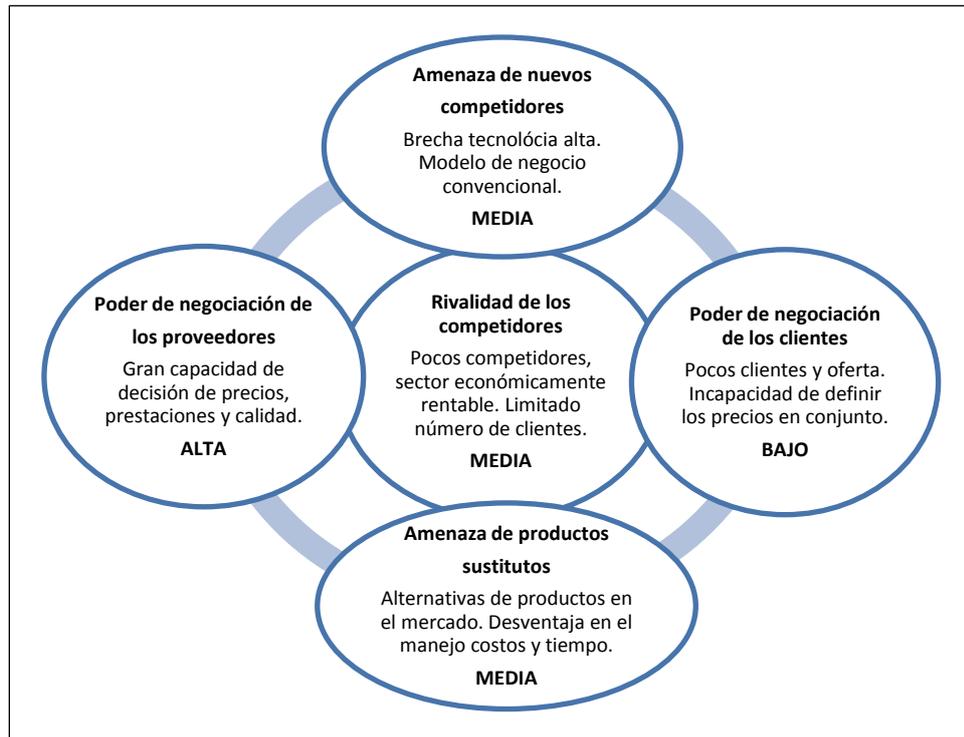


Figura 7.1. Análisis competitivo del software “AURASONIC” en el mercado, utilizando las cinco fuerzas de Porter [47].

Negociación de los Compradores o Clientes

Los clientes son pocos comparados con compradores de software especializados en ingeniería y/o diseño como podría ser, por ejemplo: AutoCAD [48] (Software de diseño arquitectónico), que cuenta con millones de usuarios. Sin embargo, capacidad de los clientes de organizarse para definir los precios de este tipo de producto de software (ejemplo: software de acústica arquitectónica) es escasa. Tampoco existen muchos productos de software de estas características que aumenten su capacidad de negociación minimizando

la posibilidad de cambio de producto en busca de software de mayores prestaciones o calidad. Lo que define al poder de negociación de los compradores como “bajo”.

Poder de Negociación de los Proveedores o Vendedores

Debido a la cantidad de proveedores en la industria se puede decir que su poder de decisión en el precio del producto de software es “alta”. Lo que define una valla en términos de calidad, prestaciones y precio del software en el mercado.

Amenaza de Nuevos Competidores Entrantes

La dificultad para los nuevos competidores que se destaca está relacionada con el nivel de desarrollo de la herramienta de software, al tratarse de una aplicación muy especializada en el campo de la ingeniería y análisis, produciéndose una brecha tecnológica y de conocimiento diferenciada. Sin embargo, la implementación del modelo de negociación puede resultar de una forma muy convencional, como, por ejemplo: la venta de licencias de software. Esto posiciona a la amenaza de nuevos competidores entrantes como “media”.

Amenaza de Productos sustitutos

Dentro de los productos sustitutos que se pueden mencionar están:

- Mediciones directas en las instalaciones (recintos) con equipos de instrumentación.
- Uso de software para el cálculo de parámetros utilizando respuestas impulsivas (Ejemplo: Dirac [45]).
- Uso de maquetas a escala de los recintos e instrumentación.
- Etc.

Estos productos o métodos sustitutos pueden competir con el software de simulación de predicción acústica. Sin embargo, el software de simulación

ofrece un mejor manejo de costos y tiempo de generación de información para análisis, lo que califica a la amenaza de productos sustitutos como “media”.

Rivalidad de competidores

Cada marca trata de establecer un valor diferenciado ya sea con los años de prestigio en el mercado o con nuevas prestaciones en sus aplicaciones. Esto se evidencia con la aparición anual de versiones de software de las marcas más reconocidas en la predicción acústica de recintos como son: EASE [50], ODEON [3], CATT Acoustic [4], Bose Modeler [49], etc. Sin embargo, existen menos competidores respecto a otras industrias de software, lo que supondría que el sector sea económicamente rentable, aunque limitada al número de clientes, estableciendo la rivalidad de competidores como “media”.

7.2.2. Segmentación

El segmento está dirigido a empresas, instituciones y profesionales especializados, establecidos como:

- B2C (Business to Consumer). Profesionales especializados en acústica, que prestan servicios o desarrollan investigación.
- B2B (Business to Business). Hacia empresas o instituciones, que realizan consultorías o investigaciones relacionadas a la acústica.

7.3. Análisis Financiero

El precio en el mercado de este tipo de software supera los \$5,000.00 (dólares americanos) por licencia, con soporte y garantía de un año. Con el objetivo de hacer competitivo al producto de software se establece un valor de comercialización de \$3,600.00 por licencia, que incluye soporte y garantía por un año.

Las tablas: Tabla 7.1 y Tabla 7.2, muestran los resúmenes financieros para la implementación y comercialización del software de simulación, con una inversión de \$14,250.00 (con y sin préstamo), horizonte de análisis de 5 años, volumen inicial de ventas de 16 licencias de software y un crecimiento del 10% en ventas por año.

Sin financiamiento							
Flujo de caja en años	0	1	2	3	4	5	
Ingresos:							
Ventas		\$57,600.00	\$64,800.00	\$72,000.00	\$79,200.00	\$86,400.00	
Egresos:							
Costo de ventas		\$3,991.68	\$4,490.64	\$4,989.60	\$5,488.56	\$5,987.52	
Gasto adm. y ventas		\$50,292.80	\$50,292.80	\$50,292.80	\$50,292.80	\$50,292.80	
Ajustes:							
(+) Depreciación		\$1,075.00	\$1,075.00	\$1,075.00	\$1,075.00	\$1,075.00	
(-) Impuestos		\$672.16	\$2,682.47	\$4,692.78	\$6,703.09	\$8,713.40	
Inversión:	-\$14,250.00					-\$4,300.00	
Flujo de caja económico	-\$14,250.00	\$3,718.36	\$8,409.09	\$13,099.82	\$13,490.55	\$22,481.28	
VAN:		\$29,095.41			TIR:		55%

Tabla 7.1. Flujo de caja sin financiamiento.

Con financiamiento							
Flujo de caja en años	0	1	2	3	4	5	
Ingresos:							
Ventas		\$57,600.00	\$64,800.00	\$72,000.00	\$79,200.00	\$86,400.00	
Egresos:							
Costo de ventas		\$3,991.68	\$3,991.68	\$3,991.68	\$3,991.68	\$3,991.68	
Gasto adm. y ventas		\$50,292.80	\$50,292.80	\$50,292.80	\$50,292.80	\$50,292.80	
Ajustes:							
(+) Depreciación		\$1,075.00	\$1,075.00	\$1,075.00	\$1,075.00	\$1,075.00	
(-) Impuestos		\$372.91	\$2,432.23	\$4,496.46	\$6,566.09	\$8,641.64	
Financiamiento:							
(-) Amortización		\$1,633.88	\$1,797.27	\$1,976.99	\$2,174.69	\$2,392.16	
(-) Gastos financieros		\$997.50	\$834.11	\$654.39	\$456.69	\$239.22	
(+) Préstamo	\$9,975.00						
Inversión:	-\$14,250.00					-\$4,300.00	
Flujo de caja financiero	-\$4,275.00	\$1,386.23	\$6,526.91	\$11,662.68	\$12,493.05	\$21,917.50	
VAN:		\$33,283.66			TIR:		115%

Tabla 7.2. Flujo de caja con financiamiento.

El flujo de caja muestra un valor VAN de \$29,095.41 y TIR del 55% sin financiamiento utilizando capital propio; mientras que con préstamo se obtiene valores VAN igual a \$33,283.66 y TIR 155%, haciendo que el proyecto de inversión sea rentable y viable en ambos casos. La Figura 7.2 muestra la gráfica de utilidad neta y flujo de caja proyectado para un horizonte de 5 años.

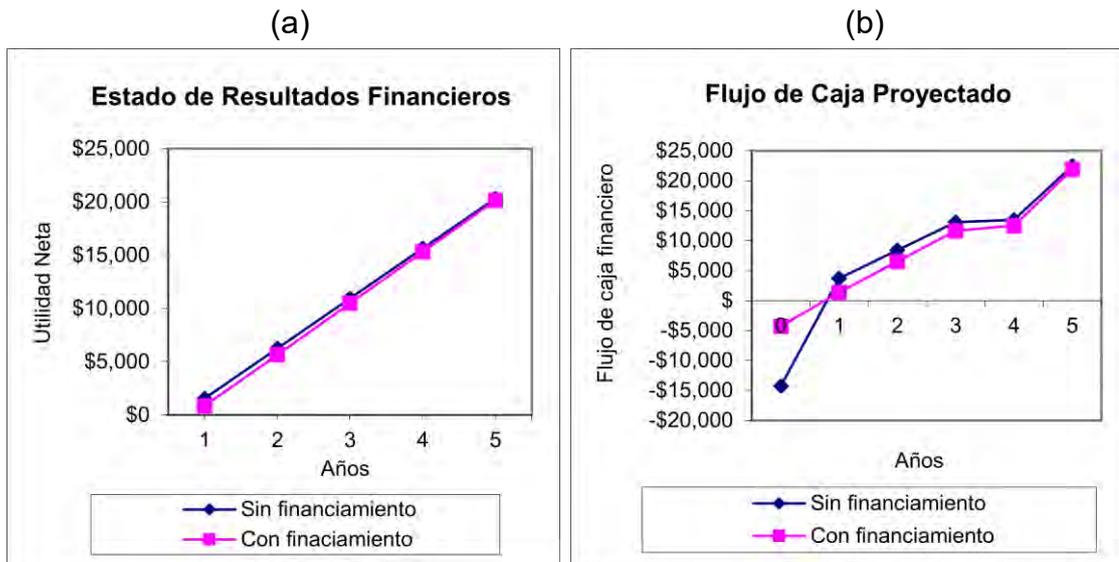


Figura 7.2. a) Utilidad neta de comercialización del software de simulación, b) flujo de caja proyectado.

7.4. Comercialización

El software AURASONIC puede ser comercializado con una licencia perpetua con un costo inicial de \$3,600.00 (dólares americanos) considerando las características actuales desarrolladas del software. La aplicación con el tiempo irá adicionando más funcionalidades y módulos en versiones subsecuentes, que le permitan entre otras cosas una mejor compatibilidad con softwares externos, como por ejemplo AutoCAD [48]. En tal sentido, se consideran servicios de postventa a través de la renovación de las versiones anuales del software, con un costo del 20% del valor de la licencia inicial. La venta del software puede realizarse de forma directa a través de una plataforma web, de modo que pueda ser promocionado y distribuido internacionalmente.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

De acuerdo con las hipótesis planteadas se tienen las siguientes conclusiones:

- Se ha logrado modelar y simular el campo sonoro dentro de una de piscina de nado sincronizado, utilizando las técnicas propuestas (trazado de rayos acústicos, fuentes imágenes y radiosidad) y el software de simulación desarrollado. Este proceso ha permitido que se obtenga información relevante del comportamiento del campo sonoro, estimar parámetros relacionados a la inteligibilidad de la palabra, visualizar gráficamente las características de las reflexiones, respuesta en frecuencia, decaimiento energético, así como la respuesta impulsiva.
- Los modelos matemáticos utilizados en la acústica arquitectónica han podido ser escalados a la acústica subacuática, facilitando las analogías con el tiempo de reverberación, frecuencia de Schroeder, inteligibilidad de la palabra, ente otros parámetros.
- Las reflexiones difusas en la superficie de la interfase agua-aire han tenido un papel importante en la predicción del campo sonoro, su influencia en altas frecuencias ha sido notorio en el proceso de síntesis. Lo que demuestra la importancia de ser consideradas y su efecto producto de las olas en la superficie.
- Las reflexiones en las paredes al interior de la piscina muestran una clara absorción para ángulos de incidencia menores a 38° y se tornan completamente reflectivas a ángulos superiores a este, produciendo un efecto muy notorio en la cola de reverberación. Demostrando que: la relación de impedancias acústicas (del agua y las paredes) tiene un efecto directo en la absorción de la interfase.

De acuerdo con los objetivos en el desarrollo de la tesis se puede concluir lo siguiente:

- Se ha desarrollado un software de simulación donde se ha modelado adecuadamente cada uno de los elementos (fuentes, receptores, reflectores, etc.) que componen espacio acústico, así como efectos de absorción, reflexión y difusión del sonido en el medio de propagación. Permitiendo hacer la predicción de los campos sonoros en base a modelos matemáticos y algoritmos de simulación.
- Los elementos que conforman los límites del interior de la piscina de competencia como son las superficies agua-aire y las paredes del vaso han sido caracterizados y utilizados en el proceso de simulación.
- Se ha podido generar la respuesta impulsiva sintetizada y realizar el proceso de auralización con el software desarrollado para cada punto de interés en el interior de la piscina de nado sincronizado, así como visualizar la propagación del frente de onda en una simulación 3D. Esto ha permitido tener una mejor comprensión del comportamiento de los campos sonoros dentro del volumen subacuático, a través de un análisis audible y visible, proporcionando información complementaria para caracterizar el espacio acústico.
- Ha sido posible hacer la caracterización del espacio acústico (recinto subacuático) utilizando parámetros de la acústica arquitectónica e inteligibilidad de la palabra.

Otros resultados de la investigación permiten hacer las siguientes conclusiones:

- Los métodos de trazado de rayos acústicos, fuentes imágenes y radiosidad han sido determinantes en el proceso de síntesis y predicción del campo sonoro en el volumen subacuático.
- De los resultados obtenidos al caracterizar la acústica al interior de la piscina de nado sincronizado seleccionada, se concluye que: la inteligibilidad de la palabra tanto para voz y música tienen valores

adecuados, sin presencia de eco, dando una sensación de un espacio acústico seco (con baja reverberación).

- Cabe resaltar que los resultados obtenidos en el proceso de caracterización del campo sonoro, del recinto subacuático seleccionado, son válidos para frecuencias superiores a la frecuencia de Schroeder (superiores a 273.7Hz). Esto definido por los límites de aplicación del trazado de rayos acústicos utilizado. Sin embargo, es suficiente para determinar la inteligibilidad de la palabra.
- Los resultados del estudio financiero para el modelo de negocio de comercialización del software de simulación "AURASONIC", demuestran viabilidad y rentabilidad, validando la factibilidad de puesta en marcha del negocio.



RECOMENDACIONES

Se tienen las siguientes recomendaciones:

- Las reflexiones en las paredes al interior de la piscina de nado sincronizado han sido modelados de forma práctica, utilizando un modelo sólido elástico y homogéneo. Sin embargo, puede desarrollarse un modelo más complejo tomando en cuenta la porosidad y viscosidad del material, así como los efectos del revestimiento en la superficie de la pared; con los cuales se recomienda utilizar la teoría de Biot y la matriz de transferencia, permitiendo trabajar la reflexión usando capas de interfaces.
- Se recomienda adicionar modelos de difracción aproximados producto de obstáculos (como podrían ser nadadores en el interior de la piscina), con el propósito de ir mejorando los resultados de simulación, emulando un entorno acústico más realista. Así mismo considerar el modelamiento de ruido de fondo, a fin de aplicar de forma más adecuada criterios de inteligibilidad de la palabra como el STI.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] VORLÄNDER, Michael
2008 *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modeling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality*. Berlin: Springer.
- [2] KUTTRUFF, Heinrich
2009 *Room Acoustics*. Fifth Edition. Abingdon: Spon Press.
- [3] ODEON
2020 *ODEON Room Acoustics Software, User's Manual Version 15*. Lyngby. Consulta: 08 de noviembre de 2020.
<https://odeon.dk/>
- [4] CATT-Acoustic
2007 *CATT-Acoustic v9.1: Room Acoustics Prediction and Walkthrough Auralization, User's Manual*. Gothenburg. Consulta: 10 de noviembre de 2020.
www.catt.se
- [5] COX, Trevor J. y Peter D'ANTONIO.
2004 *Acoustic Absorbers and Diffusers, Theory, Design and Application*. Second Edition. New York: Spon Press.
- [6] HOVEM, Jens M.
2013 *"Ray Trace Modeling of Underwater Sound Propagation"*. Modeling and Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices. Milan: IntechOpen, pp. 573-598.

- [7] KINSLER, Lawrence E. y otros
2000 *Fundamentals of Acoustics*. Fourth Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [8] B.A. Auld
1973 *Acoustic Fields and Waves in Solids*. Volumen I. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [9] B.A. Auld
1973 *Acoustic Fields and Waves in Solids*. Volumen II. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- [10] ROSE, Joseph L.
2014 *Ultrasonic Guided Waves in Solid Media*. New York: Cambridge University Press.
- [11] MATTA, Sandrine
2018 *Acoustic Wave Propagation in a Multilayer Composed of Fluid, Solid, and Porous Viscoelastic Layers*. Doctoral thesis.
Valenciennes: Polytechnic University Hauts-De-France, Sciences for Engineering.
- [12] WIKIPEDIA
2021 *Auralization*. Consulta: 09 de noviembre de 2021
<https://en.wikipedia.org/wiki/Auralization>
- [13] VIGRAM, Tor Erik
2008 *Building Acoustics*. New York: Taylor & Francis Group.

- [14] PIALUCHA, Tomasz Piotr
1992 *The Reflection Coefficient from Interface Layers in NDT of Adhesive Joints*. Doctoral thesis of Philosophy. London: University of London, Department of Mechanical Engineering.
- [15] BERANEK, Leo L.
1996 *Acoustics*. Fourth Edition. New York: American Institute of Physics, Inc.
- [16] BERANEK, Leo L. y Tim J. MELLOW
2019 *Acoustics: Sound Fields, Transducers and Vibration*. Second Edition. Oxford: Elsevier Inc.
- [17] HOPKINS, Carl.
2007 *Sound Insulation*. New York: Elsevier Ltd.
- [18] MAEKAWA, Z., J. H. RINDEL y P. LORD.
2011 *Environmental and Architectural Acoustics*. Second Edition. New York: Spon Press.
- [19] ZHANG, Guangli, Chongtao HAO y Chen YAO
2018 "Analytical study of the reflection and transmission coefficient of the submarine interface". *Acta Geophysica*. Springer.
<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11600-018-0153-y>
- [20] SHEN, Yang y Sohichi Hirose
2016 "Detection and Thickness Estimation of Water Layer in Layered Medium Based on Multi-Reflection of Oblique Incident Ultrasonic Wave". *Materials Transactions*, Vol. 57, Nro. 6. Department of Mechanical and Environmental Informatics. Toyo Institute of Technology. Tokyo. Febrero 2016.

- [21] PROAKIS, John G. y Dimitris G. MANOLAKIS
2007 *Tratamiento digital de señales*. Cuarta Edición. Madrid: Pearson Educación S.A.
- [22] HAVELOCK, Havelock, Sonoko KUWANO y Michael VORLÄNDER
2007 *Handbook of Signal Processing in Acoustics*. Dos volúmenes. New York: Springer.
- [23] TRINH, Vinh, Li CHEN y James FORREST
2018 "*FreeField Acoustic Source Levels From Measurements Conducted in Water Tank*". Ponencia presentada en Hear To Listen (Annual Conference 2018). Australian Acoustical Society (AAS). Adelaide, noviembre 2018.
- [24] HALL, Malin
2016 *Acoustic Design of Swimming Halls*. Master's Dissertation of Engineering Acoustics. Lund: Lund University, Faculty of Engineering.
- [25] DESERNO, Markus
2004 *How to generate equidistributed points on the surface of a sphere*. Max-Planck-Institut. Mainz, Germany.
- [26] GULTEKIN, BAYER OZTURK y KURAMA
2016 "*The Effect of Porosity and Glassy Phase Amount of Porcelain Tiles on Ultrasonic Velocity*". Journal of The Australian Ceramic Society Volume 51. Australian Ceramic Society. Swinburne University.
<https://www.austceram.com/>

- [27] FEDERACION INTERNACIONAL DE NATACION (FINA)
2021 *FINA Facilities Rules*. London: Fédération Internationale de Natation.
<https://www.fina.org/>
- [28] FEDERACION INTERNACIONAL DE NATACION (FINA)
2021 *FINA Artistic Swimming Rules*. London: Fédération Internationale de Natation.
<https://www.fina.org/>
- [29] FEDERACIÓN DEPORTIVA PERUANA DE NATACIÓN (FDPN)
2021 *Guía de diseño de Instalaciones Deportivas*. Lima: Federación Deportiva Peruana de Natación.
<https://www.fdpn.org/>
- [30] REAL FEDERACIÓN ESPAÑOLA DE NATACIÓN (RFEN)
2019 *Libro XII: de las instalaciones*. Madrid: Real Federación Española de Natación.
<https://www.rfen.es/>
- [31] MARCA
s/f *Enciclopedia Visual JJOO Rio 2016: "Natación Sincronizada"*.
Consulta: 06 de junio de 2021
<https://www.marca.com/>
- [32] CYMPER
s/f *Claves para la colocación de cerámica en piscinas*. Consulta: 02 de julio de 2021
<https://www.cymper.com/>

- [33] LUBELL LAB'S
s/f Lubell Labs LL916H & LL916C Pistonic Piezoelectric Underwater
Peakers. Consulta: 02 de agosto de 2021.
<http://www.lubell.com/LL916.html>
- [34] CLARKSYNTHESIS
s/f AQ339 Diluvio TM Underwater Loudspeaker. Consulta: 02 de
agosto de 2021.
<https://www.clarksynthesis.com/aq339/>
- [35] OCEANEARS
s/f Synchronized Swimming. Consulta: 02 de agosto de 2021.
<https://www.oceanears.com/oceanears-system-uses/synchronized-swimming/>
- [36] KHZ TECHNOLOGY
s/f UWS-045 Underwater Speaker. Consulta: 02 de agosto de 2021.
<http://www.khz-et.com/En/ProductView.asp?ID=225>
- [37] INSIDER
2019 25 Stunning photos of synchronized swimmers taken at the
perfect time. Consulta: 07 de agosto de 2021.
<https://www.insider.com/photos-synchronized-swimmers-perfect-timing-2019-7>
- [38] NATIONAL INSTRUMENTS
s/f Programación Orientada a Objetos con LabVIEW. Consulta: 03
de agosto de 2021.
<https://www.ni.com/>

- [39] NATIONAL INSTRUMENTS
2010 *Object-Oriented Desing and Programming in LabVIEW™* Course Manual. Austin. Consulta: 04 de junio de 2021.
- [40] NATIONAL INSTRUMENTS
2009 *Managing Software Engineering in LabVIEW™* Course Manual. Austin. Consulta: 10 de junio de 2021.
- [41] NATIONAL INSTRUMENTS
2012 *Advanced Architectures in LabVIEW™* Course Manual. Austin. Consulta: 05 de junio de 2021.
- [42] BRESS, Thomas J.
2013 *Effective LabVIEW Programming*. Austin: National Technology and Science Press.
- [43] NATIONAL INSTRUMENTS
2021 *LabVIEW* [programa informático de desarrollo de software]. Versión: 2021.
- [44] NATIONAL INSTRUMENTS
2020 *DIAdem* [programa informático de inspección, análisis y reportes]. Versión: 2020.
- [45] BRÜEL & KJÆR
s/f *Dirac* [programa informático para medir parámetros acústicos de salas]. Versión: 3.0.

- [46] SIKAND, Smile
s/f Voxel to Mesh Conversion: Marching Cube Algorithm. Consulta:
03 de agosto de 2021.
<https://medium.com/zeg-ai/voxel-to-mesh-conversion-marching-cube-algorithm-43dbb0801359>
- [47] PORTER, Michael E.
1979 "The Structure within Industries and Companies' Performance".
The Review of Economics and Statistics. 1979, vol. 61, no. 2. pp.
214-27.
<https://doi.org/10.2307/1924589>.
- [48] AUTODESK
2022 *AutoCAD* [programa informático de CAD 2D y 3D]. Versión:
2022.
- [49] BOSE
2022 *MODELER* [programa informático para el modelamiento de
sistemas de sonido]. Versión: 6.11.8.
- [50] AFMG
2022 *EASE* [programa informático para la simulación acústica].
Versión: 4.4.

ANEXO I: LISTA DE ABREVIATURAS

AVI	Audio Video Interleaved
B2B	Business-To-Business
B2C	Business-To-Consumer
BEM	Boundary Element Method
EDT	Early Decay Time
FDPN	Federación Deportiva Peruana de Natación
FEM	Finite Element Method
FFT	Fast Fourier Transform
FGV	Functional Global Variable
FINA	Fédération Internationale de Natation
FIR	Finite Impulse Response
HRTF	Head-Related Transfer Function
IDFT	Inverse Discrete Fourier Transform
IFFT	Inverse Fast Fourier Transform
MTF	Modulation Transfer Function
RAM	Random Access Memory
RASTI	Rapid Speech Transmission Index
RFEN	Real Federación Española de Natación
RMS	Root-Mean-Square
STI	Speech Transmission Index
TIR	Tasa Interna de Retorno
UWS	Underwater Speaker
VAN	Valor Actual Neto
VI	Virtual Instrument
WAV	Waveform Audio File Format

ANEXO II: GLOSARIO

Acústica arquitectónica	: Rama de la acústica aplicada a la arquitectura.
Acústica geométrica	: Rama de la acústica que estudia la propagación del sonido a partir del concepto de rayos acústicos.
Anisotrópico	: Descripción de materiales cuyas propiedades son distintas en diferentes direcciones.
Auralización	: Proceso de simular la sensación de escuchar un sonido tridimensional en el interior de una sala.
Cámara seca	: Sala diseñada para absorber todas las reflexiones producidas por ondas acústicas.
Campo sonoro	: Es un campo físico que representa la distribución escalar del nivel de presión sonora en cada punto del espacio tridimensional.
Clase	: Plantilla para la creación de objetos de datos en programación informática.
Coefficiente de reflexión	: Describe la amplitud o intensidad de una onda acústica reflejada respecto la onda incidente.
Convolución	: Operación matemática para obtener una señal de salida continua en función de la respuesta impulsiva de un sistema lineal y una señal de entrada.
Difracción	: Dispersión del sonido como consecuencia de obstáculos en la propagación.
Dispersión	: Redistribución del sonido en diferentes direcciones.
Dispersión estocástica	: Redistribución del sonido en diferentes direcciones de forma aleatoria.
Ecuación eikonal	: Ecuación de derivadas parciales con no linealidad encontrada en la propagación de ondas.
Fluido	: Medio fluido que sigue tres leyes fundamentales de la acústica, ecuación de Euler, conservación de masa y ecuación de estado (termodinámica).

Flutter echo	: Eco sonoro causado por los ecos que rebotan repetitivamente entre dos superficies paralelas.
Frecuencia de Schroeder	: Frecuencia que delimita las zonas de comportamiento de una sala, zona modal (bajas frecuencia) y la zona de rayos acústicos (frecuencias altas).
Fuentes imágenes	: Fuentes de sonido que reemplazan a los rayos acústicos reales producto de las reflexiones.
Función de Green	: Función como solución de la ecuación de Helmholtz.
Homogéneo	: Formado por elementos semejantes y uniformes.
Impedancia acústica	: Es la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre este.
Impedancia característica	: Impedancia acústica del medio de propagación que no depende de la frecuencia.
Inteligibilidad de la palabra	: Medición de la efectividad para comprender la voz hablada.
Interfase	: Límite que separa dos medios físicos adyacentes o contiguos con diferentes impedancias acústicas (fluido-fluido, fluido-sólido, etc.).
Isotrópico	: Material cuyas propiedades mecánicas y térmicas son las mismas en todas las direcciones.
Lecho marino	: Fondo del océano.
Biblioteca de objetos	: Conjunto de objetos de clases (implementación de un tipo de dato) registrados en archivos de programas informáticos no volátiles, codificados en un lenguaje de programación, con atributos y funcionalidades bien definidos.
Modos locales	: Ondas acústicas estacionarias generadas en el interior de un determinado espacio.
Nado sincronizado	: Disciplina deportiva de armado de formas artísticas y sincronizadas en un medio subacuático.
Objeto	: Definición informática para la instancia de una clase que encapsula estado y comportamiento. Un objeto puede caracterizar una entidad física o abstracta.

Onda de compresión	: Onda de sonido articulada por fuerzas de compresión.
Onda de corte	: Onda de sonido articula por fuerzas de corte.
Parentesco	: Relación de clases de objetos de datos en programación informática.
Piscina de competición	: Piscina donde se realizan actividades deportivas como el nado sincronizado.
Radiosidad	: Método para modelar la difusión de las reflexiones acústicas.
Rayos acústicos	: Forma concisa de indicar las trayectorias de viaje tomada por los frentes de ondas acústicas a medida que se propagan a través del espacio.
Rayos cónicos	: Forma de rayos de sonido que produce un punto radiante en una superficie data.
Recinto	: Espacio, generalmente cerrado, comprendido dentro de ciertos límites (muros, vallas, etc.) que se utiliza con un fin determinado.
Reflexión difusa	: Reflexión de rayos de sonido en diferentes direcciones al mismo tiempo. Generando rayos difusos
Reflexión especular	: Reflexión de rayos de sonido en una dirección determinada.
Refracción	: Es la desviación que sufren las ondas acústicas en dirección de su propagación.
Respuesta impulsiva	: Es la respuesta a la salida de un sistema cuando a la entrada se introduce un impulso.
Reverberación	: Fenómeno sonoro producido por las reflexiones en un recinto.
Síntesis	: Consiste en obtener señales de forma artificial (analógica y/o digital).
Subacuático, ca	: Que existe, se usa o se realiza debajo del agua.
Trazado de rayo	: Método para determinar la propagación de los rayos acústicos en un medio.
Vaso	: Es la estructura de la piscina que contiene el agua.

ANEXO III: INTENSIDAD, ENERGÍA Y POTENCIA

Intensidad del Sonido

Es la energía pasando a través de un área normal a la propagación del sonido en un segundo [18], esto es considerado como potencia por unidad de área. La intensidad de sonido medido en un punto y dirección específica puede representarse como se muestra la ecuación (8.1), y está en unidades de W/m^2 .

$$I = pv = \frac{p^2}{\rho c} \quad (8.1)$$

La intensidad es proporcional a la presión al cuadrado y a la velocidad de partícula al cuadrado, siendo p valor eficaz de la presión para una determinada intensidad, ρ la densidad y c la velocidad del sonido en el medio de propagación. Para el caso de una fuente puntual en el espacio libre encerrada por una esfera imaginaria de radio r la intensidad de sonido puede ser representada por:

$$I_0 = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (8.2)$$

Donde W es la potencia de la fuente en estado estable y $4\pi r^2$ es el área de la esfera. Del mismo modo si la fuente tiene un factor de directividad D se tendría la siguiente ecuación:

$$I = \frac{DW}{4\pi r^2} = DI_0 \quad (8.3)$$

Densidad de Energía del Sonido

La intensidad I de una onda plana es igual a la energía viajando una distancia a través de una unidad de área por un segundo [18]. La densidad de energía es la energía contenida en una unidad de volumen y será como se muestra en la ecuación (8.4), para ondas de sonido planas en espacios libres y ondas esféricas para valores de $kr \gg 1$ (k es el número de onda y r el radio de la esfera), con unidades de $W.S/m^3$ o J/m^3 .

$$E = \frac{I}{c} = \frac{p^2}{\rho c^2} = \rho c u^2 \quad (8.4)$$

La densidad de energía para una fuente de sonido omnidireccional puede ser expresado como se muestra en la ecuación (8.5) (para la condición de estado estable), y como se muestra en la ecuación (8.6) para una fuente de sonido direccional.

$$E_0 = \frac{W}{4\pi r^2 c} \quad (8.5)$$

$$E = \frac{DW}{4\pi r^2 c} = DE_0 \quad (8.6)$$

Donde W es la potencia acústica de la fuente, r la distancia de un punto de recepción del sonido a la fuente y D el factor de directividad en el punto de recepción. Estas ecuaciones representan la densidad de energía para una onda de sonido progresiva libre.

Escala en Decibelios

La escala en decibelios expresa la relación entre dos cantidades en una escala logarítmica, como por ejemplo el nivel de potencia acústica que está referenciado a 10^{-12} watts como se muestra en la ecuación (8.7).

$$L_w = 10 \log_{10} \left(\frac{W}{10^{-12}} \right) \quad (8.7)$$

Donde L_w es el nivel de potencia acústica en dB , y W es la potencia acústica. Del mismo modo se puede relacionar la intensidad con un valor referencial de $10^{-12} W/m^2$ como se tiene en la siguiente ecuación:

$$\text{Nivel de intensidad del sonido} = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{10^{-12}} \right) \quad (8.8)$$

Para el caso de la presión sonora esta puede ser referenciado a un valor de $p_0=20 \mu Pa$ para el aire como medio de propagación y $p_0=1 \mu Pa$ para el agua, donde p_0 es la presión de referencia y p es la presión.

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (8.9)$$

En el cálculo de campo sonoro en una habitación o espacio acústico, la densidad de energía del sonido puede ser referenciado a un valor arbitrario E_0 [18] con fines de conveniencia para su cálculo y expresado en unidades de dB .

$$\text{Nivel de densidad de energía} = 10 \log_{10} \left(\frac{E}{E_0} \right) \quad (8.10)$$

Donde E es la densidad de energía y E_0 es la densidad de energía de referencia arbitraria [18].

ANEXO IV: BANDAS DE FRECUENCIA

Cálculo de Bandas de Frecuencia

El espectro de una señal acústica puede ser representada y/o procesada en bandas de frecuencia típicamente en bandas de un tercio de octava o bandas de octavas. Para el caso de bandas de un tercio de octava la frecuencia central será definida en una escala de frecuencia logarítmica [1] como se muestra en las ecuaciones (8.11) para un algoritmo en base 2:

$$\begin{aligned}f_f &= f_i \cdot 2^{1/3} \\ \Delta f &= f_f - f_i = f_i(2^{1/3} - 1) \\ f_m &= \sqrt{f_i \cdot f_f} \\ f_{m+1} &= f_m \cdot 2^{1/3}\end{aligned}\tag{ 8.11}$$

Donde f_f será la frecuencia final de la banda, f_i será la frecuencia inicial, f_m será la frecuencia central o de media banda y f_{m+1} la frecuencia subsiguiente. Para el caso de bandas de octavas se tendrá las siguientes ecuaciones (8.12):

$$\begin{aligned}f_f &= f_i \cdot 2 \\ \Delta f &= f_f - f_i = f_i \\ f_m &= \sqrt{f_i \cdot f_f} = \sqrt{2} \cdot f_i \\ f_{m+1} &= f_m \cdot 2\end{aligned}\tag{ 8.12}$$

Tabla 8.1 y Tabla 8.2 muestran los valores de frecuencia para las bandas de octavas y un tercio de octava.

f_m (HZ)	f_i (HZ)	f_f (HZ)	Δf (HZ)
32.25	22.1	44.19	22.09
62.5	44.19	88.39	44.2
125	88.39	176.8	88.41
250	176.8	353.6	176.8
500	353.6	707.1	353.5
1000	707.1	1414	706.9
2000	1414	2828	1414
4000	2828	5657	2829
8000	5657	11314	5657
16000	11314	22627	11313

Tabla 8.1. Ejemplo de bandas de frecuencia en octavas.

f_m (HZ)	f_i (HZ)	f_f (HZ)	Δf (HZ)
125	111.36	140.30	28.94
157.5	140.30	176.77	36.47
198.4	176.77	222.72	45.95
250	222.72	280.61	57.89
315	280.61	353.55	72.94
397	353.55	445.44	91.89
500	445.44	561.22	115.78
630	561.22	707.09	145.87
794	707.09	890.88	183.79
1000	890.88	1122.44	231.56
1260	1122.44	1414.18	291.75
1587	1414.18	1781.76	367.58
2000	1781.76	2244.88	463.12
2520	2244.88	2828.37	583.49
3175	2828.37	3563.52	735.15
4000	3563.52	4489.75	926.23
5040	4489.75	5656.74	1166.98
6350	5656.74	7127.04	1470.30
8000	7127.04	8979.51	1852.47

Tabla 8.2. Ejemplo de bandas de frecuencia en tercios de octava.

ANEXO V: GENERACIÓN DE CÓDIGO EN LABVIEW

Desarrollo de Código

El código del software “AURASONIC” ha sido desarrollado utilizando la herramienta de programación gráfica LabVIEW [43]. Con técnicas de programación orientada a objetos, definición de módulos, eventos, estructuras de procesamiento de datos y de control. A continuación, se muestran algunos ejemplos del código desarrollado.

Módulo Controlador

Procesa los eventos principales del sistema, controla la ejecución de módulos de forma general.

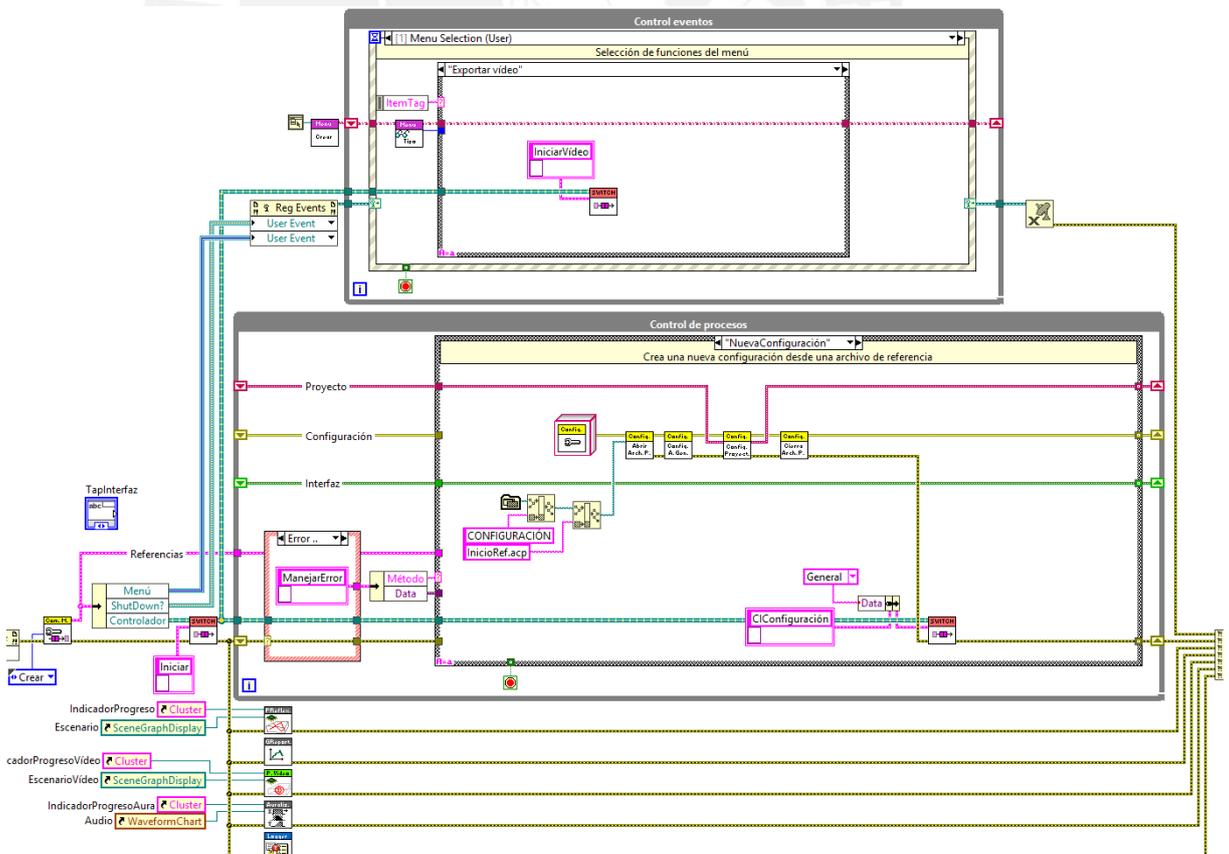


Figura 8.1. Desarrollo del módulo “Controlado.vi” con una estructura tipo productor-consumidor con eventos.

Módulo Procesador de Reflexiones

Procesa las reflexiones generadas en la secuencia de simulación.

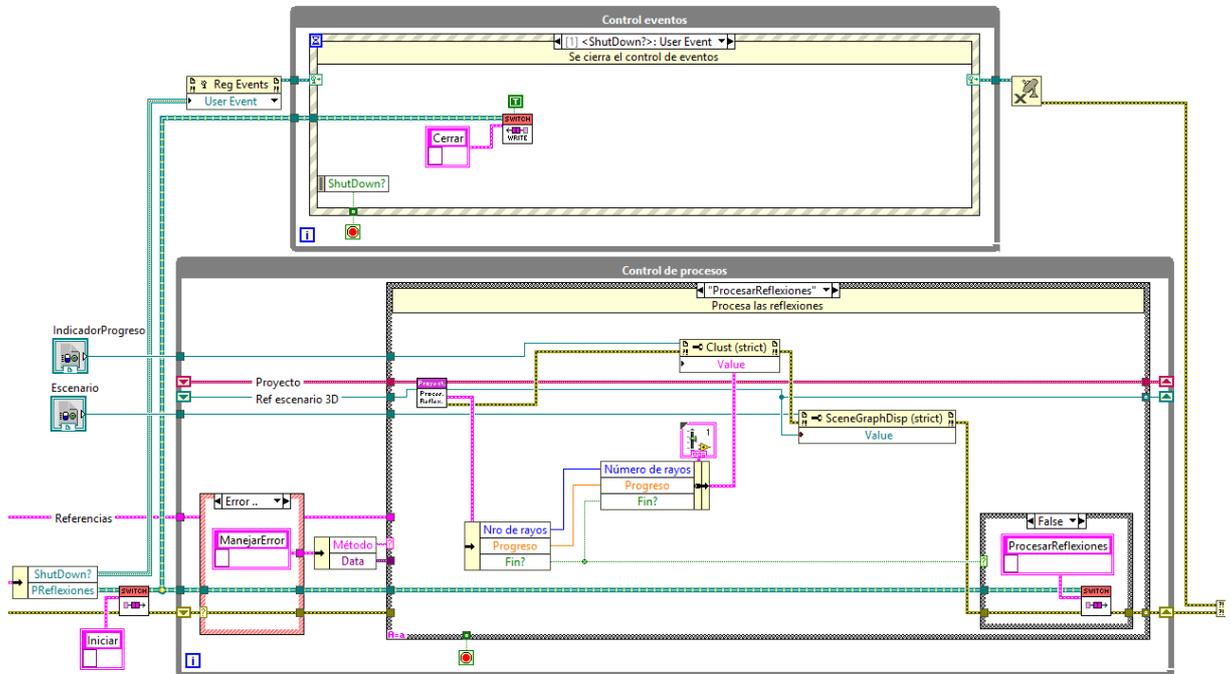


Figura 8.2. Desarrollo del módulo "Procesador Reflexiones.vi".

Detección de Impacto

El código verifica si un rayo ha impactado en alguna superficie.

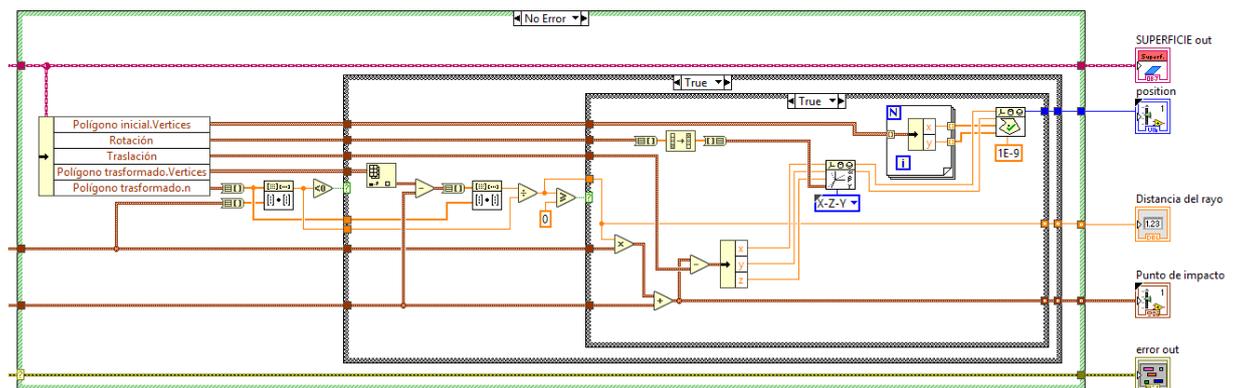


Figura 8.3. Desarrollo del método "Verificar impacto de rayo.vi" en la clase "Superficie".

Módulo Generador de Reportes

Genera el reporte de los datos acústicos del recinto calculado de las reflexiones.

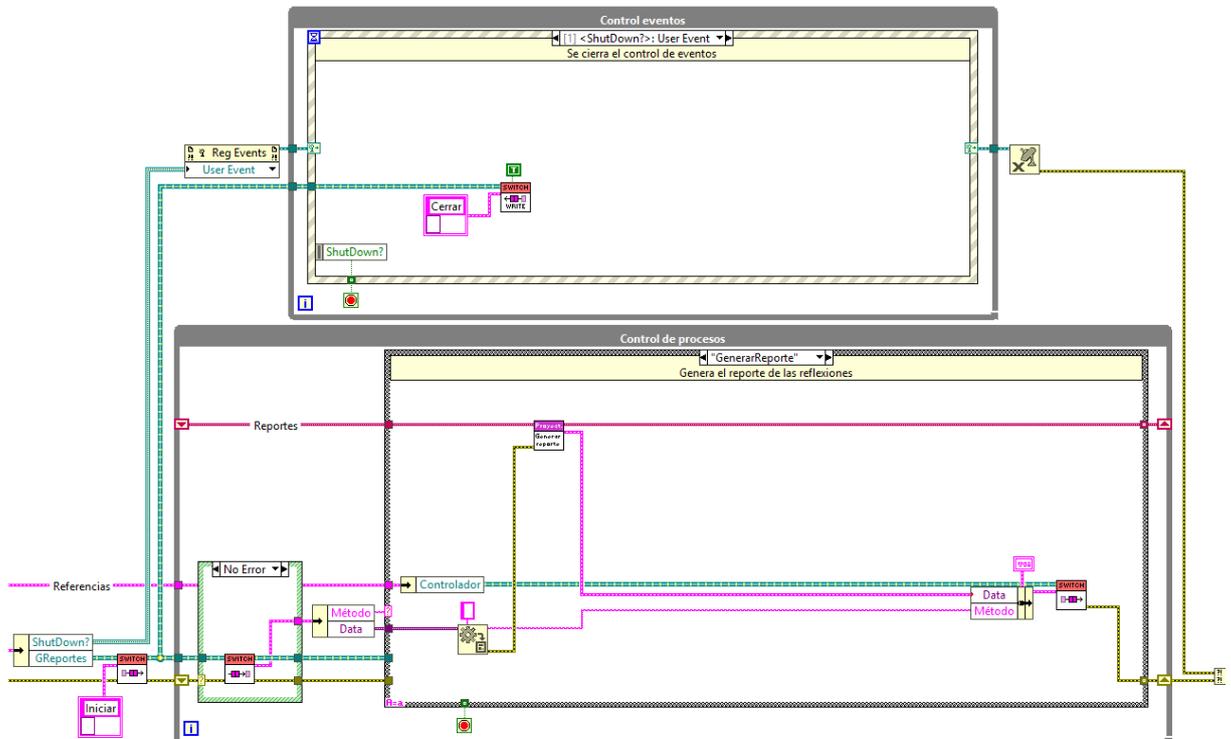


Figura 8.4. Desarrollo del módulo "Generador Reportes.vi".

Calcular Patrón

El código calcula el patrón de radiación de fuentes y receptores.

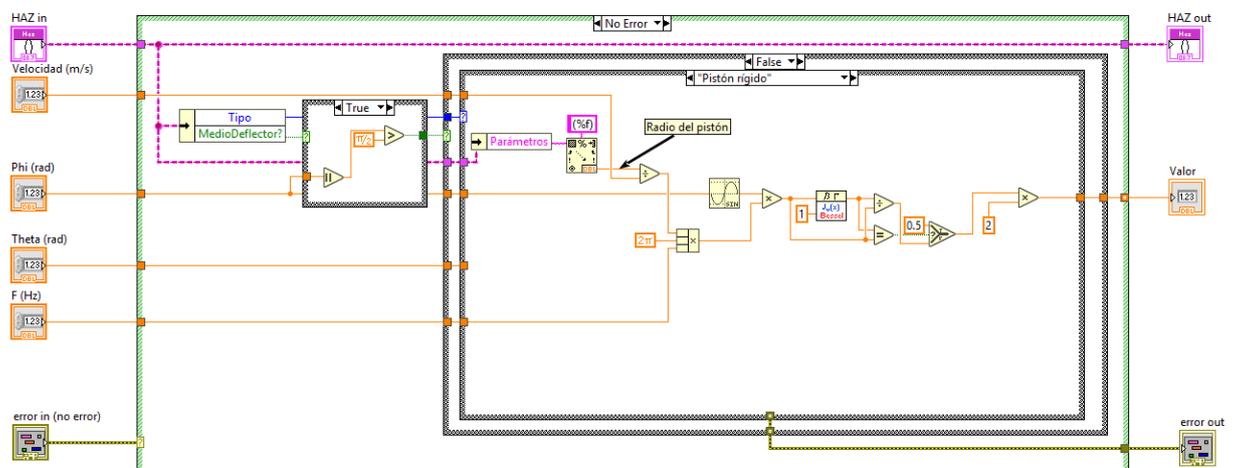


Figura 8.5. Desarrollo del método "Calcular patrón.vi" en la clase "Haz".

Módulo Procesador de Frentes de Onda

El módulo gestiona el cálculo de las frentes de onda de sonido.

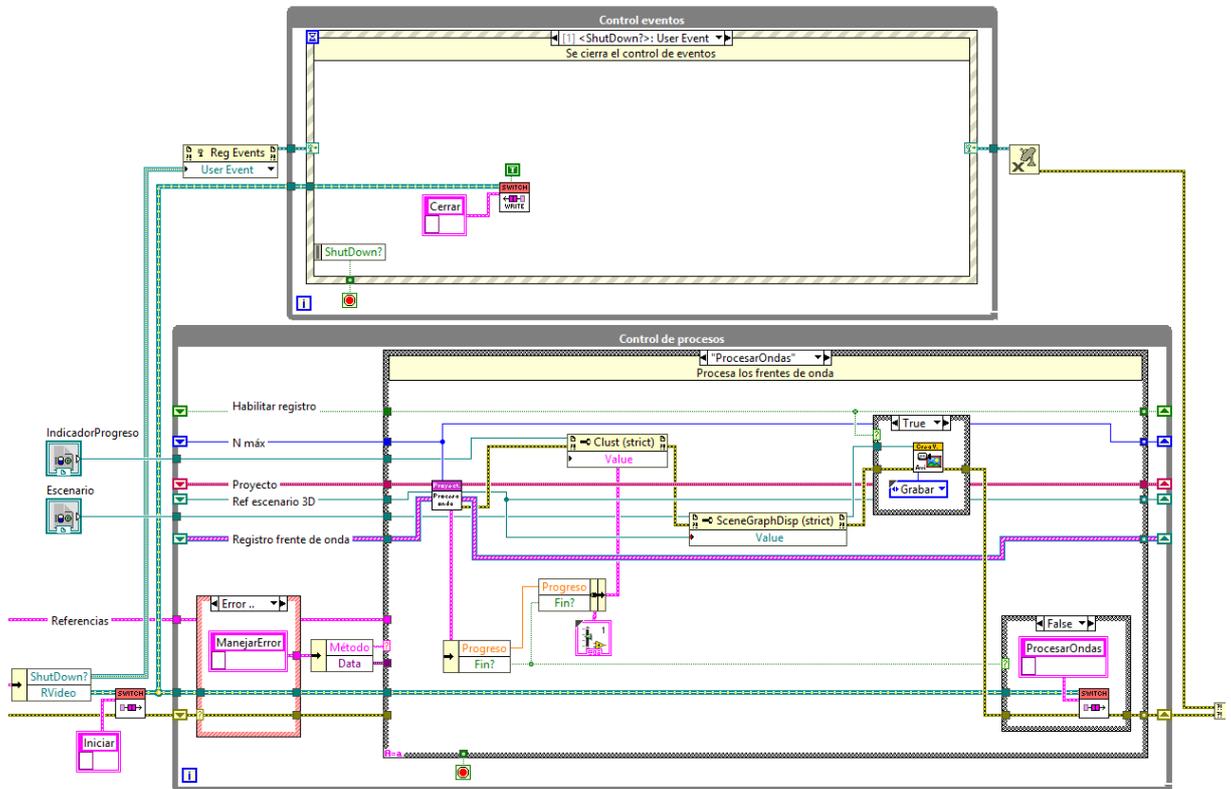


Figura 8.6. Desarrollo del módulo "Procesador Reflexiones.vi".

Detección de Rayo

El código verifica si algún rayo ha impactado en un receptor.

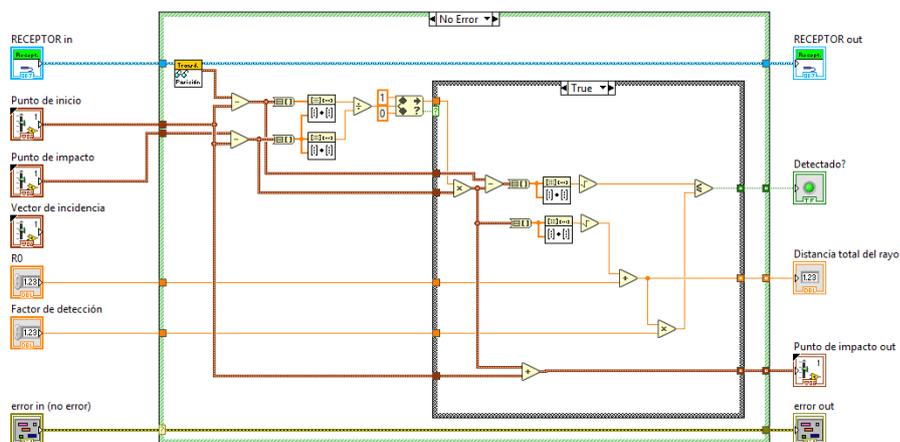


Figura 8.7. Desarrollo del método "Detectar rayo.vi" en la clase "Receptor".

Módulo de Auralización

Gestiona el proceso de convolución de la respuesta impulsiva sintetizada de un recinto con un audio de muestra, utilizando archivos WAV.

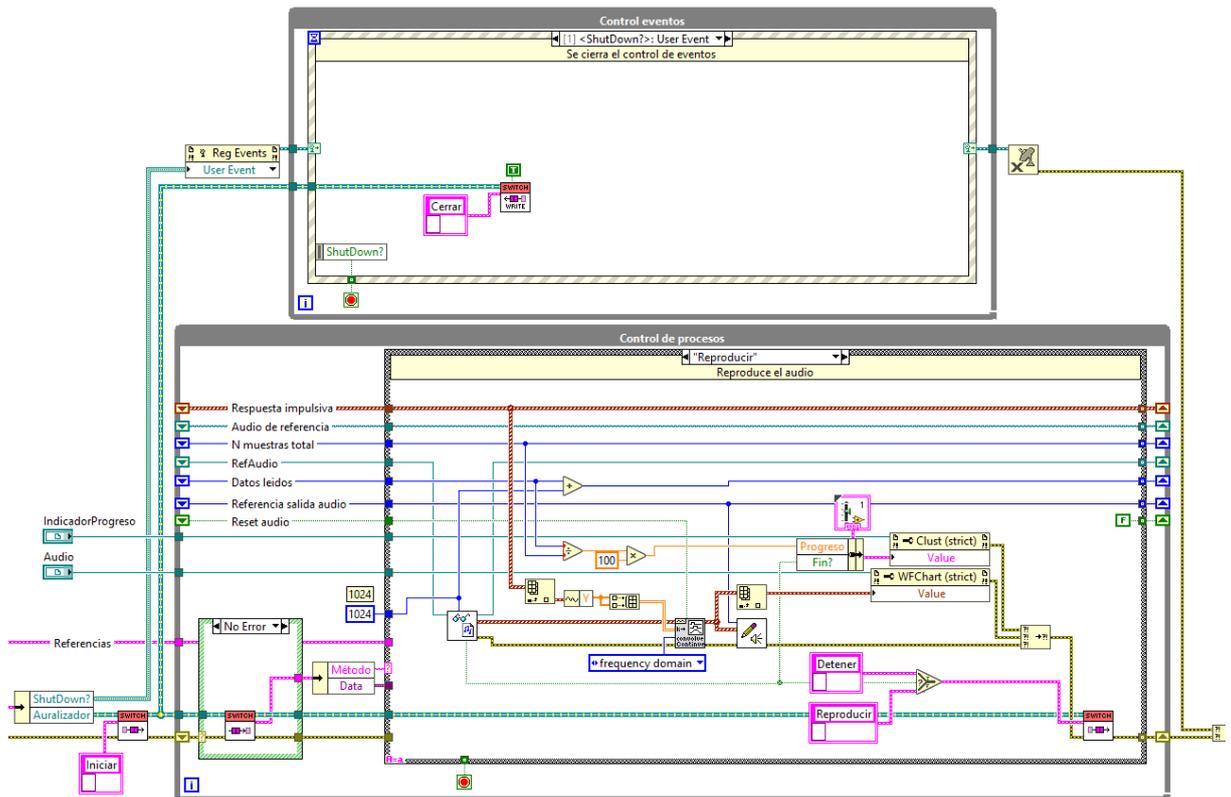


Figura 8.8. Desarrollo del módulo "Auralizador.vi".

ANEXO VI: CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

Archivo de Configuración

Un ejemplo del archivo de configuración (*.acp) del software "AURASONIC" se describe como:

[Generales]

Proyecto = "Nombre:A;Descripción:Simulación de piscina de nado sincronizado"
Unidades = "Distancia:m;Velocidad:m/s;Temperatura:°C"
Medio = "Tipo:Agua destilada;Velocidad:1502.17;Temperatura:27.0;Profundidad:1.500"
GeneradorRayos = "Nombre:Rayo cónico;Descripción:Generador de rayos de la fuente;N:3369618;RangoMáximo:275.350;RadioMáximo:0.300;ÁnguloLímite:1.570000000;HabilitarÁnguloLímite:True"
BandaFrecuencia = "Tipo:Octava;N:10;F:16000.000"
Reflexiones = "N:512;NDifuso:512"

[Escenario]

Superficies = "S001;S002;S003;S004;S005;S006"
Fuentes = "F001"
Receptores = "R002"

[PatrónHaz]

P001 = "Nombre:Pistón;Descripción:Pistón rígido de medio deflector;Función:;Tipo:Pistón rígido;MedioDeflector:True;Parámetros:(0.14);"
P002 = "Nombre:Difusión;Descripción:Fuente difusor de Lambert;Función:;Tipo:Lambert;MedioDeflector:True;Parámetros:;"
P003 = "Nombre:Omnidireccional;Descripción:Patrón omnidireccional;Función:;Tipo:Omnidireccional;MedioDeflector:False;Parámetros:;"

[Impedancias]

Imp002 = "Nombre:Agua;Descripción:Impedancia característica del agua;Tipo:Característica;Medio:(1.497E+6,1502.17,996.530);Acoplada:(0.000E+0,0.00,0.000);Espesor:0.0000"
Imp003 = "Nombre:Concreto;Descripción:Impedancia equivalente de las paredes de la piscina;Tipo:Sólido;Medio:(9.600E+6,4000.00,2400.000);Acoplada:(5.880E+6,2450.00,2400.000);Espesor:0.0000"
Imp005 = "Nombre:Aire;Descripción:Impedancia característica del aire;Tipo:Característica;Medio:(4.087E+2,347.50,1.176);Acoplada:(0.000E+0,0.00,0.000);Espesor:0.0000"

[Superficies]

S001 = "Grupo:G1;Nombre:Pared1;Descripción:Pared lateral yz1;Rotación:(1.570796327,0.000000000,0.000000000);Traslación:(0.000,0.000000,3.000000);Vértices:(x:(0.000,3.000,0.000),y:(0.000,0.000,30.000,30.000));Color:(10,10,255);ReflectorID:Ref001"
S002 = "Grupo:G1;Nombre:Pared2;Descripción:Pared lateral xz1;Rotación:(1.570796327,1.570796327,0.000000000);Traslación:(20.000,0.000000,3.000000);Vértices:(x:(0.000,3.000,3.000,0.000),y:(0.000,0.000,20.000,20.000));Color:(10,10,255);ReflectorID:Ref001"
S003 = "Grupo:G1;Nombre:Pared3;Descripción:Pared lateral xz2 (fondo);Rotación:(-1.570796327,1.570796327,0.000000000);Traslación:(20.000,30.000000,0.000000);Vértices:(x:(0.000,3.000,3.000,0.000),y:(0.000,0.000,20.000,20.000));Color:(10,10,255);ReflectorID:Ref001"
S004 = "Grupo:G1;Nombre:Pared4;Descripción:Pared lateral yz2 (fondo);Rotación:(-1.570796327,0.000000000,0.000000000);Traslación:(20.000,0.000000,0.000000);Vértices:(x:(0.000,3.000,3.000,0.000),y:(0.000,0.000,30.000,30.000));Color:(10,10,255);ReflectorID:Ref001"
S005 = "Grupo:G1;Nombre:Piso;Descripción:Piso de fondo;Rotación:(0.000000000,0.000000000,0.000000000);Traslación:(0.000,0.000000,0.000000);Vértices:(x:(0.000,2.000,20.000,0.000),y:(0.000,0.000,30.000,30.000));Color:(120,120,255);ReflectorID:Ref001"
S006 = "Grupo:G1;Nombre:Superficie;Descripción:Superficie;Rotación:(3.141592654,0.000000000,0.000000000);Traslación:(20.000,0.000000,3.000000);Vértices:(x:(0.000,20.000,20.000,0.000),y:(0.000,0.000,30.000,30.000));Color:(10,10,255);ReflectorID:Ref002"

[Fuentes]

F001 = "Nombre:Fuente;Descripción:Fuente de referencia;Forma:Pistón plano circular;Posición:(0.020,15.000,2.000);Rotación:(1.570796320,0.000000000,0.000000000);Área:0.061575;Radio:0.140;IDPatrón:P001;Color:(179,42,255);Potencia:20.0"

[Receptores]

R002 = "Nombre:Receptor;Descripción:Receptor del punto A;Forma:Esfera;Posición:(5.500,10.500,1.700);Rotación:(0.000000000,0.000000000,0.000000000);Área:0.031415;Radio:0.100;IDPatrón:P003;Color:(255,255,0);Sensibilidad:1.000E+0"

[Reflectores]

Ref001 = "Nombre:Agua-Pared;Descripción:Reflector de interfase agua-pared;Tipo:Rígido;IDMedio1:Imp002;IDMedio2:Imp003;Clase:ESPECULAR;DifusorID:"

Ref002 = "Nombre:Agua-Aire;Descripción:Reflector de interfase agua-aire;Tipo:Fluido;IDMedio1:Imp002;IDMedio2:Imp005;Clase:DIFUSOR_ESPECULAR;DifusorID:D001"

[Difusores]

D001 = "Nombre:Difusor agua-aire;Descripción:Difusor producto de las olas superficiales;Función:;CoeficientesS:();Tipo:Rugosa coherente;IDPatrón:P002;Parámetros:(0.01);"



ANEXO VII: OTROS RESULTADOS DE SIMULACIÓN EN LA ZONA DE EJECUCIÓN DE NADO SINCRONIZADO

B

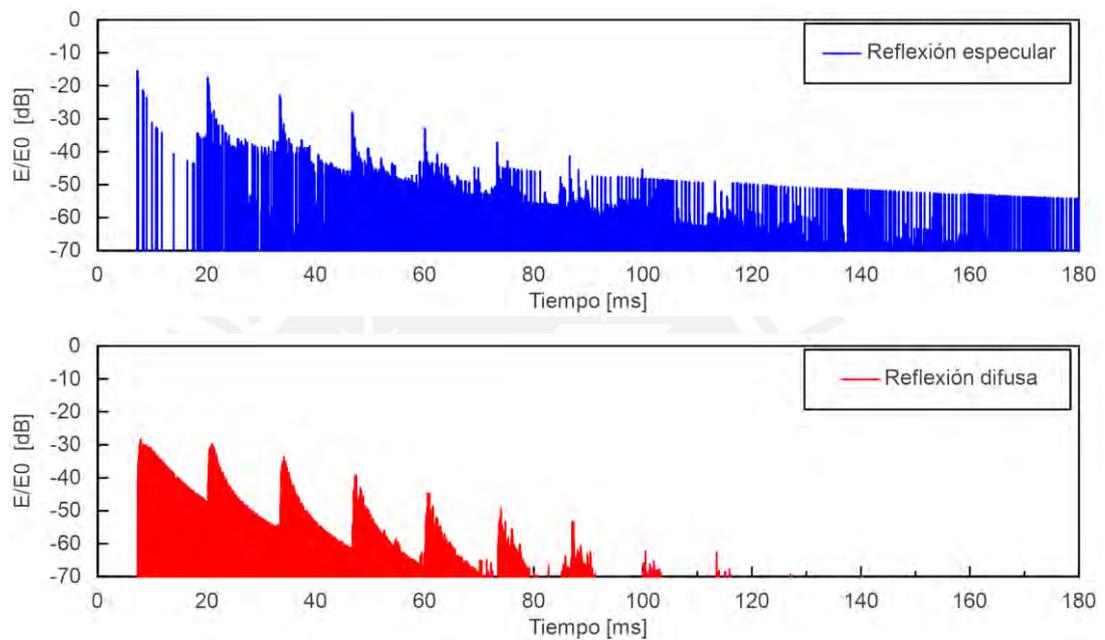


Figura 8.9. Distribución temporal de las reflexiones en el punto B.

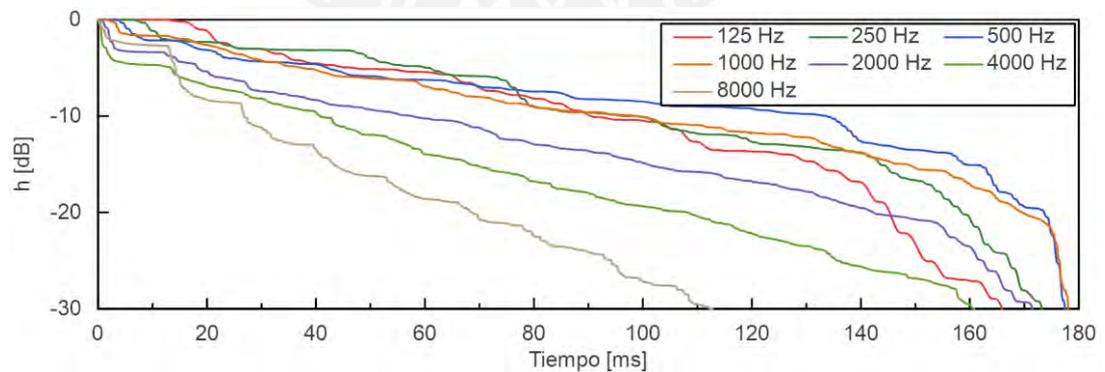


Figura 8.10. Respuesta de impulso integrado en el punto B.

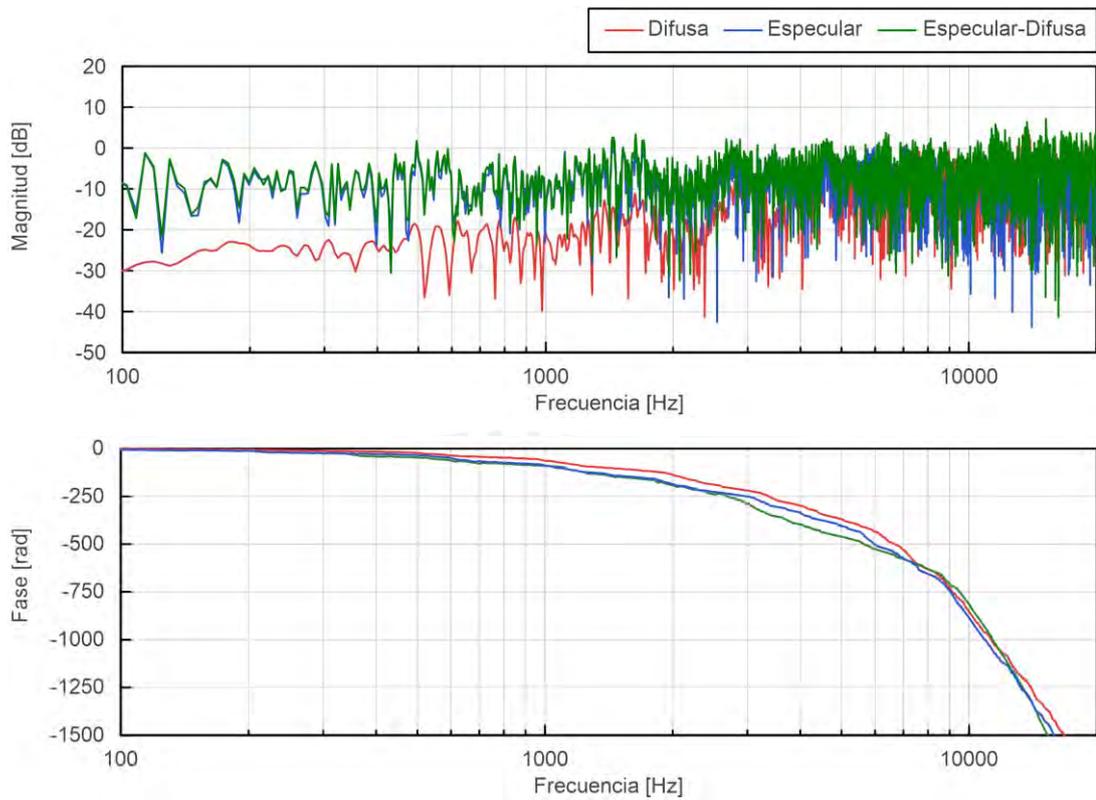


Figura 8.11. Respuesta en frecuencia en el punto B.

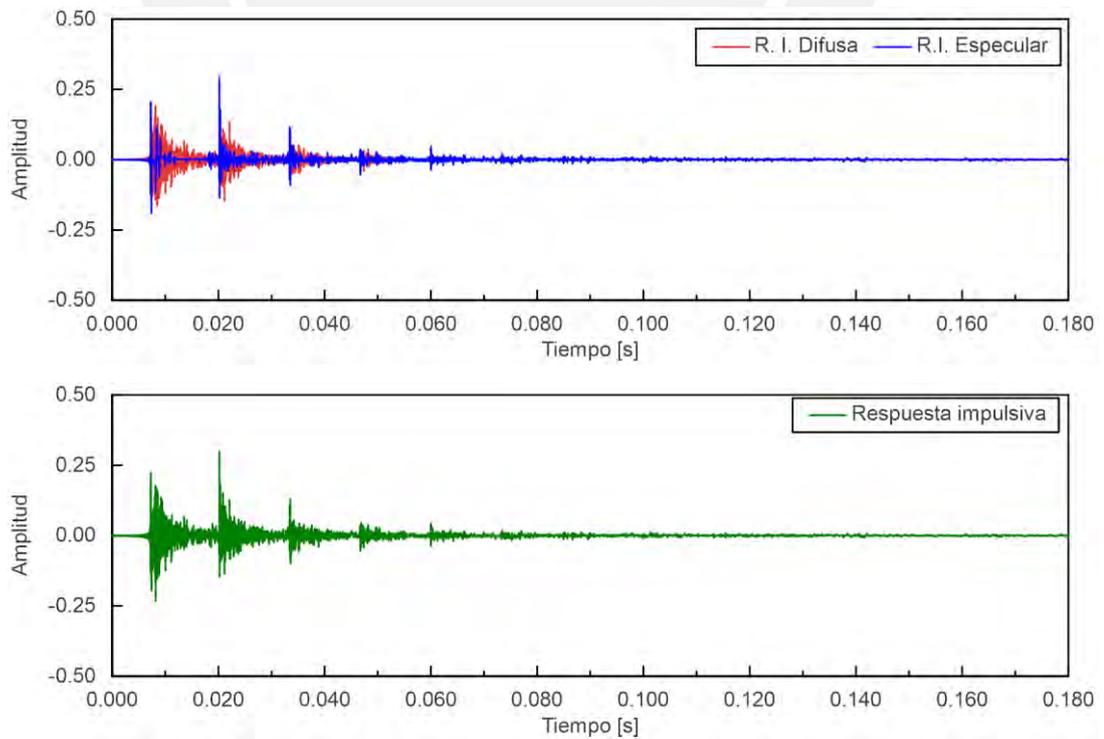


Figura 8.12. Respuesta impulsiva en el punto B.

C

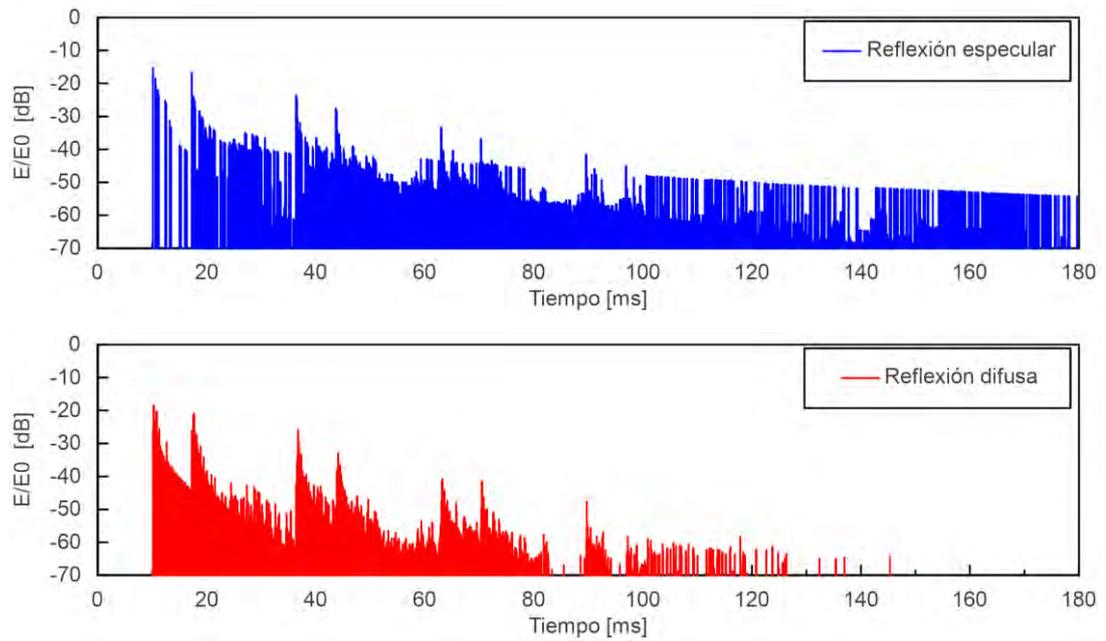


Figura 8.13. Distribución temporal de las reflexiones en el punto C.

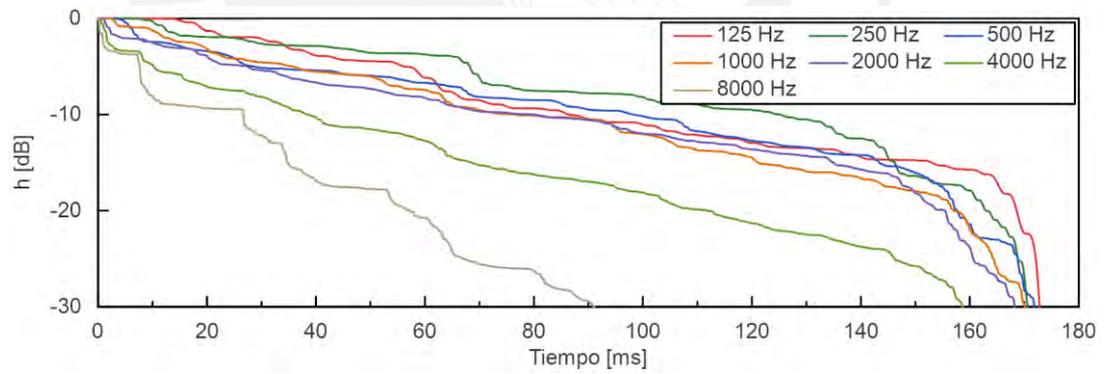


Figura 8.14. Respuesta de impulso integrado en el punto C.

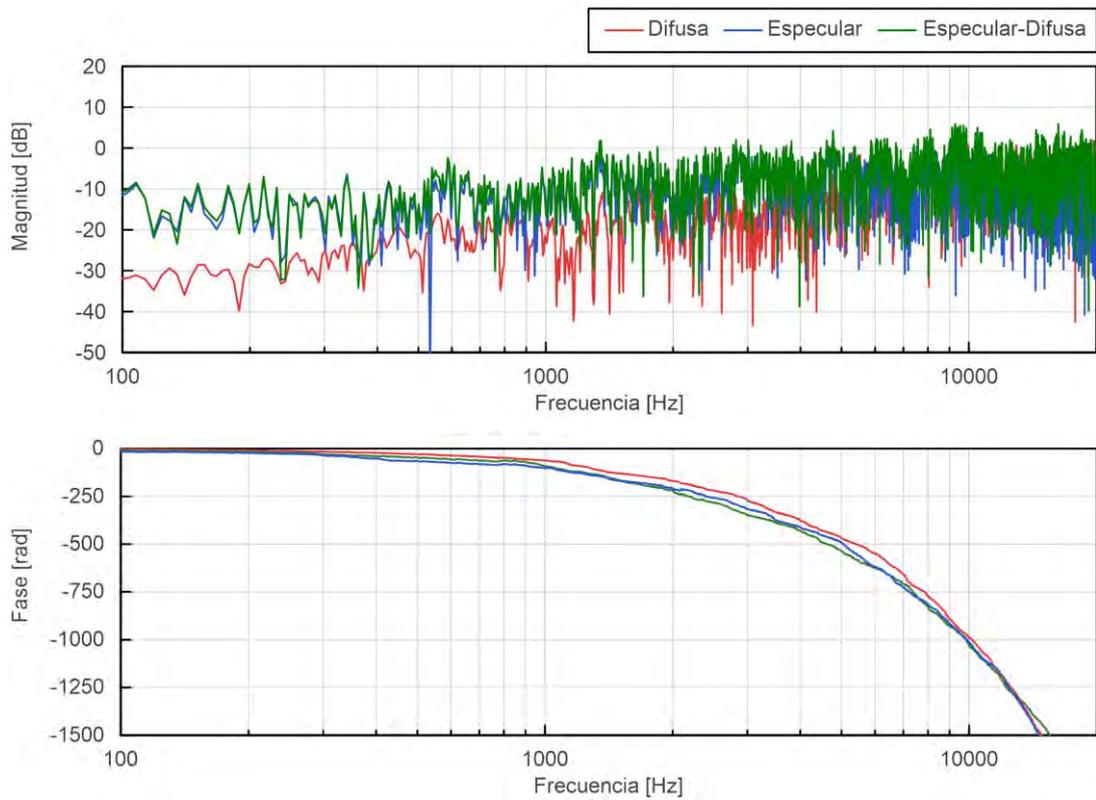


Figura 8.15. Respuesta en frecuencia en el punto C.

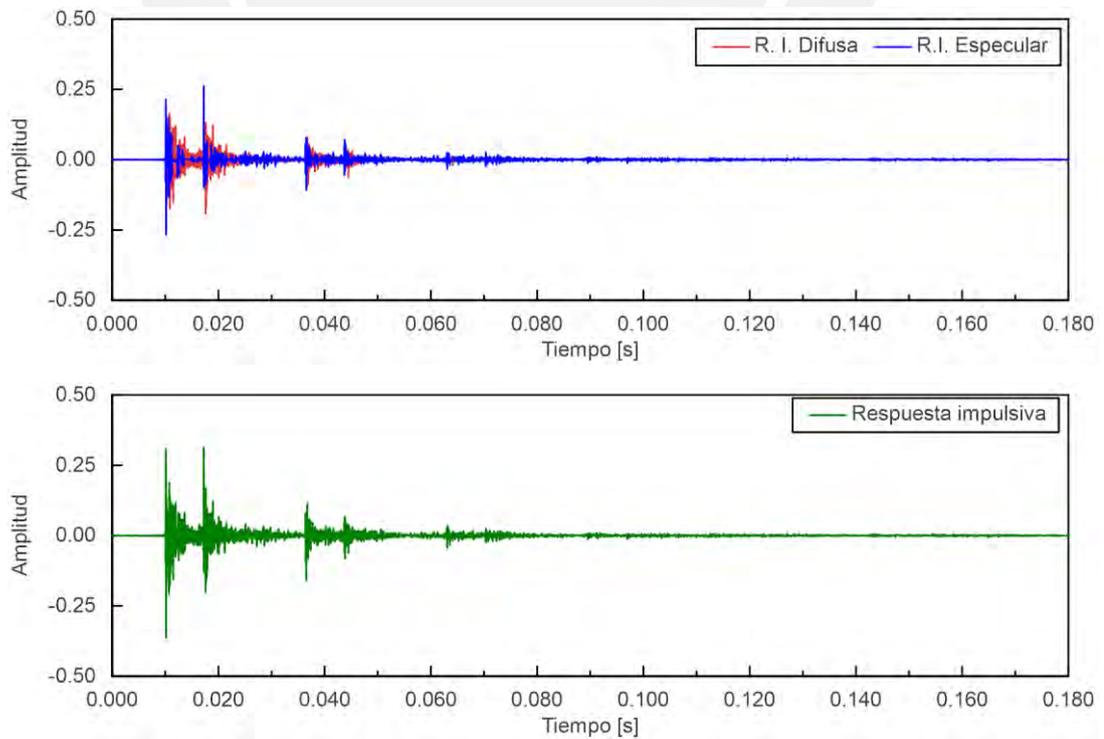


Figura 8.16. Respuesta impulsiva en el punto C.

D

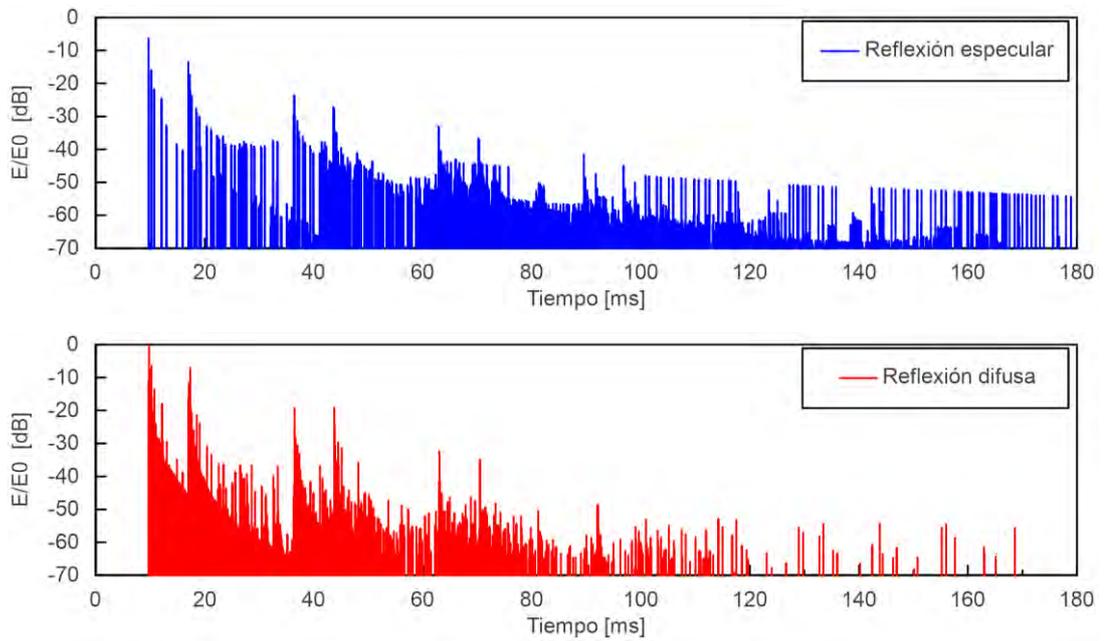


Figura 8.17. Distribución temporal de las reflexiones en el punto D.

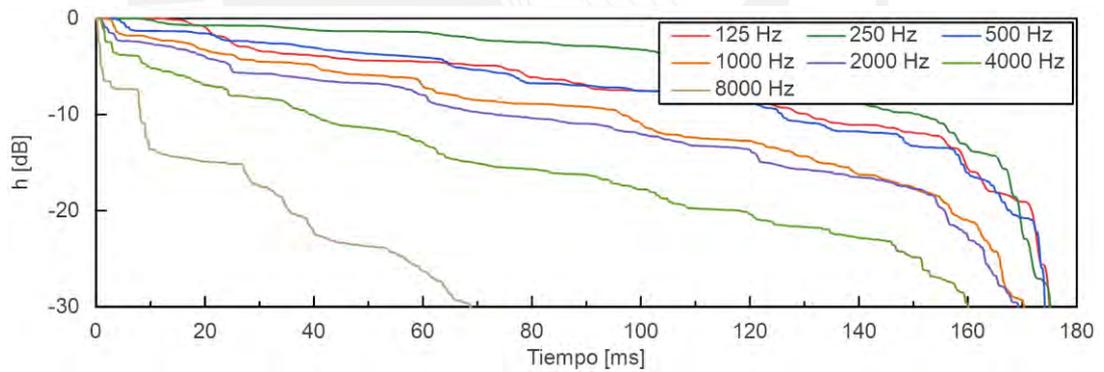


Figura 8.18. Respuesta de impulso integrado en el punto D.

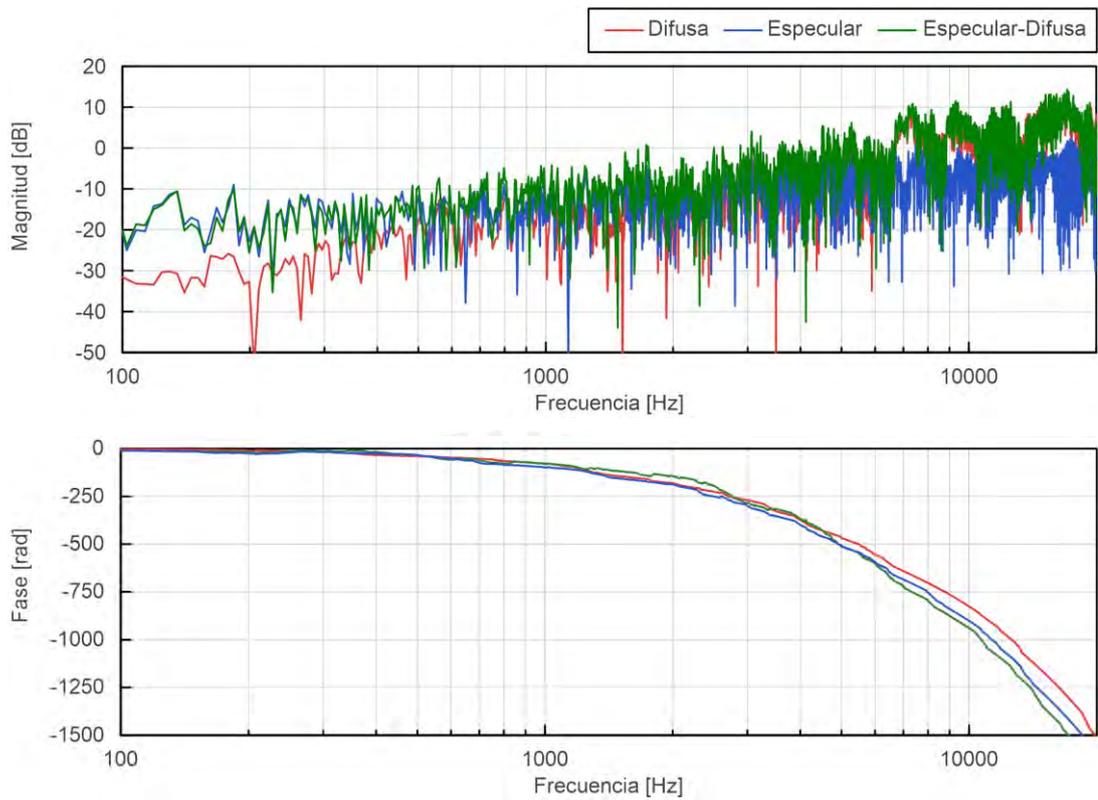


Figura 8.19. Respuesta en frecuencia en el punto D.

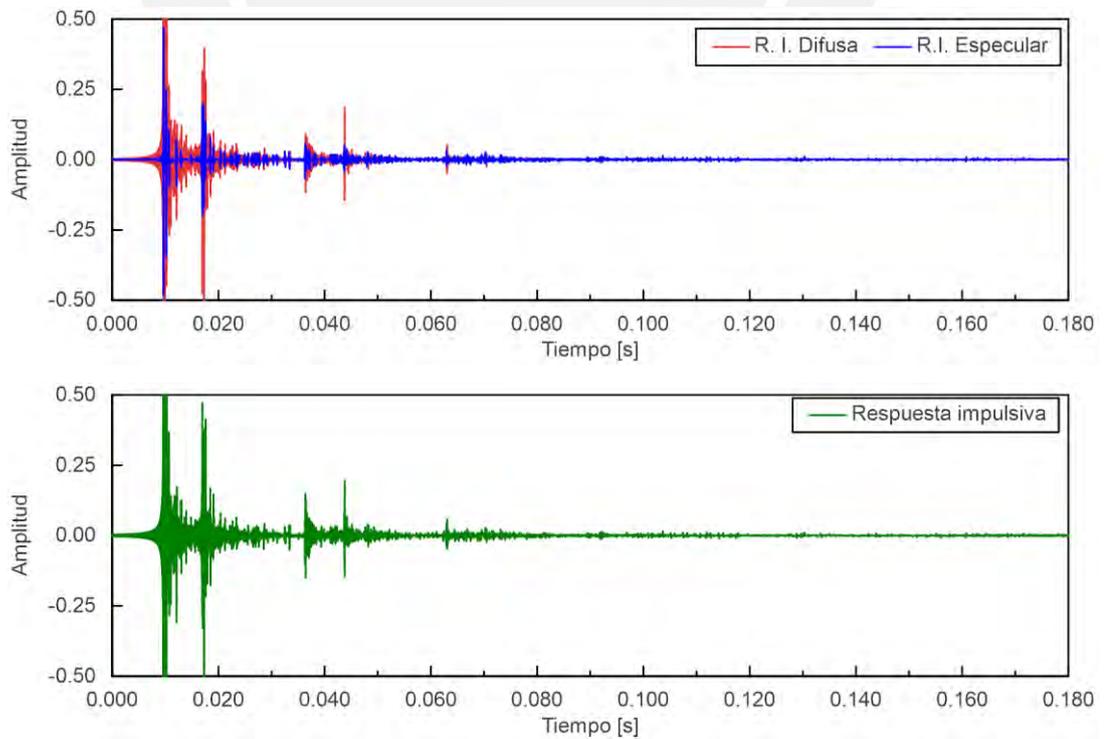


Figura 8.20. Respuesta impulsiva en el punto D.

F

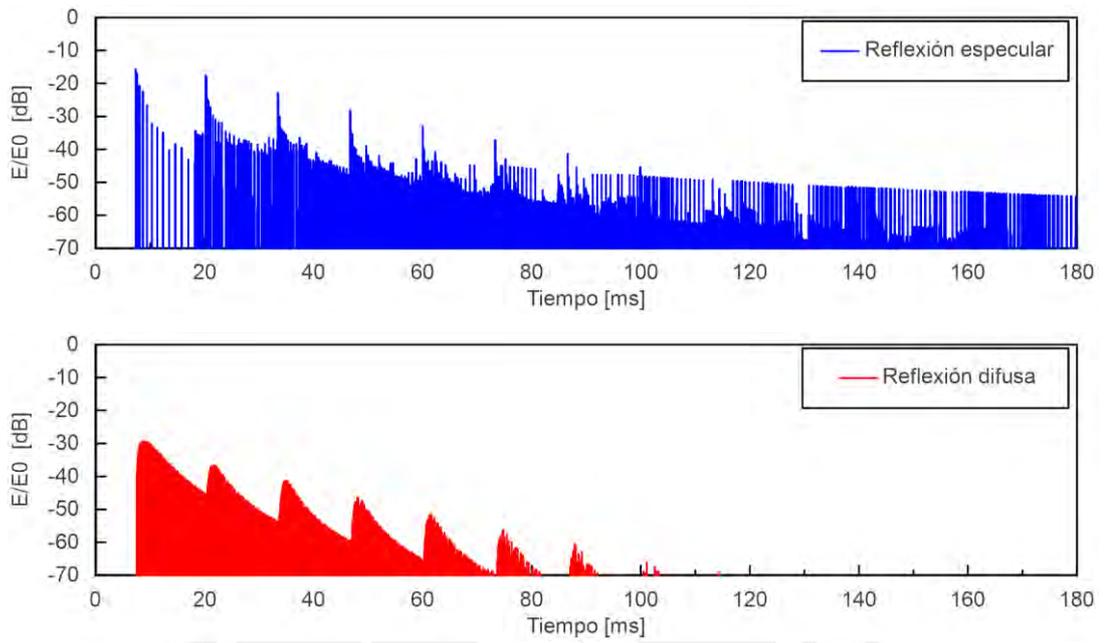


Figura 8.21. Distribución temporal de las reflexiones en el punto F.

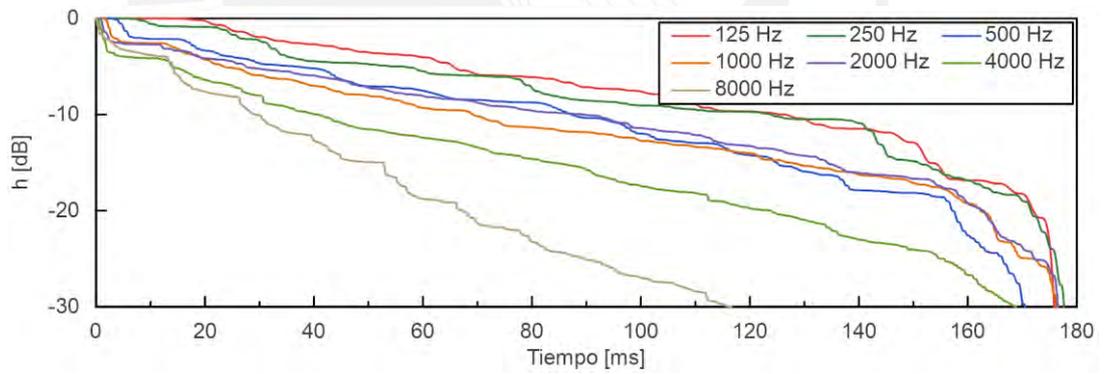


Figura 8.22. Respuesta de impulso integrado en el punto F.

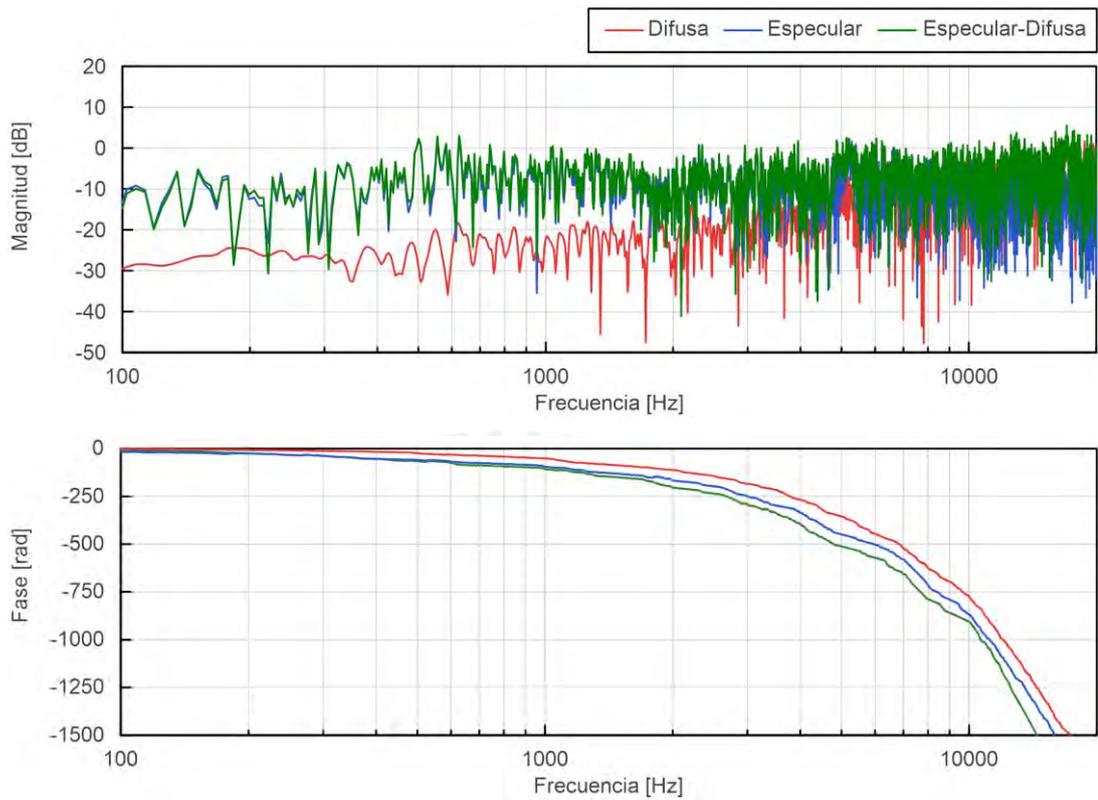


Figura 8.23. Respuesta en frecuencia en el punto F.

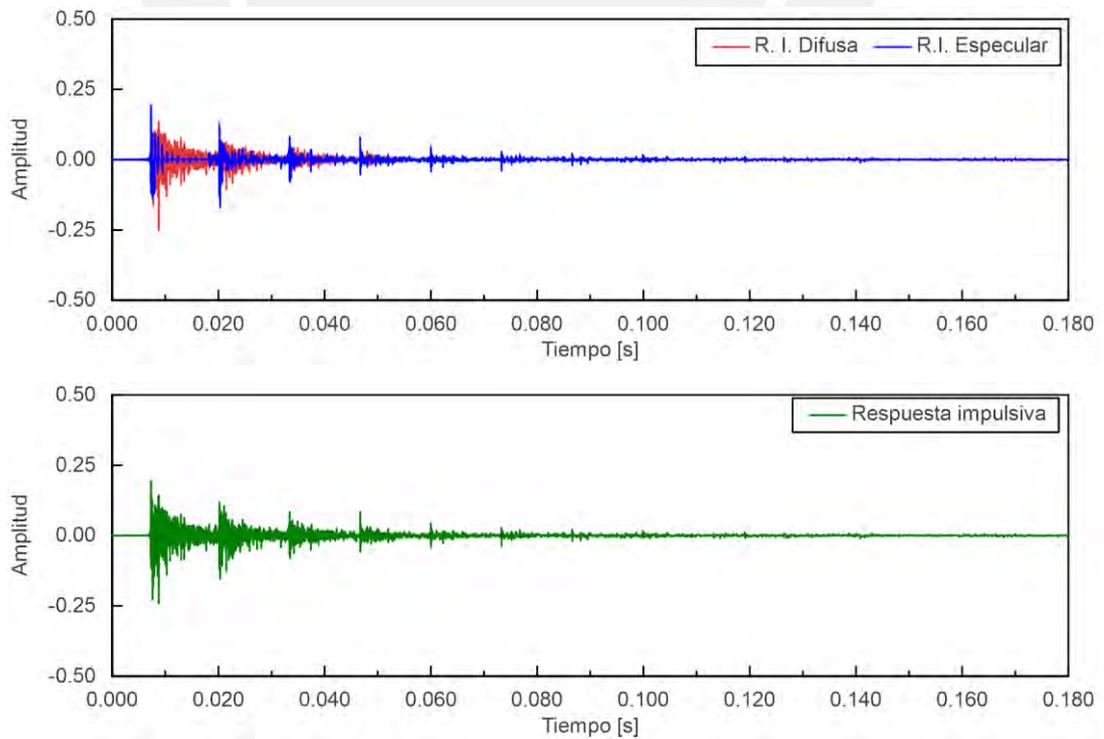


Figura 8.24. Respuesta impulsiva en el punto F.

G

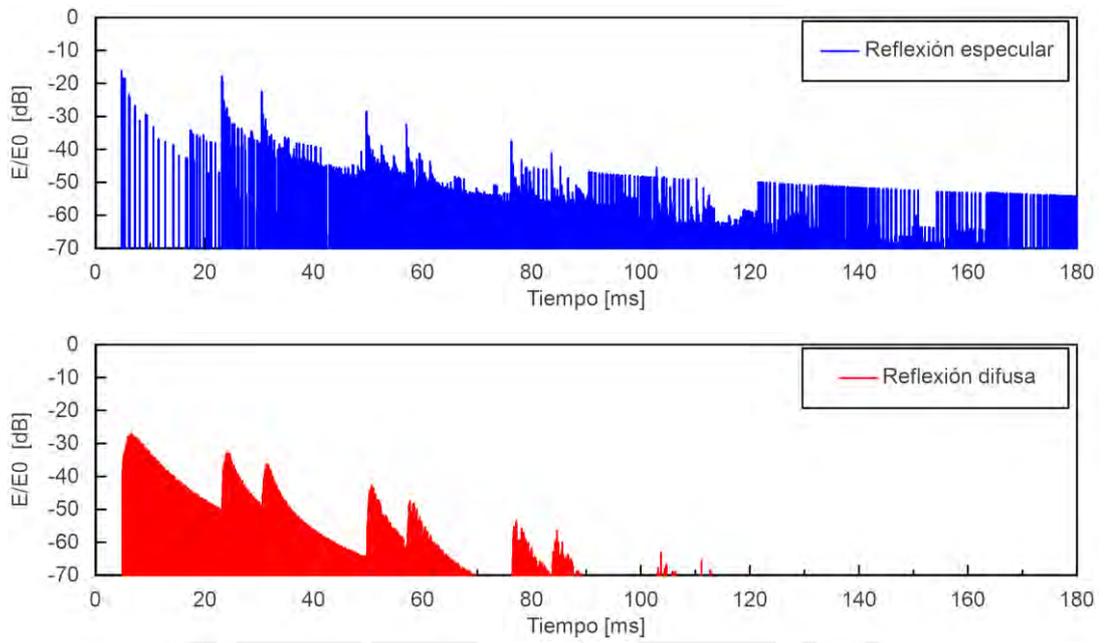


Figura 8.25. Distribución temporal de las reflexiones en el punto G.

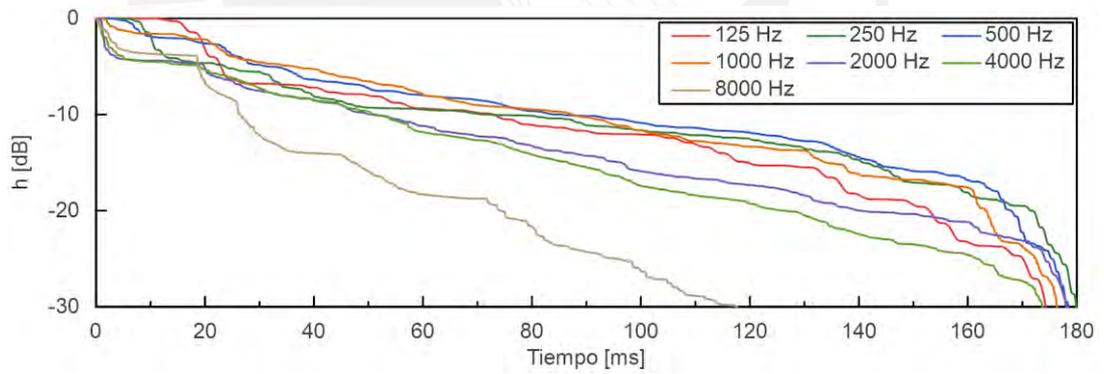


Figura 8.26. Respuesta de impulso integrado en el punto G.

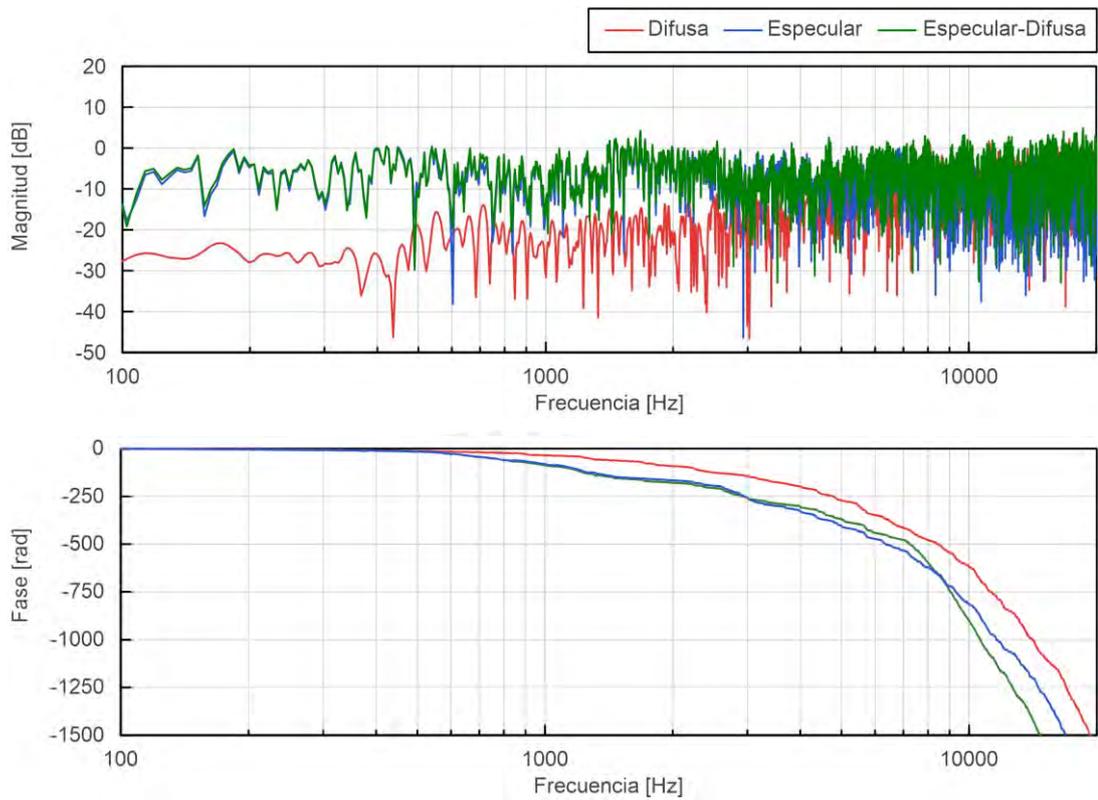


Figura 8.27. Respuesta en frecuencia en el punto G.

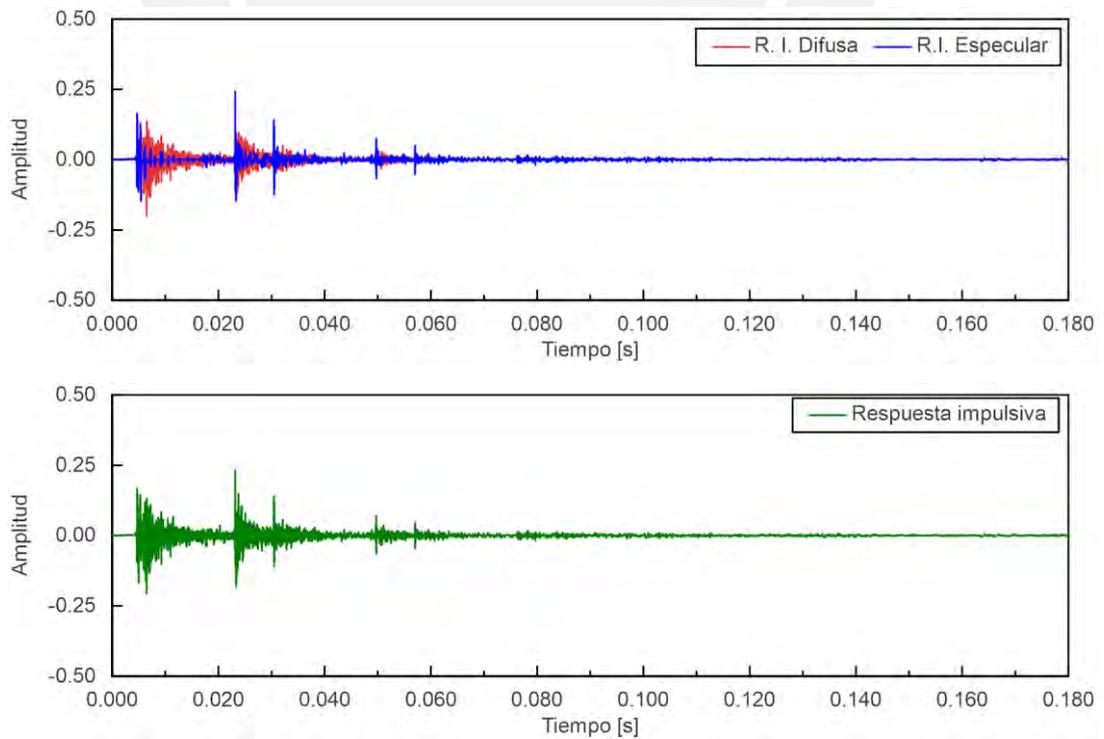


Figura 8.28. Respuesta impulsiva en el punto G.

H

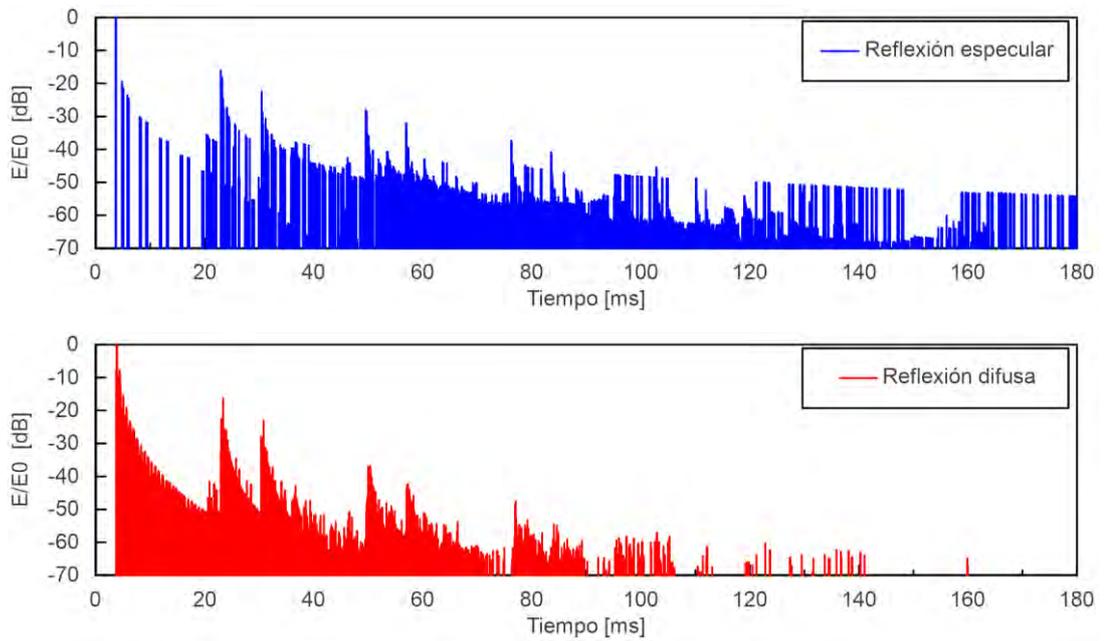


Figura 8.29. Distribución temporal de las reflexiones en el punto H.

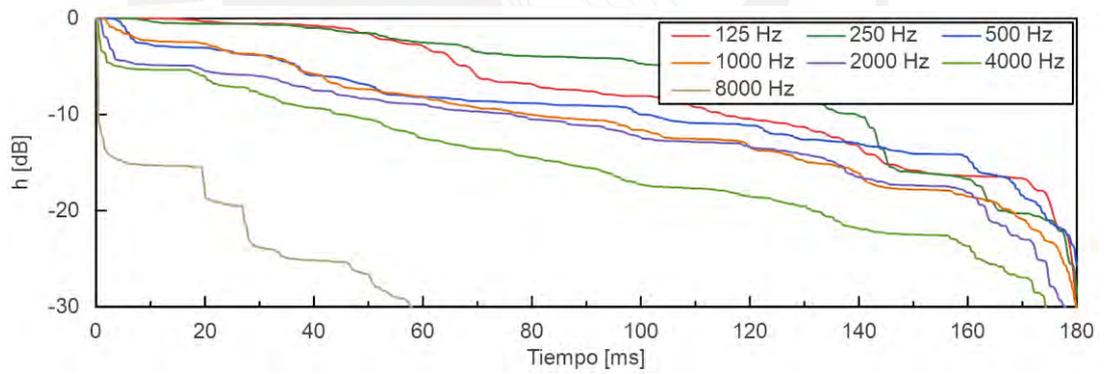


Figura 8.30. Respuesta de impulso integrado en el punto H.

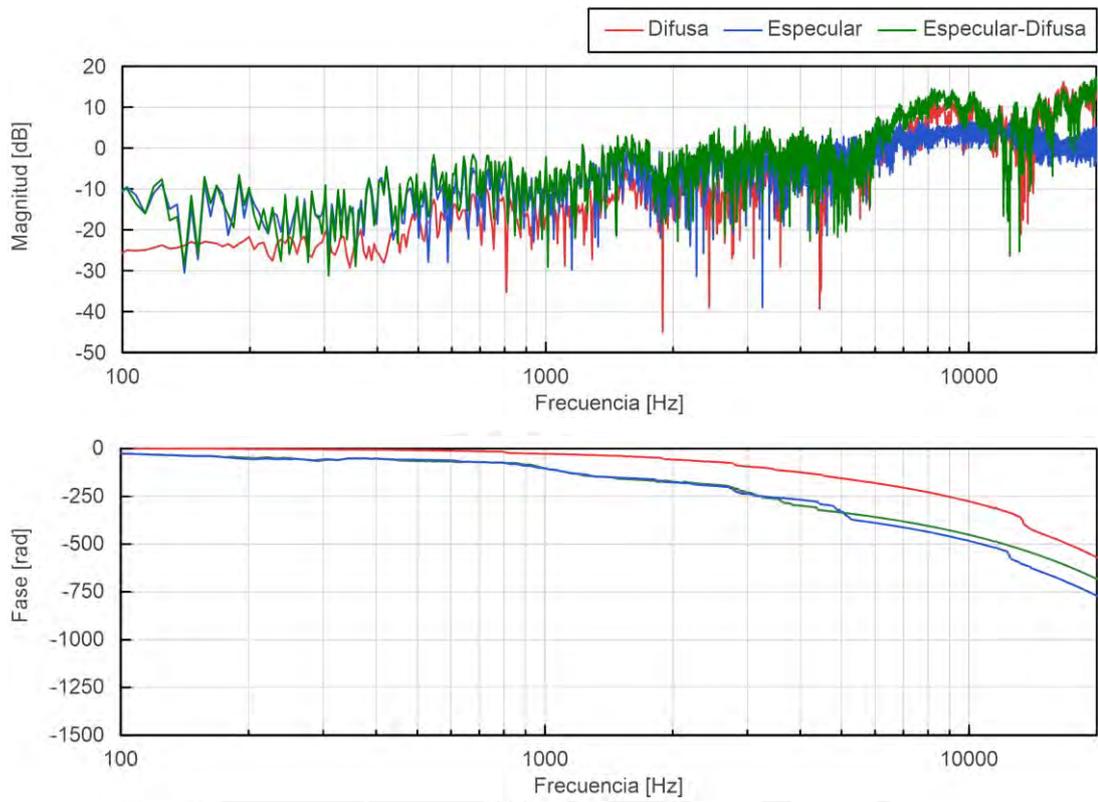


Figura 8.31. Respuesta en frecuencia en el punto H.

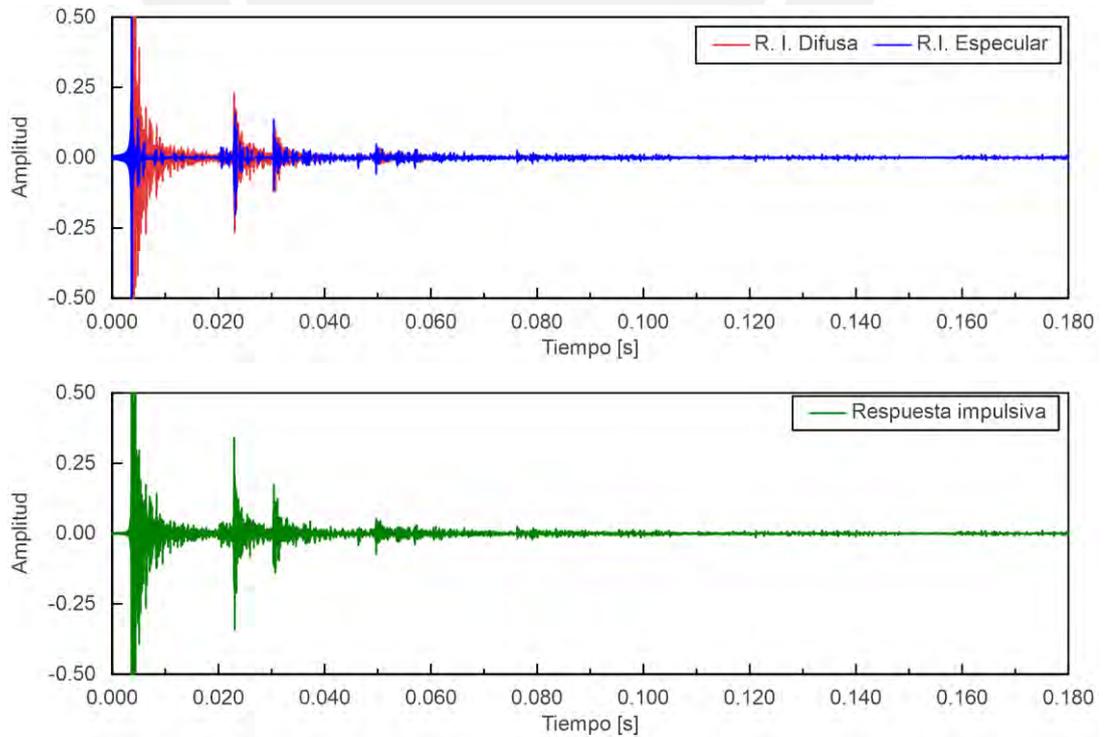


Figura 8.32. Respuesta impulsiva en el punto H.

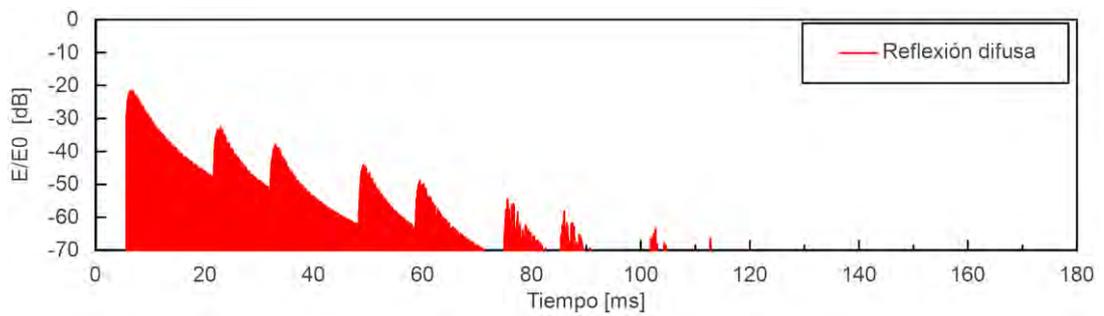
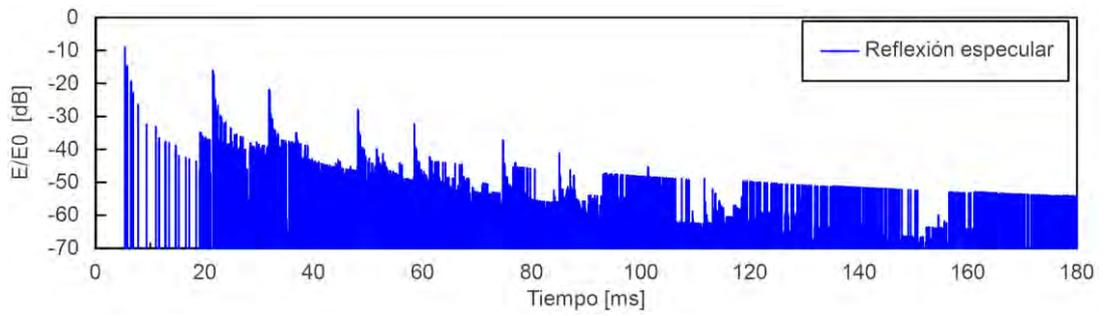


Figura 8.33. Distribución temporal de las reflexiones en el punto I.

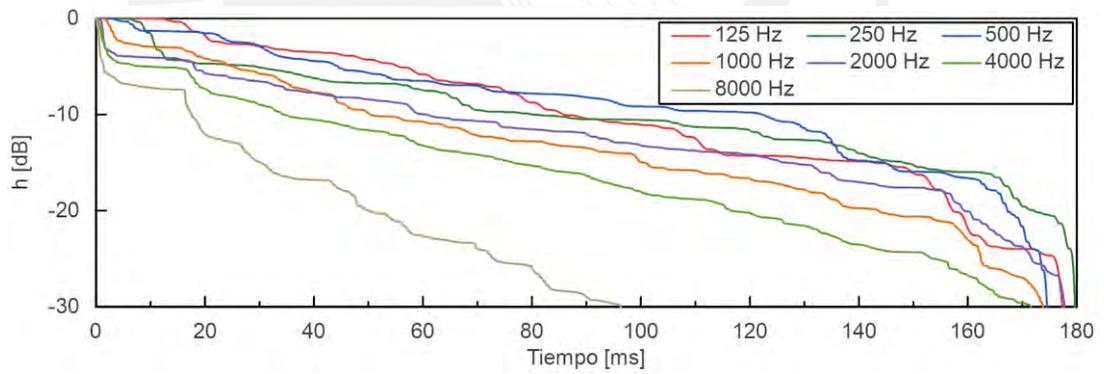


Figura 8.34. Respuesta de impulso integrado en el punto I.

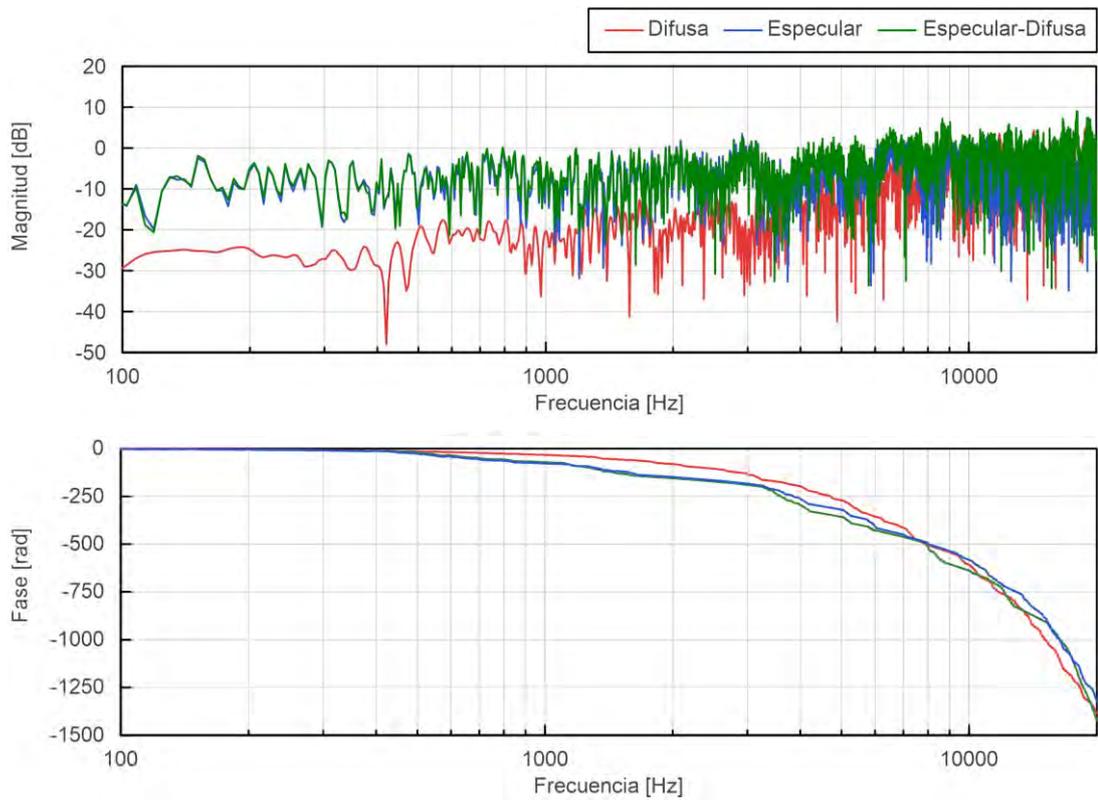


Figura 8.35. Respuesta en frecuencia en el punto I.

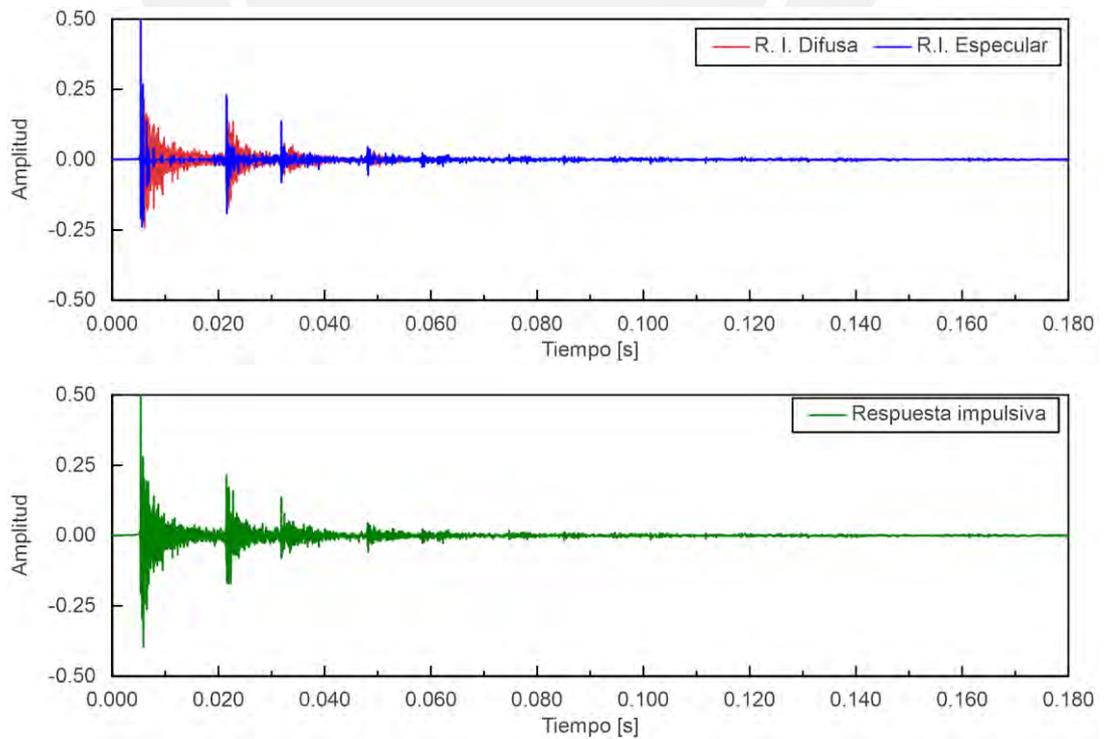


Figura 8.36. Respuesta impulsiva en el punto I.

J

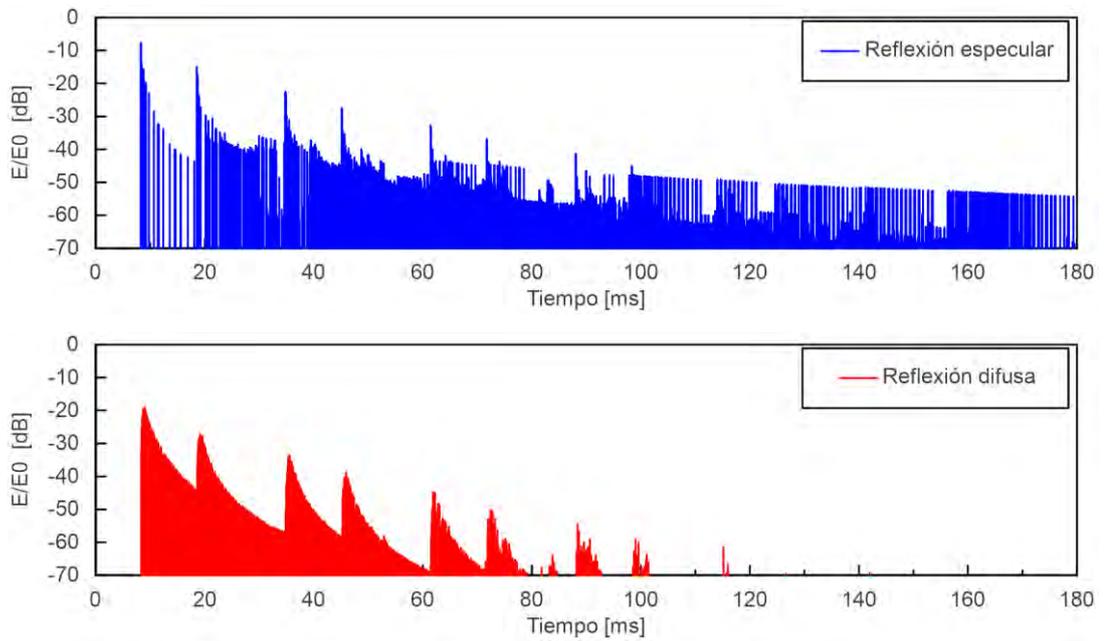


Figura 8.37. Distribución temporal de las reflexiones en el punto J.

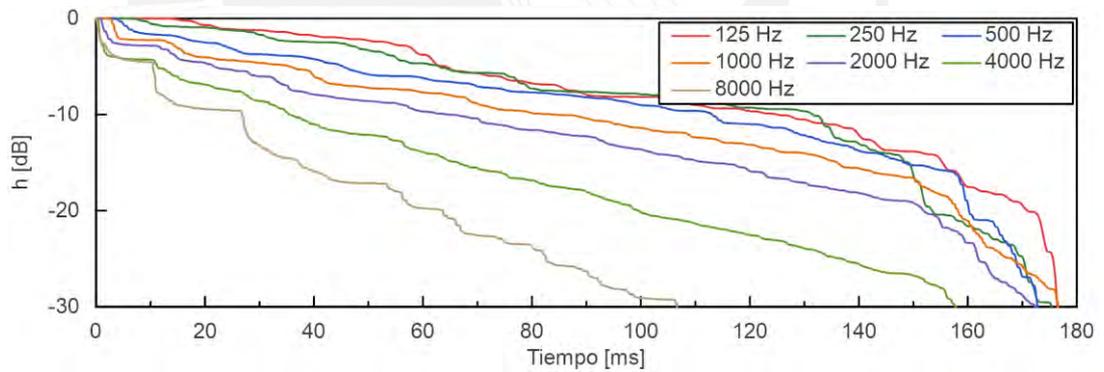


Figura 8.38. Respuesta de impulso integrado en el punto J.

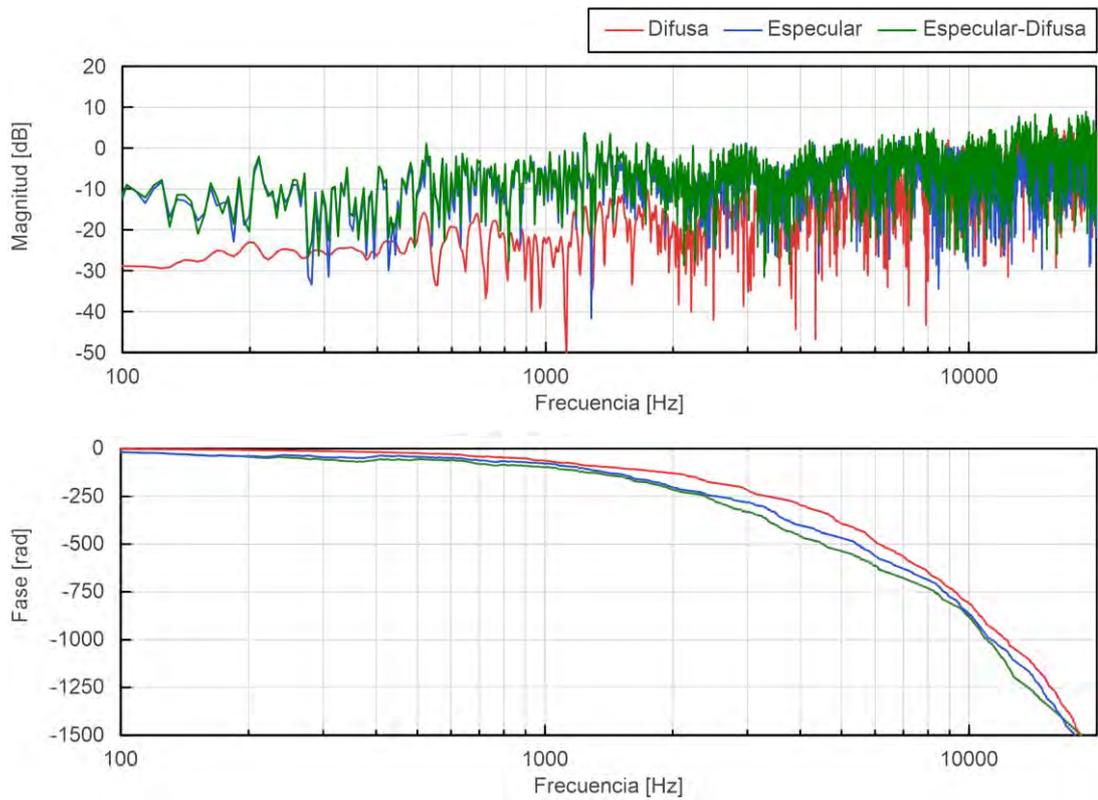


Figura 8.39. Respuesta en frecuencia en el punto J.

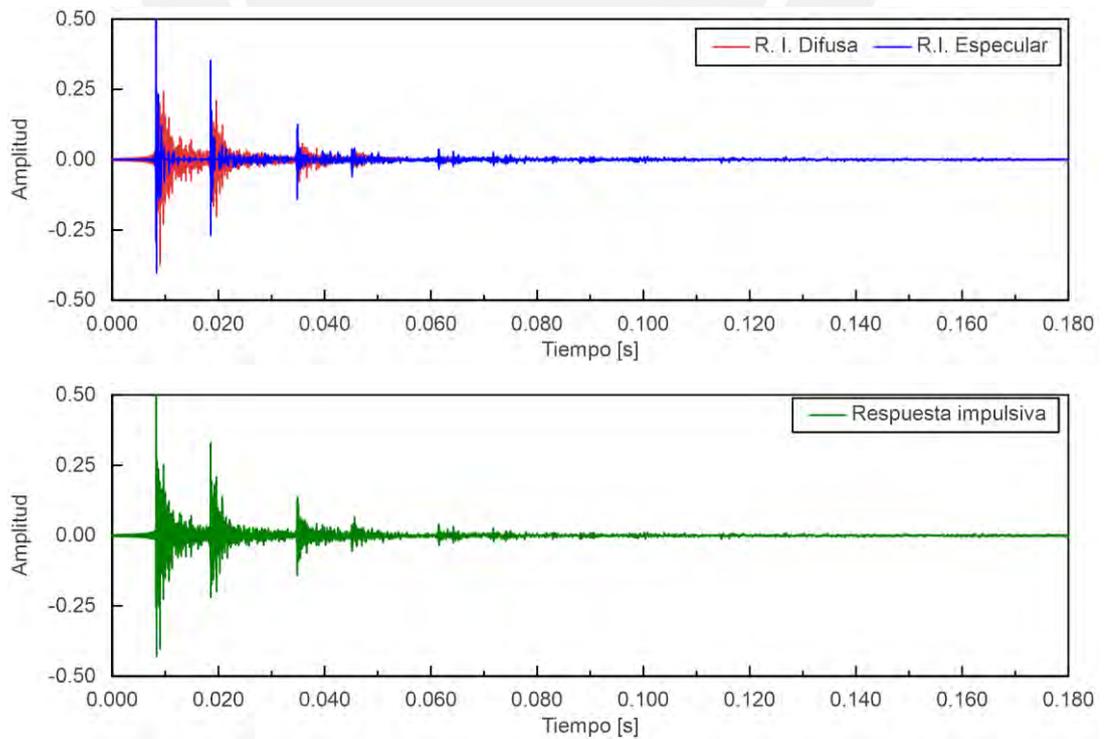


Figura 8.40. Respuesta impulsiva en el punto J.

K

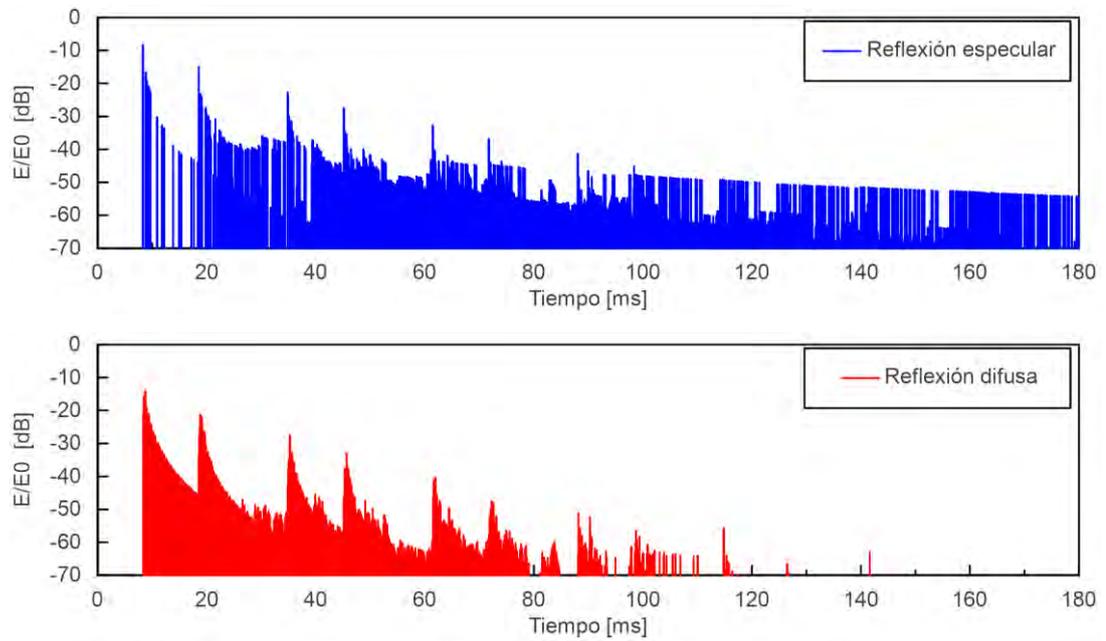


Figura 8.41. Distribución temporal de las reflexiones en el punto K.

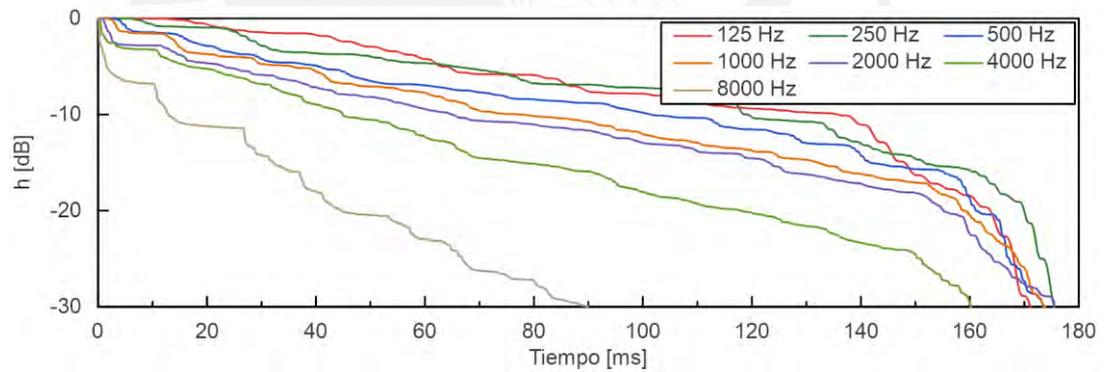


Figura 8.42. Respuesta de impulso integrado en el punto K.

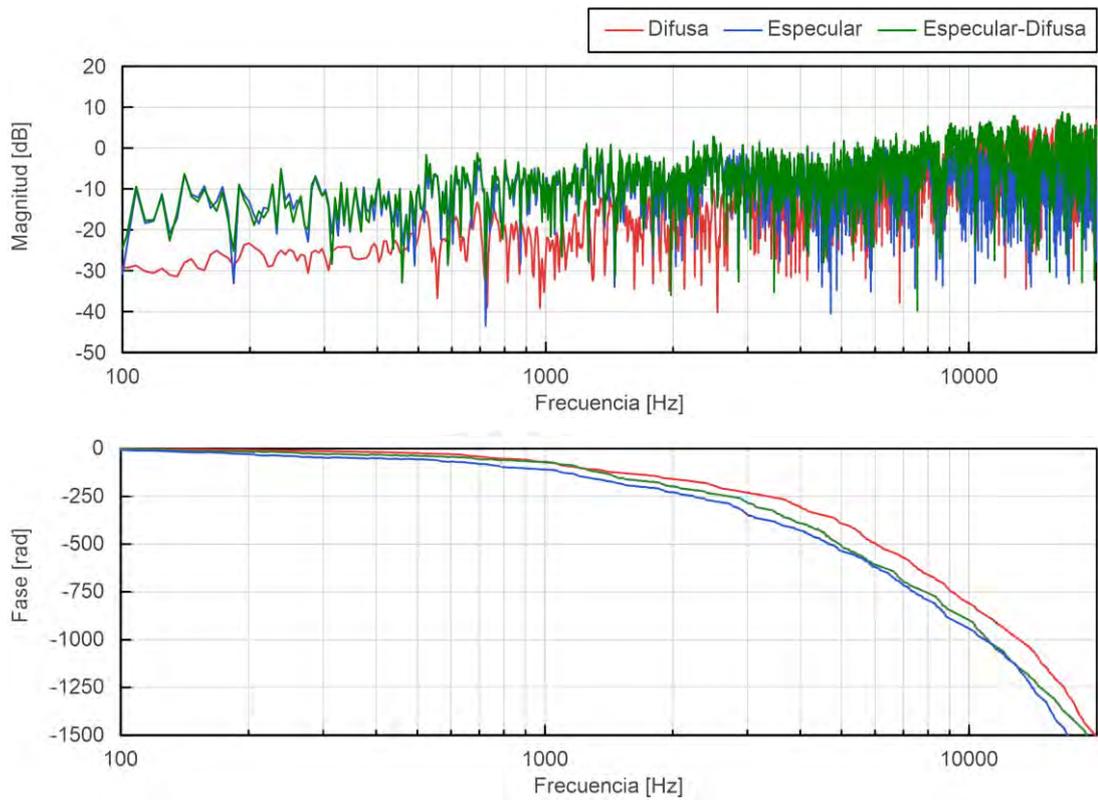


Figura 8.43. Respuesta en frecuencia en el punto K.

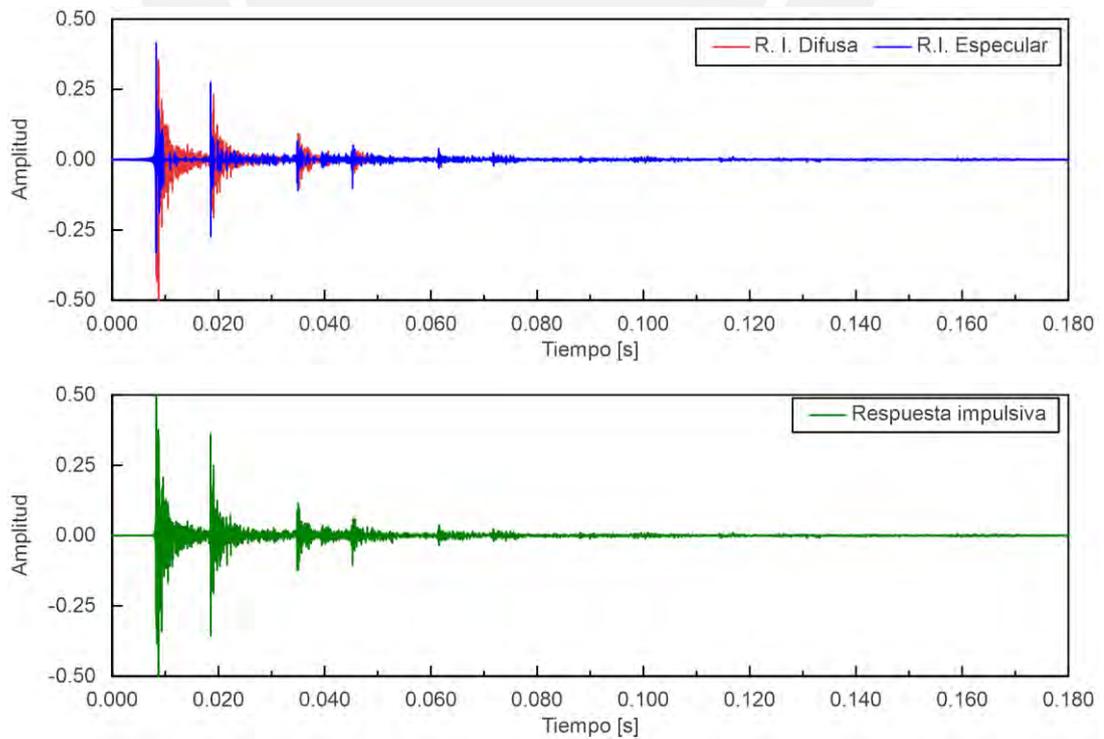


Figura 8.44. Respuesta impulsiva en el punto K.

L

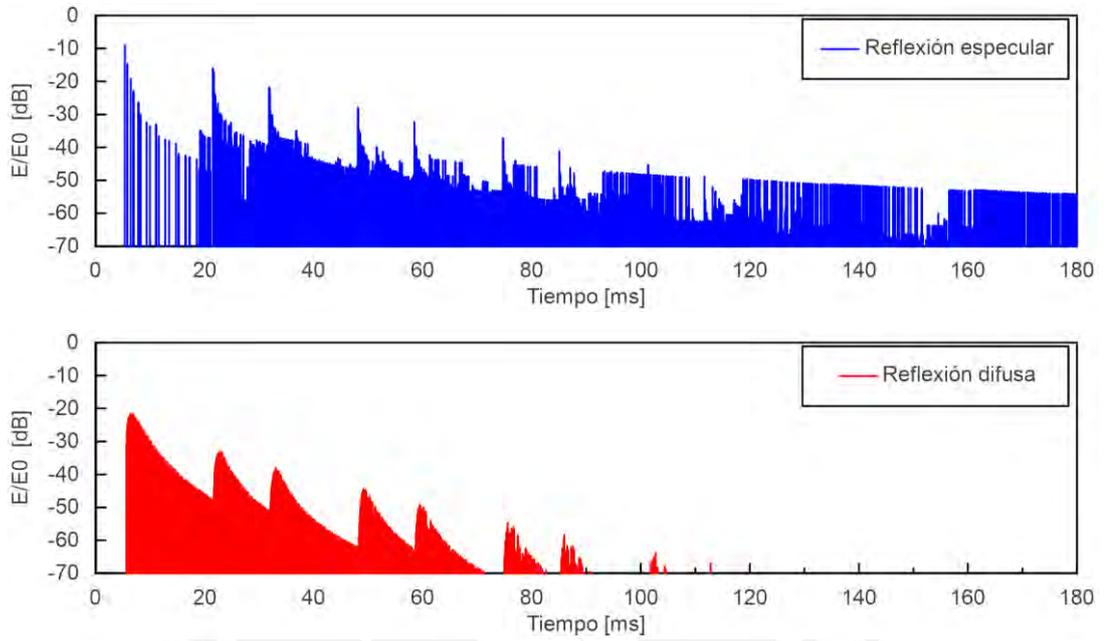


Figura 8.45. Distribución temporal de las reflexiones en el punto L.

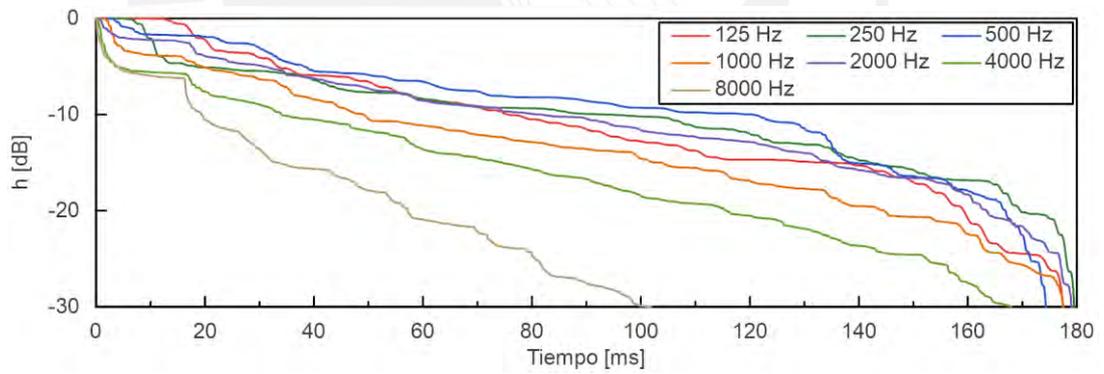


Figura 8.46. Respuesta de impulso integrado en el punto L.

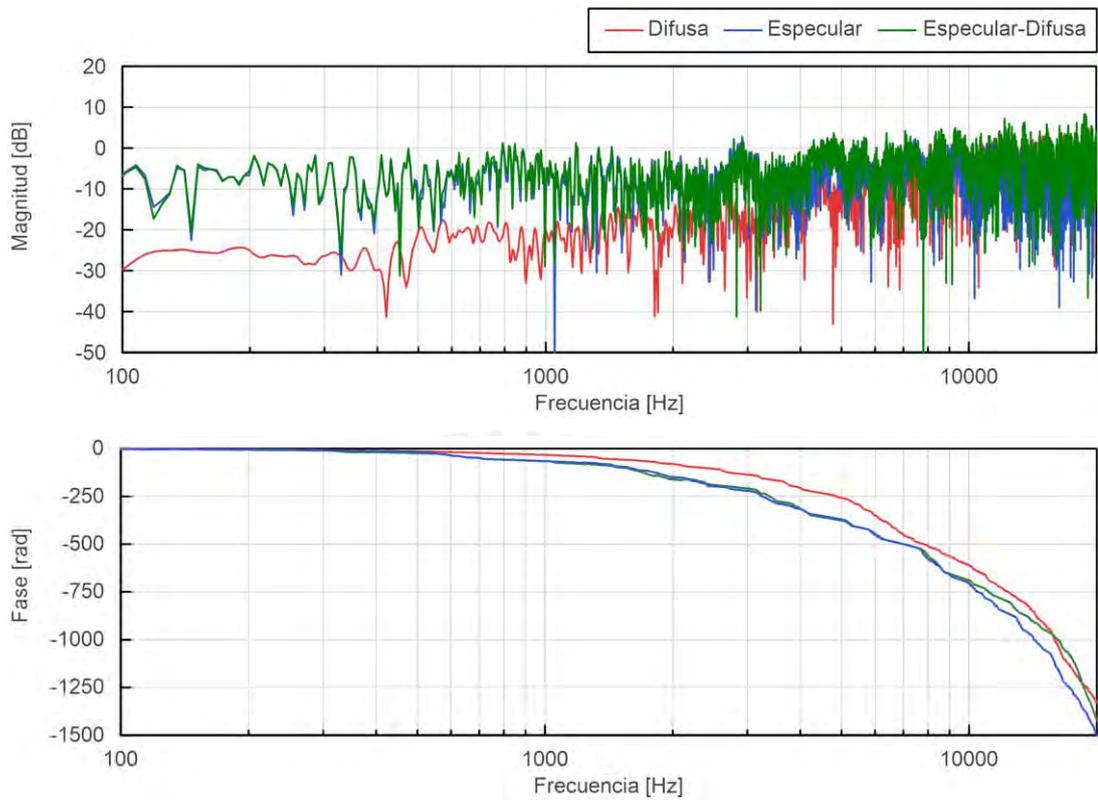


Figura 8.47. Respuesta en frecuencia en el punto L.

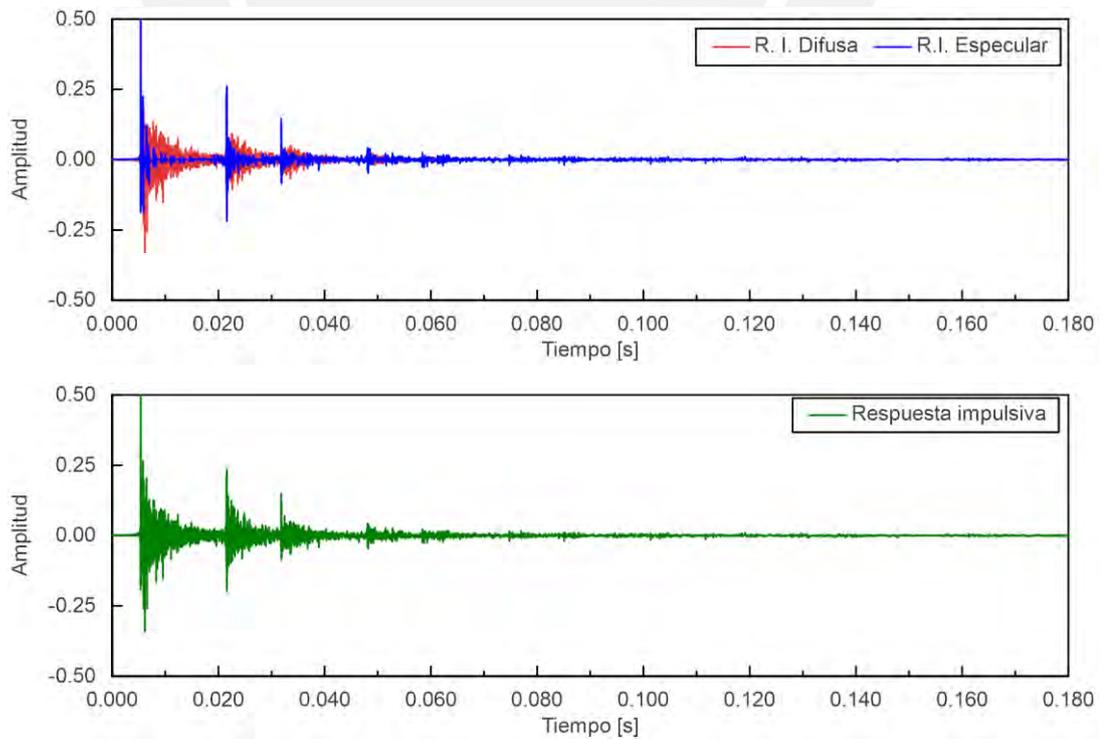


Figura 8.48. Respuesta impulsiva en el punto L.