



Universitat d'Alacant
Universidad de Alicante

Escola Politècnica Superior
Escuela Politécnica Superior



**Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería Técnica de Telecomunicación
Sonido e Imagen**

**ANÁLISIS ACÚSTICO DE UNA CAMPANA
CON YUGO DE MADERA**

Autor:

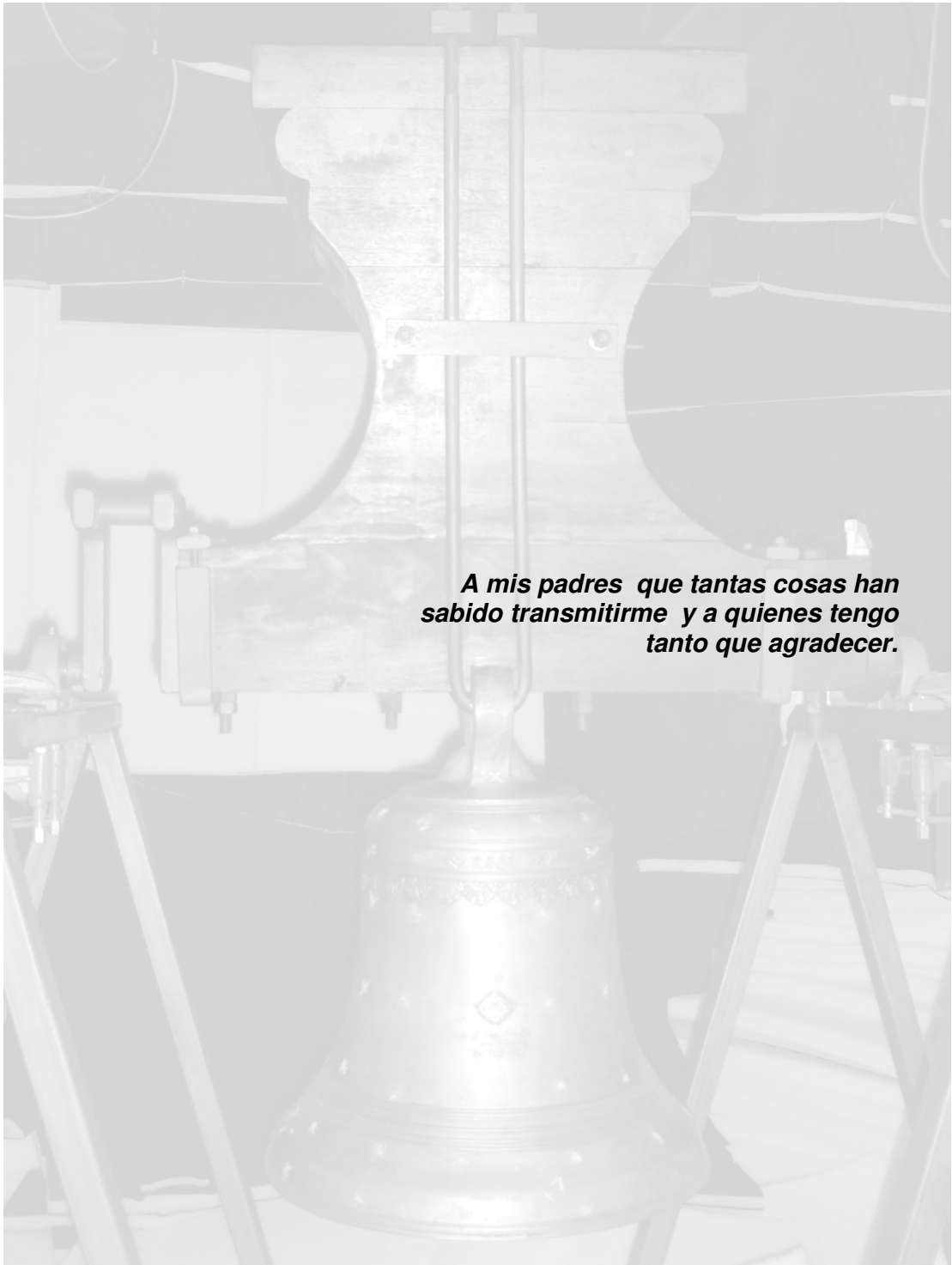
ELISA PÉREZ PIQUERAS

Tutores:

ANTONIO HERNANDEZ PRADOS

SALVADOR IVORRA CHORRO

Octubre, 2006



A mis padres que tantas cosas han sabido transmitirme y a quienes tengo tanto que agradecer.

INDICE GENERAL

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

1.1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.2	MOTIVACIÓN.....	5
1.3	OBJETIVOS.....	5
1.4	FISIOLOGÍA DEL OÍDO.....	9
1.5	EL SONIDO	
	1.5.1. NATURALEZA DEL SONIDO.....	11
	1.52 CUALIDADES DEL SONIDO.....	13
	1.5.3 ESPECTRO DEL SONIDO. FRECUENCIAS DE LA NOTAS.....	13

Capítulo 2: DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DETALLADA DEL CONJUNTO

2.1	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO PLANTEADO PARA SU EVALUACIÓN...18
2.2	DESCRIPCIÓN DE LA MEDICIÓN MEDIANTE DISTANCIÓMETRO LASER. APLICACIÓN A LA DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA COMPLETA.....21

2.3	DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDOS Y APLICACIÓN AL CASO DE LOS ESPESORES. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE MEDIDA DE ESPESORES MEDIANTE COMPÁS.....	23
2.4	PLANOS DE DETALLE: PLANTA, ALZADO, PERFIL Y PERSPECTIVA. ACOTACIONES.....	34
2.4.1	ALZADO.....	35
2.4.2	PERFIL.....	36
2.4.3	PLANTA Y SECCIÓN.....	37
2.4.4	PERSPECTIVA.....	38

Capítulo 3: EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT

3.1	DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO PROPUESTO (GRABACIÓN DIGITAL EN DIVERSOS PUNTOS DE LA CAMPANA DE LA RESPUESTA ACÚSTICA FRENTE A ACCIÓN POR GOLPE DE MARTILLO Y DE BADAJO).....	39
3.2	DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS FFT.....	42
3.2.1	TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER.....	42
3.2.2	OBTENCIÓN DE LOS PARCIALES.....	47
3.2.3	OBTENCIÓN DE LAS NOTAS MUSICALES.....	51
3.2.4	EXCITACIÓN DE LA CAMPANA CON GOLPE DE BADAJO.....	53
3.2.5	EXCITACIÓN DE LA CAMPANA CON GOLPE DE MARTILLO....	60

3.3	COMPARACIÓN CON EL PROGRAMA WAVANAL.....	95
3.3.1	EXCITACIÓN DE LA CAMPANA CON GOLPE DE BADAJO.....	96
3.3.2	EXCITACIÓN DE LA CAMPANA CON GOLPE DE MARTILLO...98	
3.4	CONCLUSIONES.....	101
	ANEXO I: PARCIALES DE LA CAMPANA POR GOLPE DE MARTILLO.....	105
	ANEXO II: MANUAL DEL PROGRAMA WAVANAL.....	117
	ANEXO III: RESULTADOS DEL PROGRAMA WAVANAL.....	131
	BIBLIOGRAFÍA.....	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1: INTRODUCCIÓN

1.1	Geometría de la campana analizada (a) Fotografía de la campana analizada dispuesta en laboratorio para el ensayo. (b) Descripción geométrica mediante técnicas CAD.....	6
1.2	Fotografía de la geometría del asa y el yugo de la campana.....	7
1.3	El oído.....	9
1.4	Rango dinámico del sistema auditivo humano.....	11
1.5	Comparación espectro armónico (a) e inarmónico (b).....	14
1.6	Tabla explicativa con los intervalos y sus relaciones de frecuencia.....	15
1.7	Tabla para la medición de los intervalos.....	16
1.8	Ejemplo de los formantes de un espectro.....	16

Capítulo 2: DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DETALLADA DEL CONJUNTO

2.1	Gráfica con el tiempo de reverberación de la sala acondicionada acústicamente.....	18
2.2	Partes principales de la campana utilizada en este estudio.....	19
2.3	Geometría de la sala de silencio-semianecoica de la universidad de Alicante.....	20
2.4	Esquema del ensayo de la medición de la curvatura con estación topográfica.....	21

2.5	Estación topográfica PENTAX PCS 515.....	22
2.6	Fotografía de la campana con los puntos de medida para la estación topográfica.....	22
2.7	Tabla con los valores de distancia y ángulo, obtenidas con la estación topográfica.....	23
2.8	Espectro de vibraciones acústicas.....	24
2.9	Posicionamiento de palpadores.....	25
2.10	Tren de impulsos con periodo 1/50 segundos ($f = 50\text{Hz}$).....	26
2.11	Ultrasonic Tester BP-5, Steinkamp.....	27
2.12	Digimater Caliper, Mitutoyo.....	27
2.13	Fotografía de la medida con ultrasonidos del espesor del asa de la campana.....	28
2.14	Puntos de medida de espesor con ultrasonidos.....	29
2.15	Tabla con las medidas de espesor con ultrasonidos.....	29
2.16	Compás de interiores diseñado para medir el espesor de la campana.....	30
2.17	Compás de interiores diseñado para medir el espesor de la campana.....	31
2.18	(a) Puntos de medida de espesor para el compás de interiores, (b) Posicionamiento del compás con respecto la campana.....	32
2.19	Tabla con los valores de espesor en las cuatro medidas y la media de todos ellos.....	33

Capítulo 3: EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT

3.1	Esquema de la disposición de la campana y la instrumentación en la sala acondicionada acústicamente.....	40
3.2	Respuesta en frecuencia del micrófono GRAS de tipo 40AF.....	40
3.3	Fotografía de la situación real del micrófono con respecto la campana.....	41
3.4	Relación numérica entre los parciales de SIMPSOM.....	48

3.5	Ejemplo del cálculo de los parciales de Simpson.....	48
3.6	Tabla con los parciales de Simpson.(a) Representación en Nivel de Presión, (b) representación en presión(Pa).....	50
3.7	Tabla de la escala bien temperada con sostenidos y bemoles.....	52
3.8	(a) Fotografía de la situación del badajo dentro de la campana, (b) Esquema de los cuatro cuadrantes en los que se dividió la campana, vista en planta.....	53
3.9	Gráficas de la respuesta en frecuencia de la campana frente a golpe de badajo en el primer (a) y tercer (b) cuadrante en presión normalizada.....	54
3.10	Gráficas de la respuesta en frecuencia de la campana frente a golpe de badajo en el primer (a) y tercer (b) cuadrante, en niveles de presión.....	55
3.11	Tabla de los principales parciales teóricos de la campana frente a golpe de badajo.....	56
3.12	Tabla de los principales parciales de la campana frente a golpe de badajo en el primer y tercer cuadrante, con sus notas musicales.....	56
3.13	Gráficas con la respuesta temporal de la campana por golpe de badajo, en (a) primer cuadrante y (b) tercer cuadrante. Extraídas con el programa SOUND FORGE.....	58
3.14	Sonogramas de la campana por golpe de badajo, en (a) primer cuadrante y (b) segundo cuadrante.....	59
3.15	Esquema de la disposición de la campana y la instrumentación en la sala acondicionada acústicamente.....	60
3.16	Martillo de fibra de nylon utilizado para golpear la campana.....	61
3.17	Ensayo mediante martillo de fibra de nylon. (a) Posición de los puntos en cada cuadrante. (b) División de la campana en cuadrantes.....	61
3.18	POSICIÓN 1: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.....	63
3.19	POSICIÓN 1: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo..	65

3.20	POSICIÓN 1: Tabla con los principales parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.....	65
3.21	POSICIÓN 2: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.....	66
3.22	POSICIÓN 2: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo..	67
3.23	POSICIÓN 2: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.....	68
3.24	Representación en niveles de presión el rango de frecuencias 2600-2900Hz, en los cuatro cuadrantes.....	69
3.25	Sonogramas de las grabaciones captadas por el micrófono. (a) Cuadrante 1, (b) cuadrante 2, (c) cuadrante 3 y (d) cuadrante 4.....	70
3.26	POSICIÓN 3: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.....	71
3.27	POSICIÓN 3: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo..	72
3.28	POSICIÓN 3: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.....	73
3.29	POSICIÓN 4: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.....	74
3.30	Fig. 3.32.- POSICIÓN 4: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo.....	75
3.31	POSICIÓN 4: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.....	76
3.32	POSICIÓN 5: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.....	77
3.33	POSICIÓN 5: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo..	78

3.34	POSICIÓN 5: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.....	79
3.35	POSICIÓN 6: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.....	80
3.36	POSICIÓN 6: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo..	81
3.37	POSICIÓN 6: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.....	82
3.38	POSICIÓN 7: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.....	83
3.39	POSICIÓN 7: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo..	84
3.40	POSICIÓN 7: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.....	85
3.41	POSICIÓN 8: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.....	86
3.42	POSICIÓN 8: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo..	87
3.43	POSICIÓN 8: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.....	88
3.44	POSICIÓN 9: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.....	89
3.45	POSICIÓN 9: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo..	90
3.46	POSICIÓN 9: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.....	91
3.47	POSICIÓN 10: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.....	92

3.48	POSICIÓN 10: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo.....	93
3.49	POSICIÓN 10: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.....	94
3.50	Resultados del programa WAVANAL de la excitación de la campana con badajo. (a) 1º cuadrante y (b) 3º cuadrante.....	97
3.51	Resultados del programa WAVANAL de la excitación con martillo. (a) 1º cuadrante (b) 2º cuadrante, (c) 3º cuadrante y (d) 4º cuadrante.....	100

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Antes de meternos de lleno en el estudio llevado a cabo en este proyecto, hagamos una breve introducción sobre el mundo de las campanas, su historia, su fundición, su sonido... Pero antes de ello definiremos que es una campana como instrumento. La campana es un instrumento musical de percusión en forma de copa invertida, por lo general metálica aunque puede ser de madera, cerámica u otros materiales, que suena cuando se golpea con un badajo o con un martillo. El badajo debe ser accionado (tañido) desde el interior de la campana. También puede golpearse por el extremo inferior externo con un martillo que se maneja, de forma manual o mecánica. Está clasificada dentro de los idiófonos (instrumentos en los que el sonido se produce por la vibración del material del que están hechos) [1].

HISTORIA

Las campanas ya eran conocidas antes del año 2000 a.C. en China, Egipto, la India, Grecia, Roma, etc. Desde los primeros tiempos se emplearon para la comunicación, como objetos rituales y como amuletos mágicos protectores. Su uso en las iglesias se extendió en Europa durante los siglos VI al XI.

A Europa llegaron a través de Bizancio y las primeras noticias sobre ellas proceden de la provincia italiana de Campania, de ahí su nombre. La primera aparición en los templos cristianos de la Europa occidental data del siglo IX.

En el siglo XVII, Jacob Van Eijck, el *carillonneur* holandés, descubrió que los parciales¹ (frecuencias excitadas) de una campana podían ser excitados individualmente.

Los hermanos Francois y Pieter Hemony utilizaron barras afinadas para medir los parciales de una campana durante su afinación. Muchas de las campanas más afinadas de los países bajos de hoy en día fueron afinadas por los hermanos Hemony [1].

Debido a la importancia estratégica de sus metales constitutivos (bronce), las campanas pagaron un precio muy caro en los tiempos de guerra. La Segunda Guerra Mundial no fue ninguna excepción. El ejército alemán quitó muchas campanas históricas de los campanarios en los países bajos, Francia, Polonia y en otros países, incluso a la misma Alemania. De las que no fueron destruidas después de la guerra, muchas fueron estudiadas en laboratorios. Los resultados de muchos de estos estudios fueron divulgados por E. W. Van Heuven [2]. La publicación de sus tesis en 1949 tuvo un interés renovado en la acústica de campanas, especialmente en Alemania y los Países Bajos. Las medidas acústicas se hicieron más precisas usando equipos electrónicos desarrollados en los años 50. Las fundiciones en Inglaterra y en los países bajos fueron abrumadas con órdenes de sustituir las campanas destruidas durante la segunda Guerra Mundial, y la fundición de la campana prosperó.

Aunque en teoría es posible moldear una campana para que suene con los parciales armónicos deseados, no es práctico. Cada uno de ellos tiene su propio patrón de vibración. El incremento del grosor y de la elasticidad del material del que están hechas las campanas, provoca el aumento de la frecuencia de vibración. Mientras que los incrementos del diámetro y de la densidad, la disminuyen. Haciendo menos gruesa la campana en el lugar particular cambiará la frecuencia de los parciales en cantidades variantes. Por lo tanto, el afinador de la

1. En el apartado 1.5.3 se verá la definición de parcial.

campana debe saber exactamente las frecuencias que cambiarán con la disminución del espesor en cada localización.

LA FUNDICIÓN DE LAS CAMPANAS

Las buenas campanas están hechas de una aleación de bronce que suele constar de cuatro partes de cobre y una de estaño. Otros componentes tienden a producir un sonido de inferior calidad. El tono de la campana depende también de sus proporciones altura, anchura, grosor y forma. Es una complicada mezcla de armónicos, cada uno producido por la vibración de diferentes partes del instrumento. Si la afinación de esas partes es inexacta se producen disonancias cuando la campana se toca en conjunto.

Para fundir una campana se construye un núcleo de barro según el tamaño y forma de su interior. Se levanta por encima un armazón de barro y otros materiales. La superficie interior de éste se corresponde con el exterior de la campana proyectada. Entonces se vierte el metal fundido (colada) en el espacio entre el núcleo y la armazón. Cuando se ha enfriado se abre el molde y el exterior se alisa y pule. La superficie interior se lima para conseguir el grosor necesario para la correcta producción de los parciales armónicos.

EL SONIDO DE LA CAMPANA

Las campanas más antiguas eran repicadas por separado, para llamar a la gente para rezar, para anunciar un gran evento, para avisar de inundación o fuego, del enemigo, etc. Más adelante, los sistemas de campanas afinadas fueron colgados en torres para anunciar la hora del día o para tocar melodías. Durante los siglos XIV y XV había dos técnicas especiales para hacer sonar las campanas, desarrolladas en Flandes e Inglaterra.

Los flamencos desarrollaron un mecanismo de teclado remoto que permitió a los músicos tocar los sistemas de campanas, o carillones (como fueron llamados). La clave de un carillón consistió en unas barras de madera, tocadas con las manos o

los pies, estos se unían con cuerdas a las barras para hacer funcionar las chapaletas. Esta técnica sigue practicándose hoy en día.

Al mismo tiempo, los campaneros ingleses perfeccionaron los sistemas para “cambiar el sonido” de las campanas. La estrategia básica es hacer sonar un sistema o repique de campana en todas las posibles secuencias. (Hay 24 maneras posibles de hacer sonar 4 campanas, pero con 8 campanas el número se eleva a 40320, y con 12 campanas a 479 millones de secuencias posibles). Para controlar el tipo de sonido, y así hacer posible sonar las campanas de diversos tamaños en una secuencia, las campanas se deben montar para que puedan girar un círculo completo (para que volteen). La mayoría de las campanas de iglesia inglesas se cuelgan de esta manera [3].

EL FUTURO

Los avances en los ordenadores digitales han hecho posible, por primera vez desde hace cientos de años, la investigación sobre la acústica de campanas y sus modos de vibración. En el futuro se pueden esperar otros refinamientos del análisis en elementos finitos y de otros métodos numéricos.

Igualmente importante para los investigadores en campanas ha sido el desarrollo de los analizadores de espectro en tiempo real. Estos instrumentos permiten que los acústicos estudien las características espectrales, así como el comportamiento modal del instrumento.

Es irónico que estos avances tan significativos en técnicas teóricas y experimentales vengan en un momento en que se está haciendo relativamente poca investigación sobre la acústica de la campana. Es inverosímil que se realice una gran investigación en un futuro próximo, pues el mercado para la nueva campana seguirá siendo probablemente pequeño. Aunque el interés en la investigación sobre la acústica de la campana continuará mientras las campanas mantengan su fascinación.

1.2 MOTIVACIÓN

Cuando me planteé empezar el proyecto fin de carrera, lo que tenía seguro es que lo quería hacer en la rama de acústica, y al hablar con los tutores que proponían este proyecto e informarme de lo que íbamos a realizar, me pareció bastante interesante, ya que la campana es un cuerpo de gran complejidad acústica.

Además, siempre está la motivación de que no hay estudios españoles acerca del análisis acústico de la campana, y en concreto de campana con yugo de madera. Y por supuesto, aprovechar la oportunidad de trabajar en un proyecto amplio, del que este estudio es una de las partes y en el que hay varias personas involucradas en él, tanto estudiantes como profesores.

1.3 OBJETIVOS

Gracias a la colaboración de la Generalitat Valenciana se ha instalado una campana de bronce con yugo de madera en la sala acondicionada acústicamente del laboratorio de acústica de la Universidad de Alicante con el fin de evaluar las características vibro-acústicas del conjunto.

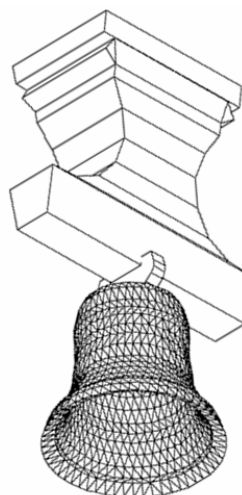
El estudio se ve restringido a las campanas de perfil “occidental” típico, que son golpeadas generalmente por una barra de hierro (badajo), en un punto en el interior cerca de la boca, o por un martillo de hierro en un punto equivalente en el exterior. Dentro de las campanas de perfil occidental están las campanas tradicionales españolas que tienen dos partes fundamentales: el bronce y el yugo. El yugo tiene como la misión fundamental de actuar como eje de giro de la campana equilibrando el conjunto. Estos yugos son muy diferentes de los utilizados en otros sistemas de volteo de campanas como pueden ser el centroeuropeo o el inglés, podríamos denominarlos como yugos superpesados. Tradicionalmente estaban contruidos de madera, si bien en la década de los sesenta del pasado siglo comenzaron a sustituirse por yugos metálicos acodados. Esta sustitución originó una modificación importantísima en el instrumento musical, y por tanto en su sonoridad, ya que se modificó uno de sus elementos fundamentales.

Es importante recalcar que prácticamente en ningún lugar del mundo, salvo los de influencia española, se utilizan yugos superpesados de madera en los que pueda influir de modo importante esta parte del instrumento musical.

En la siguiente figura se muestra una fotografía de la campana utilizada para este proyecto y su esquema tridimensional.



(a)



(b)

Fig. 1.1 – Geometría de la campana analizada (a) Fotografía de la campana analizada dispuesta en laboratorio para el ensayo. (b) Descripción geométrica mediante técnicas CAD.

En los años 90 del pasado siglo, impulsado por la Generalitat Valenciana, se inició la recuperación de los yugos tradicionales marcándose las pautas para rehabilitación y recuperación de campanas, toques tradicionales y campanarios en la Comunidad Valenciana e incluso sirviendo de modelo para los trabajos realizados en otras Comunidades.

A pesar de que los toques tradicionales en España no consisten en formación de melodías sino en la interpretación rítmica de sonidos de campanas más o menos afinadas, puede percibirse un cambio notable en la sonoridad de la campana tras la sustitución del yugo metálico frente a uno de madera y viceversa.

Este proyecto se ha centrado en el estudio de la respuesta en frecuencia de la campana bajo excitación mecánica, recogiendo los datos mediante micrófonos. No es un análisis completo de la campana, sino una de las partes de un proyecto más extenso que abarcará además del análisis acústico, el modal y el de elementos finitos. De esta manera se pretende definir la estructura acústica de la campana, teniendo en cuenta que por la falta de simetría, introducida por el yugo y el asa, las percepciones acústicas pueden variar según sus cuadrantes. En la figura 1.2 puede verse la geometría que presentan el yugo y el asa con respecto a la campana



Fig. 1.2 – Fotografía de la geometría del asa y el yugo de la campana.

Otro objetivo que nos proponemos en este proyecto, es el de contrastar nuestros resultados con los que se obtienen a través del software Wavanal [4]. Este programa es un analizador de forma de onda de campana, que proporciona las representaciones gráficas de los sonidos registrados, la identificación de las frecuencias de los parciales, y la síntesis de sonidos por medio de una lista de parciales. Al ser un software de distribución gratuita presenta ciertas incertidumbres con respecto a la rigurosidad de sus resultados, por ello pretendemos estudiar su funcionamiento.

Ahora que ya hemos planteado los objetivos que se pretenden alcanzar con la elaboración de este proyecto, vamos a explicar los pasos con los que lo hemos llevado a cabo.

En primer lugar hemos estudiado el comportamiento de la campana por medio de los artículos y libros que se indican en la bibliografía, para ver hasta donde llegan los estudios realizados y a la vez recoger información para la elaboración del proyecto.

Se ha estudiado la fisiología del oído, para entender como reacciona nuestro oído a un sonido, además de profundizar en el concepto de sonido en el dominio de la frecuencia. También hemos realizado el cálculo de las notas musicales a partir de la escala bien temperada, para poder hallar las notas correspondientes a los parciales.

En segundo lugar se ha llevado a cabo la descripción geométrica del conjunto campana-yugo, mediante la medición con ultrasonidos, distanciómetro láser, etc. Con los resultados obtenidos se han elaborado los planos de detalle del conjunto campana-yugo, mediante técnicas CAD.

En tercer lugar se ha capturado mediante micrófono la respuesta de la campana frente a golpe de badajo y de martillo de fibra de nylon. Las grabaciones se han realizado en la sala de silencio-semianecoica del laboratorio de Acústica de la Universidad de Alicante. Posteriormente se ha realizado el estudio de la respuesta en frecuencia de las grabaciones recogidas. Dicho estudio contendrá el espectro en banda ancha, en banda estrecha, los sonogramas y las respuestas temporales.

En cuarto lugar se ha comprobado la validez del software Wavanal, contrastando sus resultados con los obtenidos mediante nuestro análisis.

Al final del proyecto se han añadido tres anexos que contienen toda la información detallada de los resultados obtenidos, tanto con nuestro estudio como con el que realiza el Wavanal y un breve manual de dicho programa.

Al final de cada capítulo se mostrarán sus referencias, y por último se indicará la bibliografía y las fuentes de información.

1.4 FISIOLÓGÍA DEL OÍDO

El oído humano consta de tres partes principales; el oído externo, el oído medio y el oído interno. A estas tres partes, que realizan respectivamente un procesamiento acústico, mecánico y eléctrico de la señal sonora se agrega el posterior procesamiento neurológico con progresivos niveles de complejidad hasta llegar a la corteza cerebral.

El oído externo, constituido por el pabellón y el canal auditivo, recoge las ondas sonoras transportadas por el aire que hacen vibrar el tímpano, que a su vez forma el nexo de unión con el oído medio.

El oído medio actúa como un acoplador de impedancias y tiene tres “huesecillos” (martillo, yunque y estribo) que funcionan como un juego de palancas.

Y el oído interno, o laberinto, se encuentra en el interior del hueso temporal que contiene los órganos auditivos y del equilibrio [1].

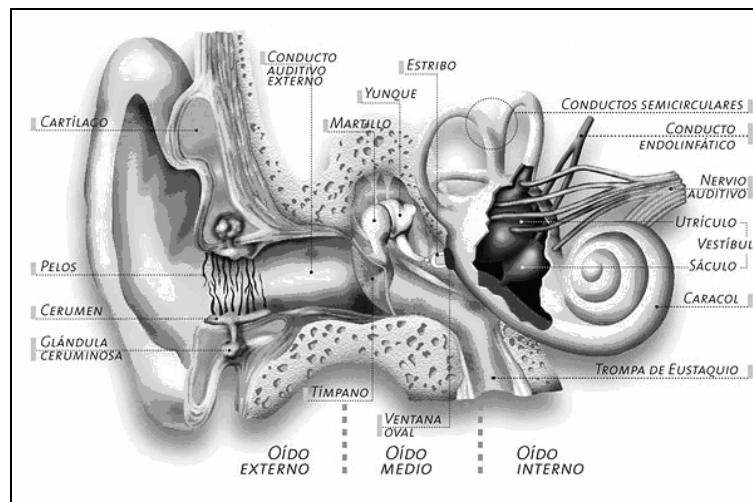


Fig. 1.3 – El oído

Las ondas sonoras (cambios en la presión del aire) son transmitidas a través del canal auditivo externo hacia el tímpano, haciéndolo vibrar. Estas vibraciones se comunican al oído medio mediante la cadena de huesecillos y, a través de la ventana oval se transmite al líquido del oído interno (endolinfa). La cóclea o caracol transforma las vibraciones provenientes del oído medio en señales neuroeléctricas dirigidas al cerebro. La característica más sobresaliente de esta admirable pieza de ingeniería biológica es su capacidad de realizar una descomposición frecuencial del sonido, codificándolo multiparamétricamente de acuerdo a su espectro.

El ser humano es capaz de detectar únicamente aquellos sonidos que se encuentran dentro de un determinado rango de amplitudes y frecuencias. En este sentido, se puede establecer una analogía entre el aparato auditivo y un sistema electrónico de audio, en base al concepto convencional del rango dinámico. Se define el rango dinámico del oído como la relación entre la máxima potencia sonora que éste puede tolerar y la mínima potencia necesaria para detectar un sonido. Asimismo, el rango de frecuencias que percibe el sistema auditivo va desde los 20 Hz hasta los 20 kHz, aun cuando este rango puede variar de un sujeto a otro o disminuir en función de la edad del sujeto, de trastornos auditivos o de una pérdida de sensibilidad debida a la exposición a sonidos de elevada intensidad. Ahora bien, la sensibilidad del sistema auditivo no es independiente de la frecuencia; por el contrario, dos sonidos de igual presión sonora pueden provocar distintas sensaciones de intensidad o "sonoridad", dependiendo de su contenido espectral.

El extremo superior del rango dinámico está dado por el umbral de dolor, el cual define las presiones sonoras máximas que puede soportar el oído. Más abajo de este nivel, se encuentra el límite de riesgo de daños, el cual representa un umbral de presión sonora que no debe sobrepasarse por más de un cierto período de tiempo (ocho horas diarias por día laboral), o de lo contrario puede producirse un pérdida de sensibilidad permanente. El extremo inferior, denominado umbral de audibilidad (UA), representa la sensibilidad del aparato auditivo, es decir, el valor

mínimo de presión sonora que debe tener un tono para que éste sea perceptible. Esta sensibilidad depende de la frecuencia de la señal sonora; a modo de ejemplo (ver figura 1.4), un tono de 1 kHz con un nivel de presión sonora de 20 dB será audible (está por encima de la curva), mientras que un tono de 50 Hz e igual nivel será inaudible (está por debajo de la curva).

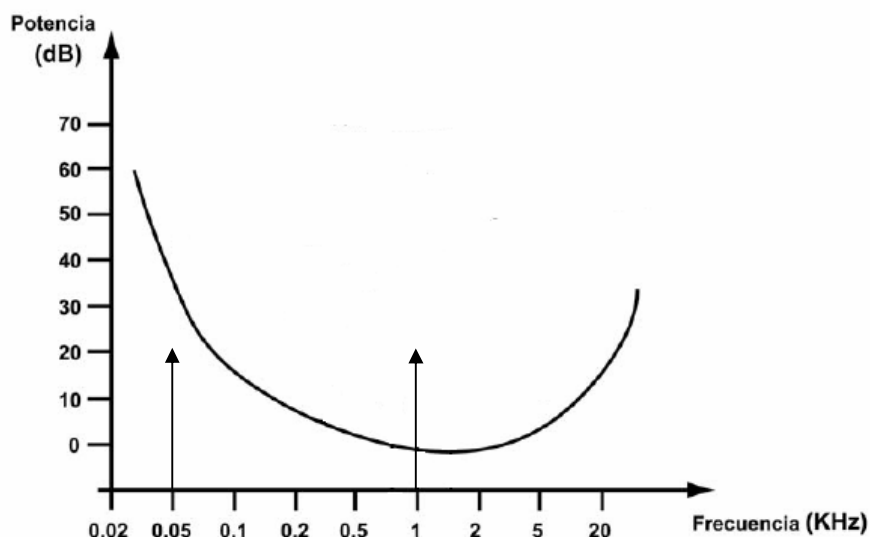


Fig. 1.4 – Rango dinámico del sistema auditivo humano

1.5 EL SONIDO

1.5.1 NATURALEZA DEL SONIDO

El sonido consiste en una vibración del aire que se propaga en forma de ondas de presión. Cuando aparece una perturbación (vibración de un objeto) se producen las variaciones de la presión P del aire respecto a la presión de equilibrio (o presión atmosférica), P_0 . Podemos pensar que el sonido es consecuencia de la aparición de una presión incremental que varía en el tiempo:

$$\text{Presión incremental} = P - P_0 \quad (1.1)$$

Normalmente la presión incremental es mucho menor en magnitud que la presión atmosférica, siendo ésta es del orden de 10^5 Pa (N/m^2).

La presión incremental correspondiente a sonidos audibles está en el rango $[20 \times 10^{-6}, 20]$ Pa, por lo que es mucho menor que la presión atmosférica.

Debido a que el rango de presión sonora es extraordinariamente amplio, es conveniente utilizar una escala logarítmica para expresar sus valores. Así, se define el nivel de presión sonora (NPS) como:

$$NPS = 20 \log_{10} \frac{P_{ef}}{P_{ref}} \text{ (dB)} \quad (1.2)$$

Donde P_{ef} es el valor eficaz de la presión sonora y P_{ref} es la presión de referencia, que vale 20×10^{-6} Pa. Se ha elegido este valor porque coincide con el umbral de audición normal para 1 kHz, que implica que un sonido se puede percibir cuando $NPS > 0$ dB [5].

Un caso muy importante se da cuando las perturbaciones se repiten cada cierto tiempo T , es decir, con una frecuencia $f = 1/T$. En este caso, auditivamente se percibe la sensación de un tono. La perturbación periódica más simple es la senoidal:

$$p(t) = P_{m\acute{a}x} \text{sen}(2\pi f t) . \quad (1.3)$$

El sonido resultante se denomina tono puro. Todo sonido puede considerarse como formado por la superposición de tonos puros de diversas frecuencias.

Cuando un sonido es periódico de frecuencia f , las frecuencias de los tonos puros que lo constituyen son múltiplos de f , y se denominan sonidos armónicos. Este importante resultado se conoce como *Teorema de Fourier*, y puede expresarse matemáticamente como:

$$p(t) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \text{sen} (2\pi n f t + \varphi_n) \quad (1.4)$$

donde P_n es la amplitud y φ_n es la fase de cada armónico [5].

1.5.2 CUALIDADES DEL SONIDO

Atendiendo a las cualidades del sonido, éste puede describirse especificando tres características: el tono, la intensidad y el timbre. Éstas se corresponden con las características físicas: frecuencia, amplitud y composición armónica o forma de onda (parciales).

La amplitud de una onda de sonido es el desplazamiento máximo respecto a la posición de equilibrio. Cuanto mayor es la amplitud de la onda, más intensamente golpean las moléculas el tímpano y más fuerte es el sonido percibido. Por tanto, la intensidad permite hablar de sonidos fuertes o débiles. El timbre está definido como la “calidad del sonido, que diferencia a los del mismo tono y depende de la forma y naturaleza de los elementos que entran en vibración” [6]. Por ejemplo, si se toca una misma nota en un violín, un piano y un diapasón, con la misma intensidad en los tres casos, los sonidos son idénticos en frecuencia y amplitud, pero muy diferentes en timbre. Y la definición de tono y parciales se verá a continuación.

1.5.3 ESPECTRO DEL SONIDO

A nosotros lo que nos interesa es poder caracterizar un sonido, entonces tenemos que estudiar su respuesta en el dominio de la frecuencia (su espectro). Para entender el concepto de frecuencia como tono hay que saber que un tono de un instrumento musical no es una frecuencia única, sino que es un conjunto de frecuencias múltiplos de un tono fundamental (f_0).

Estas frecuencias reciben el nombre de parciales *armónicas*, es decir $2f_0$, $3f_0$, $4f_0$, etc. Cuando oímos un tono percibimos todas las frecuencias con las que está caracterizado.

Si un espectro solo tiene parciales armónicos se dice que es un espectro armónico, y si no, se dice que es inarmónico.

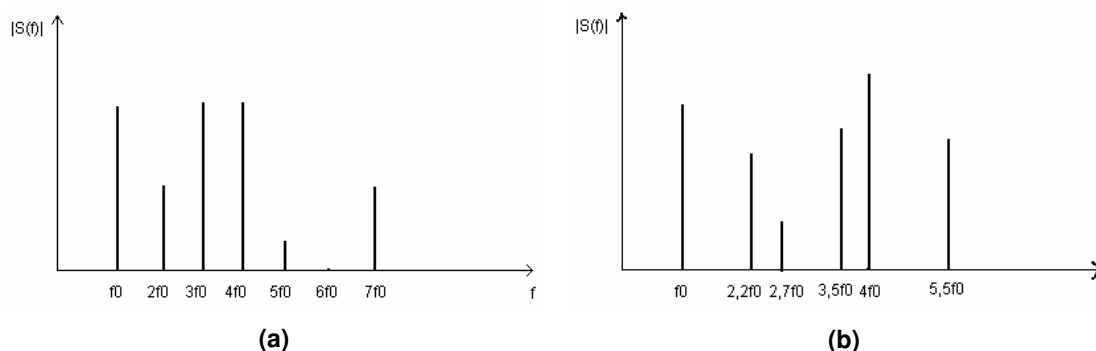


Fig. 1.5 - Comparación espectro armónico (a) e inarmónico (b)

La frecuencia fundamental es el factor físico que más influye en la percepción de la altura de un sonido. La percepción de la altura es logarítmica, así asignamos la misma nota a frecuencias que son duplos de la otra. Este hecho hace que en la música las alturas se organicen por OCTAVAS, que es como se denomina a la distancia entre dos notas del mismo nombre cuyas frecuencias son el doble una de la otra. Para distinguir frecuencias distintas de una misma nota se les acompaña de un subíndice que indica la octava a la que pertenece. Así, DO_3 indica 'el DO de la tercera octava'. La frecuencia del LA_4 , es el doble de la del LA_3 y la de esta última es el doble de la del LA_2 , pero percibimos la misma distancia en altura entre ellas.

En la música occidental una octava se divide en 12 notas (semitonos) y ese es el número de notas que hay desde LA_2 a LA_3 . Mientras que en términos de frecuencias desde LA_2 a LA_3 hay 220Hz y desde LA_3 a LA_4 hay 440Hz. Mientras que un semitono es cada una de las 12 notas en las que se divide una octava, el tono equivale a un intervalo en altura de dos semitonos.

Una octava tiene 12 semitonos pero sólo hay 7 nombres de notas distintos (DO, RE, MI, FA, SOL, LA, SI). La razón es porque entre algunas de estas notas consecutivas hay un semitono, mientras que en el resto de los casos hay un tono completo. Para ello aparecen las alteraciones: SOSTENIDO (#) y BEMOL (b).

Las distancias entre notas reciben el nombre de intervalos. Si se miden en altura, se hace mediante el número de semitonos que hay de una a otra. Si se miden en frecuencia, se definen como la fracción entre las frecuencias de la nota aguda y la grave que se están comparando.

Al medir en intervalos el nombre de dicho intervalo indica el orden de la nota respecto a la más baja de las dos notas comparadas. La distancia en semitonos indica el número de semitonos que hay que subir o bajar la altura para ir de una nota a la otra. La relación de frecuencias expresa la proporción existente entre las frecuencias de la nota alta y la de la baja. Para comprender estos términos se muestra la tabla de la figura 1.6, en la que se pueden comparar las distancias entre semitonos con su relación de frecuencias, el nombre del intervalo al que pertenecen y a modo de ejemplo dos notas que se encuentran en dichos intervalos, partiendo de una nota DO.

nombre del intervalo	distancia en semitonos	relación de frecs.	ejemplo notas
segunda	2	9 / 8	DO – RE
tercera	4	5 / 4	DO – MI
cuarta	5	4 / 3	DO – FA
quinta	7	3 / 2	DO – SOL
sexta	9	5 / 3	DO – LA
séptima	11	15 / 8	DO – SI
octava	12	2 / 1	DO _N – DO _{N+1}
tercera menor	3	6 / 5	MI – SOL
sexta menor	8	8 / 5	MI _N – DO _{N+1}

Fig. 1.6 – Tabla explicativa con los intervalos y sus relaciones de frecuencia

Y si medimos en frecuencia, mientras la altura crece en progresión aritmética cuya razón es + 1 semitono, la frecuencia lo hace en progresión geométrica con una razón de $2^{1/12}$ (=1.059463). Por otro lado, para tener más precisión en la localización de microtonos, se definen las centésimas como la división de la

octava en 1200 alturas equidistantes. Para calcular cuanto aumenta la frecuencia de una nota cuando se aumenta en una centésima, hay que multiplicar la altura por $2^{1/1200}$ (=1.000578). En la figura 1.7 se esquematiza la medición de los intervalos [7].

Intervalos de alturas:	Correspondientes variaciones de frecuencias:
<ul style="list-style-type: none"> • Semitono: Octava / 12 	<ul style="list-style-type: none"> • Altura +1 semitono \Rightarrow frecuencia $\times \sqrt[12]{2}$ (=1,05946) • Altura -1 semitono \Rightarrow frecuencia $/ \sqrt[12]{2}$
<ul style="list-style-type: none"> • Tono: dos semitonos 	<ul style="list-style-type: none"> • Altura +1 tono \Rightarrow frecuencia $\times \sqrt[6]{2}$ (= 1,12246) • Altura -1 tono \Rightarrow frecuencia $/ \sqrt[6]{2}$
<ul style="list-style-type: none"> • Centésima: octava / 1200 	<ul style="list-style-type: none"> • Altura +1 cent \Rightarrow frecuencia $\times \sqrt[1200]{2}$ (= 1,000578) • Altura -1 cent \Rightarrow frecuencia $/ \sqrt[1200]{2}$

Fig. 1.7 – Tabla para la medición de los intervalos

Existe otra categoría de análisis espectral a parte de éste, el análisis de formantes. Los formantes son las zonas del espectro en las que las frecuencias tienen mayor amplitud. Son los principales responsables de la caracterización del timbre. Todas las frecuencias de los formantes se sitúan por encima de la frecuencia fundamental del sonido producido. Por lo que el análisis de formantes pretende la estimación de la forma global de la envolvente de amplitudes del espectro. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de formantes.

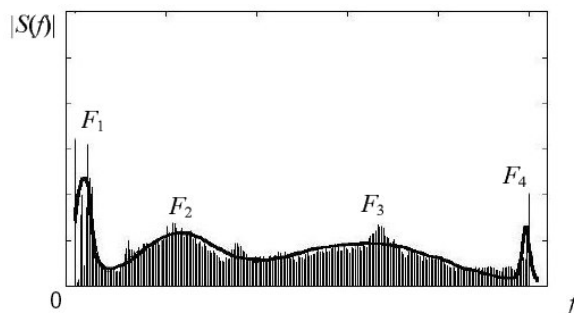


Fig. 1.8 - Ejemplo de los formantes de un espectro

REFERENCIAS

- [1] Enciclopedia Microsoft Encarta 2005.
- [2] E. W. Van Heuven. *Acoustical Measurements on Church Bells and Carillons*, (1949).
- [3] Thomas D. Rossing, "*Acoustics of bells*". Northern Illinois University.
- [4] Software Wavanal. Para más información visitar la página Web:
<http://www.hibberts.co.uk>.
- [5] Federico Miyara, "CONTROL DE RUIDO", capítulos 1 y 2 (1999)
- [6] Real Academia Española, diccionario de la lengua española. Consultar en:
<http://www.rae.es>.
- [7] Jose Manuel Iñesta Quereda, Apuntes de la signatura Síntesis Digital de Sonido (2005-2006). Área de conocimiento Lenguaje y Sistemas Informáticos.

CAPÍTULO 2:

DESCRIPCIÓN GEOMÉTRICA DETALLADA DEL CONJUNTO

2.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO PLANTEADO PARA SU EVALUACIÓN

Con el fin de evitar la influencia de las condiciones ambientales en el registro del sonido emitido por la campana en estudio, las grabaciones se han realizado en una sala acondicionada acústicamente que ha permitido, bajo condiciones de laboratorio, registrar el sonido captado por el micrófono. Dicha sala esta recubierta totalmente por capas de napa de poliéster, que otorga a la sala un tiempo de reverberación de 0.053 segundos. En la siguiente gráfica se puede observar en las barras grises oscuro el tiempo de reverberación de la sala sin estar acondicionada, y en las barras grises claro el comportamiento de la sala después de acondicionarla acústicamente.

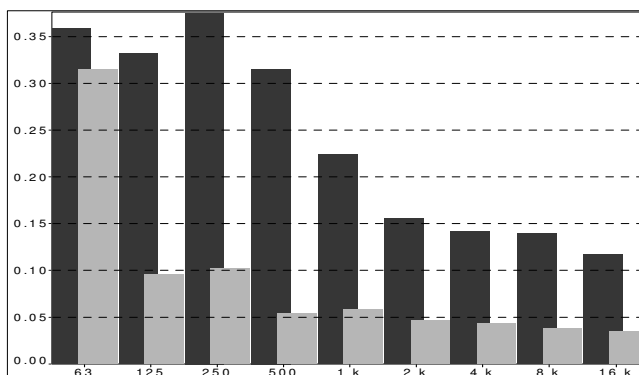


Fig. 2. 1 – Gráfica con el tiempo de reverberación de la sala acondicionada acústicamente

La campana bajo estudio, fue fundida en 2004 y posee el yugo de madera tradicional de la zona Levantina. El diámetro de boca del bronce es de 56 cm y su altura es de 54 cm. El peso total del bronce es de 110 kp. La altura total del conjunto yugo-campana es de 136,5 cm; el yugo posee sección variable con el fin de disponer de la mayor masa en el punto más alejado del eje de giro tratando de equilibrar la campana sin necesidad de construir yugos de grandes dimensiones. El peso aproximado del yugo es de 167 kp.

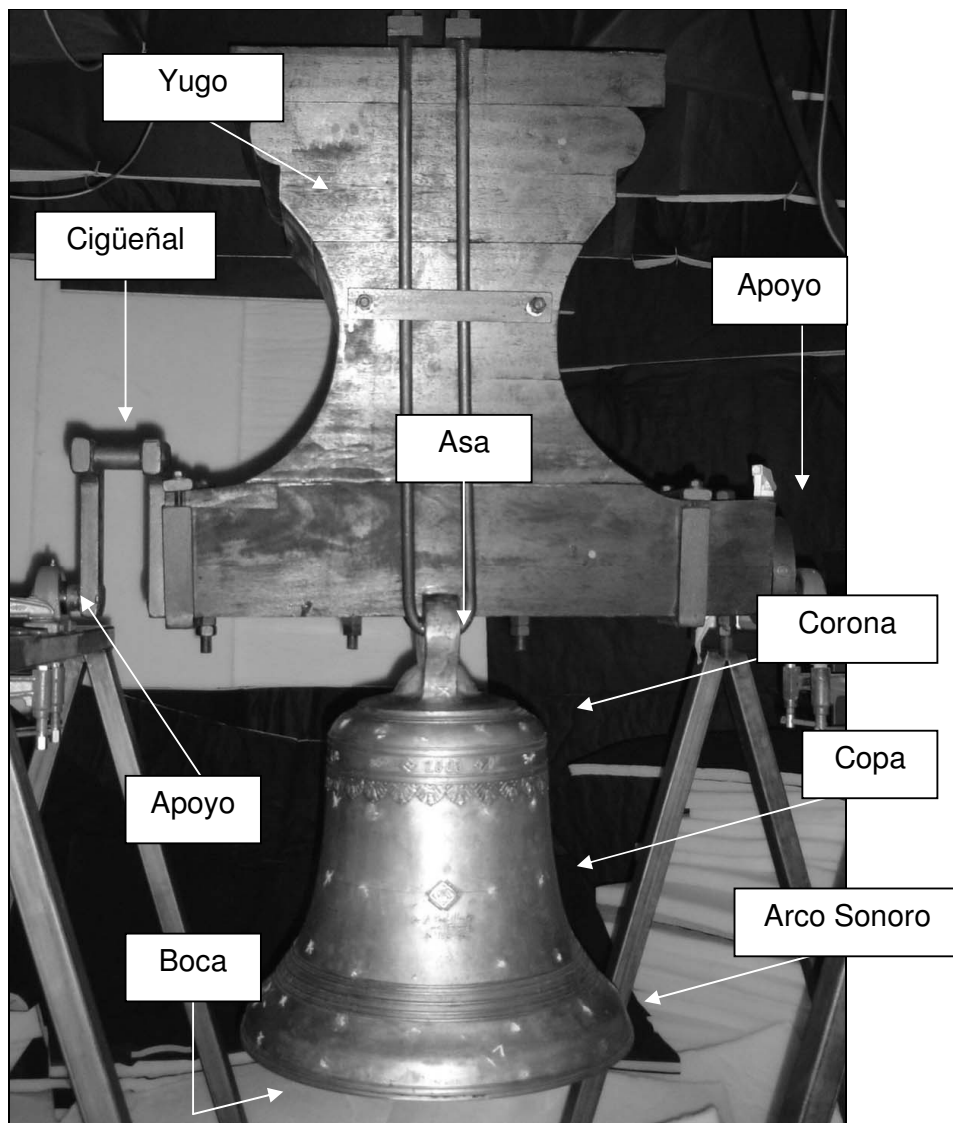


Fig.2.2– Partes principales de la campana utilizada en este estudio.

La sala se silencio-semianecoica del laboratorio de Acústica de la Universidad de Alicante en donde se llevó a cabo toda la experimentación con la campana, presenta la siguiente geometría:

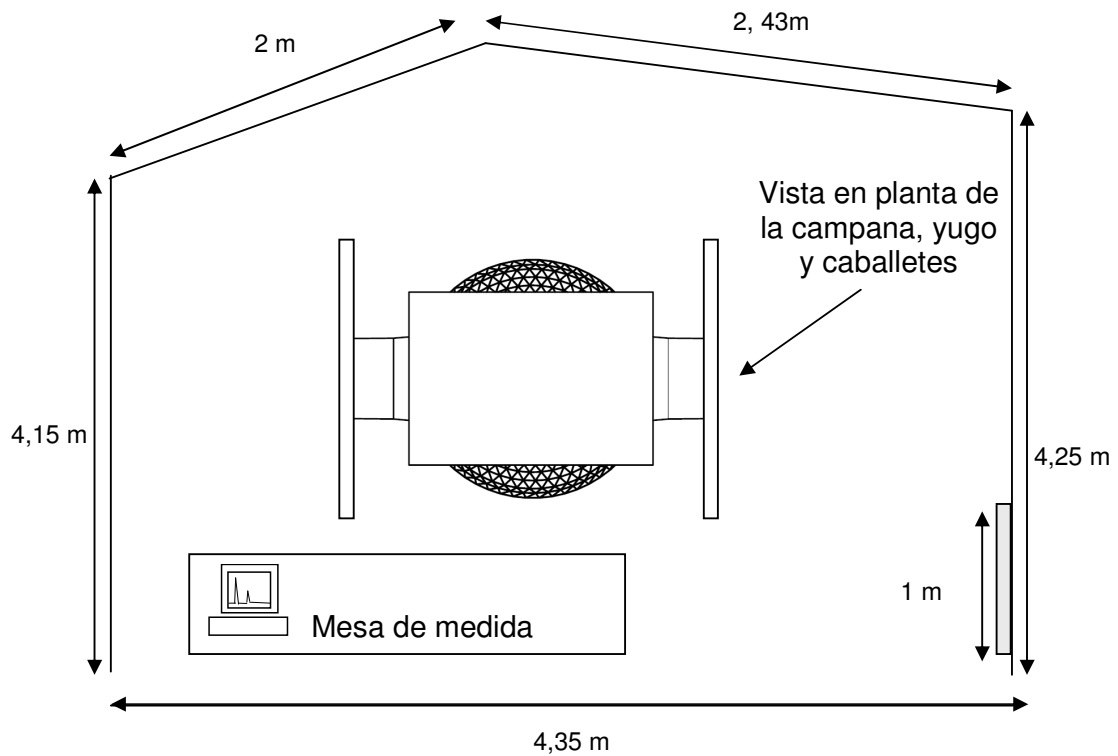


Fig. 2.3 – Geometría de la sala de silencio-semianecoica de la universidad de Alicante

En la figura superior se puede observar la geometría de la sala, dónde esta ubicada la campana, la posición del equipo de medida y la situación de la puerta de acceso.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LA MEDICIÓN MEDIANTE ESTACIÓN TOPOGRÁFICA. APLICACIÓN A LA DESCRIPCIÓN DE LA GEOMETRÍA COMPLETA.

En este apartado se explica cómo se ha llevado a cabo la medida de la curvatura de la campana. Para ello se decidió utilizar una estación topográfica dotada de distanciómetro láser.

La medición de distancias por láser se realiza siguiendo el principio de medición de fases de la luz pulsada. Al ordenar la medición, el diodo láser emite pulsos de luz con unas características (una fase) constantes. El reflejo sobre el objetivo (visualizado por un punto rojo) modifica la fase de la luz pulsada. La diferencia de fase es proporcional a la distancia entre el instrumento y el objetivo, de este modo el medidor calcula la distancia y el ángulo.

El procedimiento de medida que se realiza para la medición de la curvatura de la campana es el siguiente: primero se sitúa el distanciómetro en frente de la campana, a una distancia aproximada de un metro, en la figura 2.4 se puede observar la disposición de la estación topográfica con respecto a la campana.

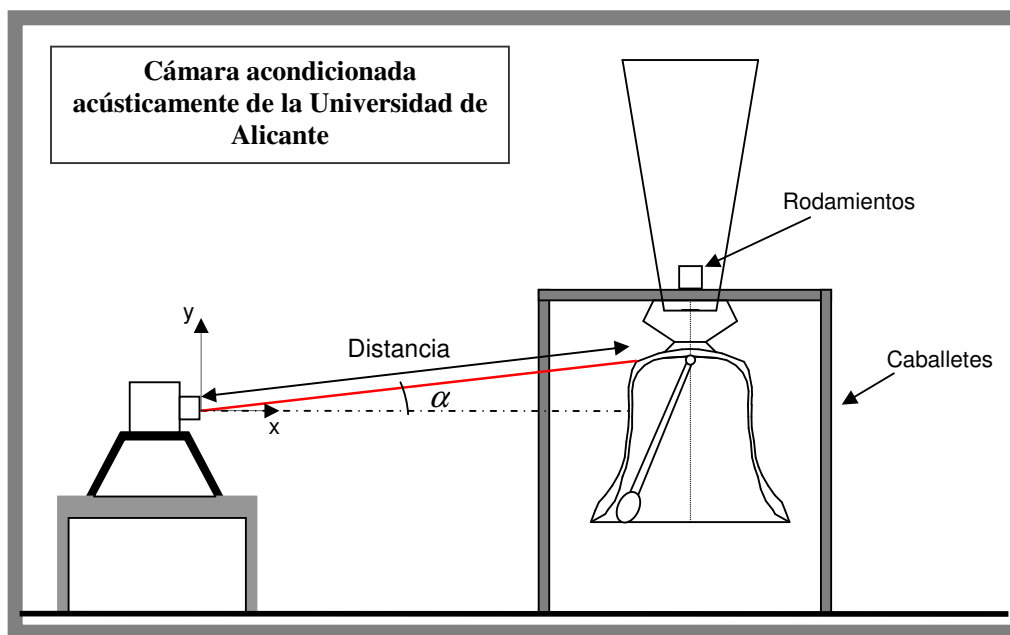


Fig. 2.4– Esquema del ensayo de la medición de la curvatura con estación topográfica

La estación topográfica utilizada tiene distanciometro láser, y es capaz de realizar medidas de ángulos horizontales y verticales. Con este procedimiento se obtienen precisiones milimétricas. La estación es de la marca PENTAX, modelo PCS 515. En la figura 2.5 se muestra una fotografía de ella.



Fig. 2.5– Estación topográfica PENTAX PCS 515

Los puntos de medida se muestran en la siguiente figura.

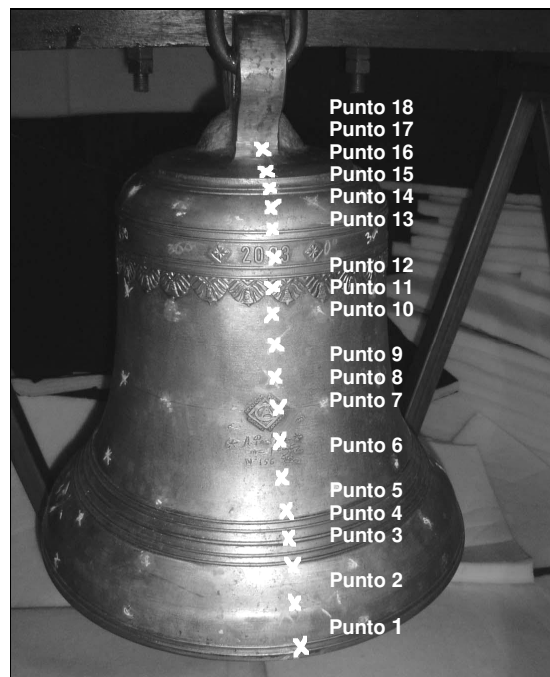


Fig. 2.6– Fotografía de la campa con los puntos de medida para la estación topográfica

Los resultados obtenidos se observan en la tabla 2.7, en la que se muestra por cada posición la distancia en metros desde la estación al punto dibujado en la campana y el ángulo en sistema sexagesimal ($400^{\circ} = 360^{\circ}$) que forma el haz lanzado al punto con su perpendicular.

puntos	distancias(m)	ángulos(sexagesimal) ^o
1	1,272	120,590
2	1,272	118,730
3	1,275	117,400
4	1,288	116,170
5	1,300	114,510
6	1,310	112,830
7	1,315	111,500
8	1,318	110,090
9	1,316	107,760
10	1,317	105,710
11	1,316	104,060
12	1,314	102,290
13	1,312	101,050
14	1,312	99,710
15	1,323	97,270
16	1,337	96,057
17	1,369	96,040
18	1,400	95,090

Fig. 2.7 – Tabla con los valores de distancia y ángulo, obtenidas con la estación topográfica.

2.3 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE ULTRASONIDOS, APLICACIÓN AL CASO DE LOS ESPESORES. DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE MEDIDA DE ESPESORES MEDIANTE COMPÁS.

Con el fin de medir el espesor de la campana en diferentes alturas y así poder hacer su descripción detallada, se han llevado a cabo dos métodos de medida. En primer lugar se ha utilizado la técnica de ultrasonidos y en segundo lugar, un compás de interiores diseñado especialmente para medir esta campana.

TÉCNICA DE ULTRASONIDOS PARA MEDIDA DE ESPESORES

Los ultrasonidos constituyen actualmente una de las partes más importantes de la acústica técnica debido a las diversas aplicaciones que encontramos de los mismos en diferentes ramas de la ciencia y la tecnología. Una de las aplicaciones más interesantes se encuentra dirigida hacia el campo de ensayo de materiales.

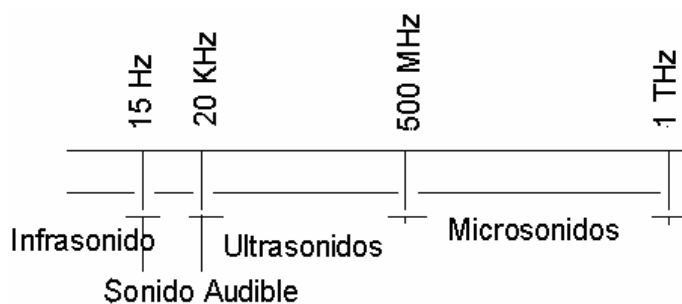


Fig. 2.8 – Espectro de vibraciones acústicas

Las vibraciones de un cuerpo elástico cuya frecuencia es mayor a 500 MHz se denominan Microsonidos. Las comprendidas entre 20 MHz y 500 MHz se llaman Ultrasonidos. El sonido audible se encuentra entre 15 Hz y 20 KHz. El Infrasonido se encuentra por debajo de los 15 Hz.

El campo de aplicación de los ultrasonidos es hoy día muy amplio, extendiéndose desde su aplicación en procesos químicos, físico-químicos, biológicos, terapéuticos, y otros varios que caen dentro del campo de las Ciencias de la Naturaleza, hasta otro campo: el industrial, donde nos ofrecen diversas manifestaciones y de las cuales la que más nos interesa es la que se refiere a su aplicación en el ensayo de materiales metálicos bajo el nombre de ensayos no destructivos. Estos ensayos requieren el empleo de vibraciones de baja amplitud. El material examinado suministrará información, como respuesta del medio frente a las vibraciones recibidas, sin experimentar modificaciones en sus propiedades.

El método utilizado en este proyecto para la medida de espesores, es el de transmisión, éste hace uso de dos palpadores independientes, uno emisor y otro

receptor, colocados uno frente al otro. La energía transmitida por el primero es captada por el receptor. Éste método exige un perfecto paralelismo de caras opuestas para no introducir errores en la recepción.

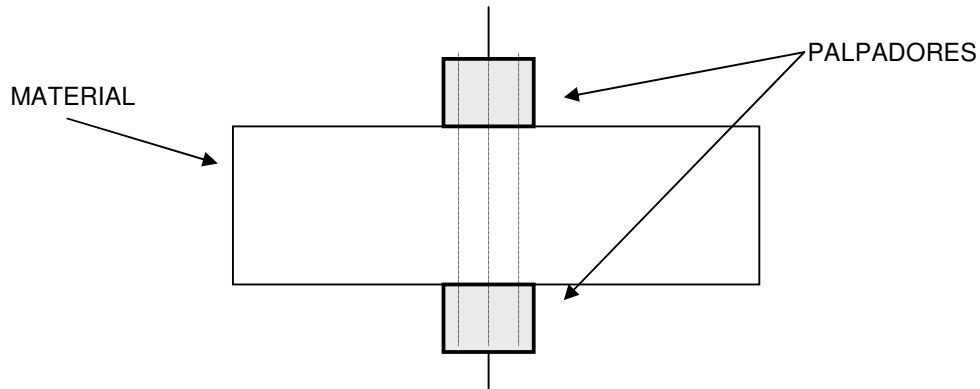


Fig. 2.9 – Posicionamiento de los palpadores

En este proyecto se trabajó con palpadores rectos, que constan de las siguientes partes principales:

- Una envolvente metálica o carcasa, protectora de las partes activas, generalmente de latón, acero inoxidable u otros materiales metálicos adecuados.
- Lámina piezoeléctrica, el elemento fundamental.
- Cuerpo amortiguador, necesario para obtener un buen amortiguamiento del cristal, dicho cuerpo debe ofrecer las siguientes características: no dar origen a ecos de interferencia, poseer alta impedancia acústica, ofrecer buena resistencia a la deformación y proporcionar el soporte mecánico a las finas láminas piezoeléctricas.

Los cables conductores y el dispositivo de acople al equipo constituyen los restantes elementos complementarios del palpador. Respecto a la longitud del cable se prefieren como máximo las comprendidas entre 1 y 3 metros.

El contacto entre palpador-pieza a ensayar tiene lugar a través de una ligera capa de aceite, grasa, vaselina, etc. En nuestro caso se ha utilizado una vaselina industrial.

El método consiste en el envío de un corto impulso inicial a intervalos regulares a través de un generador de impulsos. La frecuencia de repetición de impulsos suele estar comprendido entre 50 y 1000 impulsos por segundo: corresponde a la cadencia con la que se permite la generación de estos impulsos amortiguados. En la figura 2.10 se representa un tren de impulsos que ha sido producido por un emisor con una frecuencia de repetición de 50 impulsos por segundo.

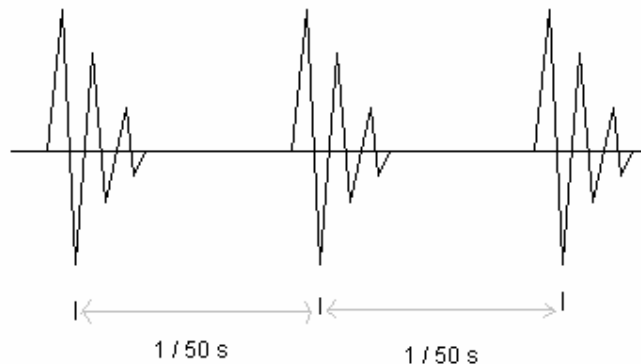


Fig. 2.10 – Tren de impulsos con periodo 1/50 segundos ($f = 50\text{Hz}$)

Cuando al receptor lleguen los impulsos emitidos por el emisor, el equipo nos dará la distancia en segundos que se produce en el trayecto.

A partir del conocimiento de estos conceptos teóricos, se optó por utilizar este método para medir el espesor de la campana.

El equipo utilizado en este proyecto es el equipo de ultrasonidos Steinkamp modelo BP-5, que posee una frecuencia de 100 kHz.



Fig. 2.11 – Ultrasonic Tester BP-5, Steinkamp

Aplicando los ultrasonidos se obtiene el tiempo que tarda el palpador receptor en captar la energía transmitida por el palpador transmisor. Obteniendo este tiempo, únicamente nos hace falta saber la velocidad de propagación del sonido en el bronce para poder calcular el espesor en los diferentes puntos de medida.

Para calcular la velocidad de propagación del sonido en el bronce, primero se necesita medir una parte de la campana al que se tenga fácil acceso. Se ha optado por medir el asa que engancha la campana con el yugo. Para hacer esta medición se empleó un *pie de rey* que facilita hacer medidas con una precisión que llega a la décima. En la figura 2.12 se observa el pie de rey utilizado.

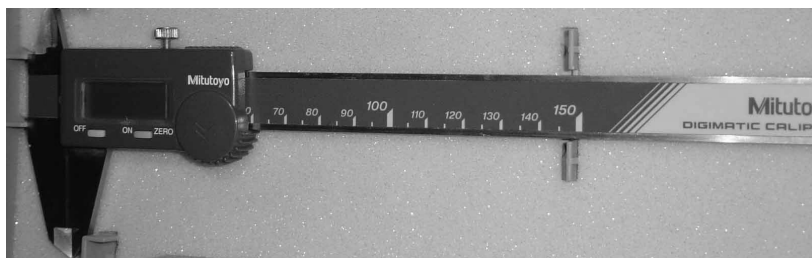


Fig. 2.12 –Digimater Caliper, Mitutoyo.

Se obtuvo un espesor de 47,0 mm. Sabiendo el espesor, solo falta medir el tiempo que transcurriría en pasar el impulso del palpador emisor al receptor en esta parte de la campana. Siendo de $11,7 \mu s$.

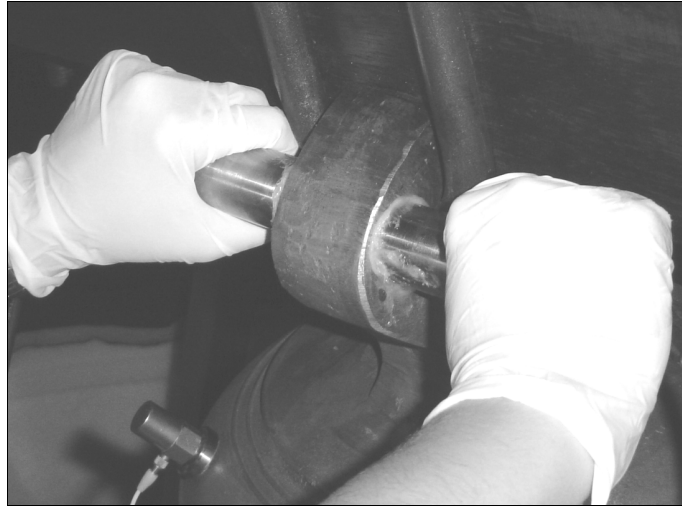


Fig. 2.13 –Fotografía de la medida con ultrasonidos del espesor del asa de la campana.

De esta forma se halla la velocidad de propagación del sonido en el bronce y así obtener con un sencillo cálculo el espesor en cualquier punto de la campana. Las ecuaciones son las siguientes.

$$velocidad = \frac{espesor}{tiempo} \quad (2.1)$$

$$espesor = velocidad * tiempo \quad (2.2)$$

Con la ecuación 2.1 se ha obtenido una velocidad de propagación del sonido en el bronce de 4017,1 m/s.



Fig. 2.14 - Puntos de medida de espesor con ultrasonidos

Una vez obtenido el valor que proporciona el equipo de ultrasonidos por cada posición, se pueden calcular los espesores para las 11 primeras posiciones de la figura 2.14 utilizando la ecuación 2.2. (En la posición 12 no se pudo hacer la medida debido a que la geometría de la campana no permite colocar los palpadores alineados)

A continuación se muestra el tiempo y el espesor obtenidos en cada posición:

PUNTOS DE MEDIDA	TIEMPO (µs)	ESPESOR (mm)
1	1,2	4,82
2	1,3	5,22
3	1,3	5,22
4	1,4	5,62
5	1,4	5,62
6	1,4	5,62
7	1,4	5,62
8	1,3	5,22
9	1,3	5,22
10	1,3	5,22
11	1,2	4,82

Fig. 2.15 – Tabla con las medidas de espesor con ultrasonidos

A la vista de los resultados, este método de medida no nos proporciona resultados fiables, ya que por simple observación los espesores no se corresponden con los de la campana. Esto es debido a que el bronce producido por fundición presenta una granulometría que ofrece cierta resistencia a la transmisión de las ondas.

TÉCNICA DE MEDIDA DE ESPESORES MEDIANTE COMPÁS

Con el fin de obtener buenos resultados, se ha diseñado un compás de interiores con unas medidas determinadas, que nos facilitaran el acceso al interior de la campana y medir el espesor en diferentes puntos. En la siguiente figura se puede observar su forma y sus medidas.

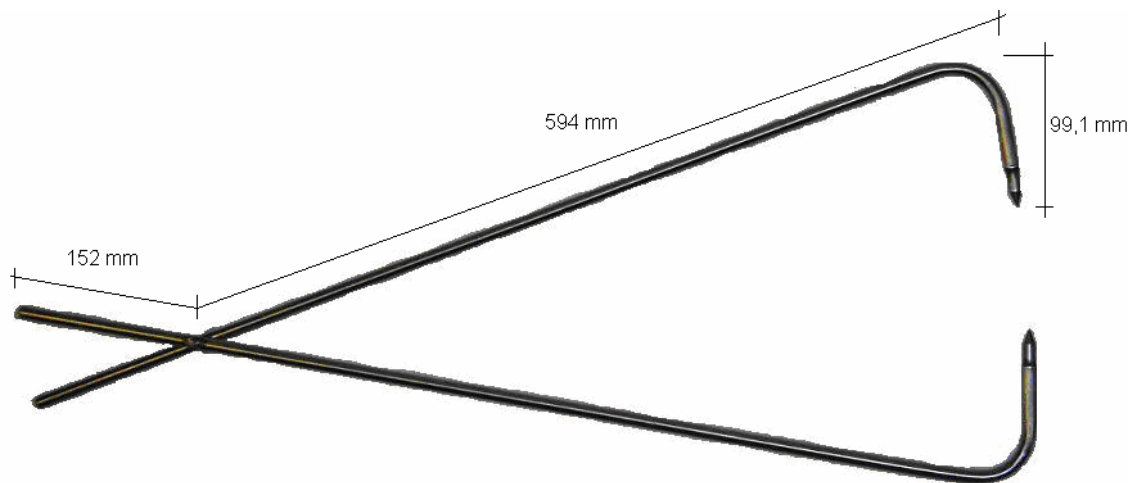


Fig. 2.16 – Compás de interiores diseñado para medir el espesor de la campana

Analizando el compás a partir de sus ángulos α , podemos obtener el espesor siguiendo las siguientes ecuaciones:

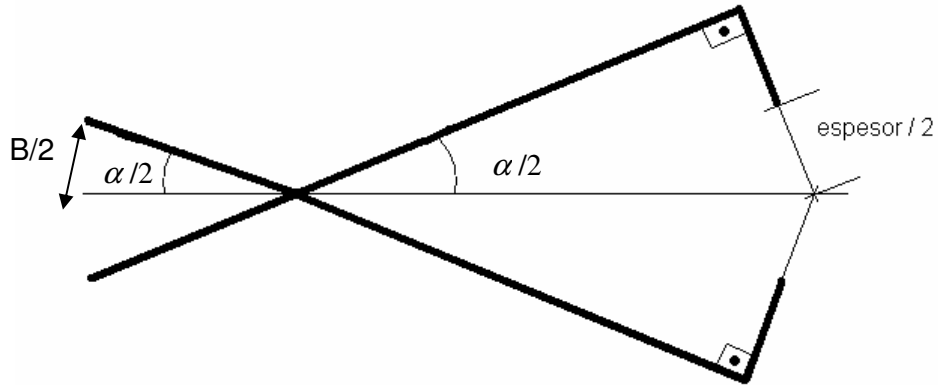


Fig. 2.17 – Compás de interiores diseñado para medir el espesor de la campana

Las ecuaciones son las siguientes:

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{B/2}{152} \longrightarrow \frac{\alpha}{2} = \operatorname{arctg} \frac{B/2}{152} \quad (2.3)$$

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{99,1 + \operatorname{espesor} / 2}{594} \longrightarrow \frac{\alpha}{2} = \operatorname{arctg} \frac{99,1 + \operatorname{espesor} / 2}{594} \quad (2.4)$$

Igualando las ecuaciones 2.3 y 2.4 obtenemos:

$$\frac{B/2}{152} = \frac{99,1 + \operatorname{espesor} / 2}{594} \quad (2.5)$$

Y por último despejamos el *espesor* de la ecuación 2.5, tenemos:

$$\operatorname{espesor} = 2 \cdot \left[\frac{594 \left(\frac{B + 7,5}{2} \right)}{152} - 99,1 \right] \quad (2.6)$$

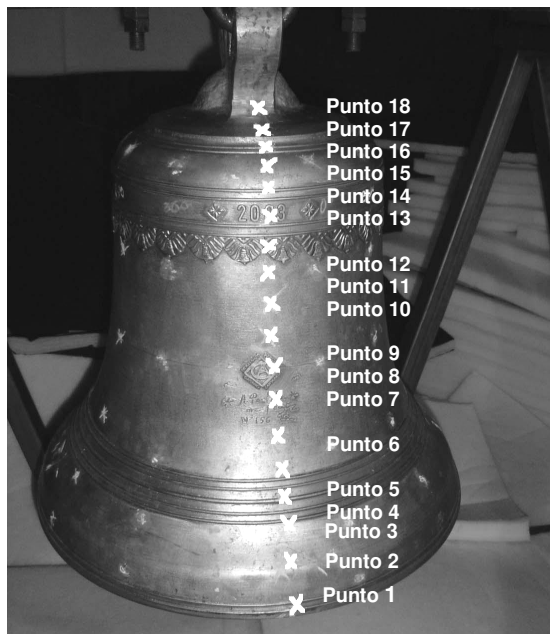
Para tener en cuenta el error de medida debido a la manipulación del compás y a las dimensiones del tubo que lo compone, diámetro (7,5 mm) y grosor (1 mm),

vamos a restarle al espesor obtenido 8 mm, quedando finalmente el espesor como:

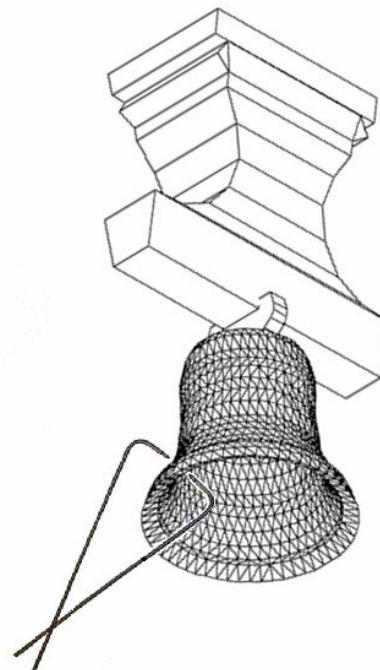
$$\text{espesor} = 2 \cdot \left[\frac{594 \left(\frac{B + 7,5}{2} \right)}{152} - 99,1 \right] - 8 \quad (2.7)$$

Las medidas de espesor se realizaron en los mismos puntos que en los que se realizó la medida de la curvatura de la campana con la estación topográfica, en total 18 puntos (ver figura 2.6) de los cuales en sólo los doce primeros se pudo medir con el compás, debido a la curvatura de la campana en la corona.

A continuación se muestran dos figuras, la primera es una fotografía de la campana con los puntos de medida dibujados en ella y la segunda es una descripción geométrica de cómo se ha realizado la medida.



(a)



(b)

Fig. 2.18– (a) Puntos de medida de espesor para el compás de interiores, (b) Posicionamiento del compás con respecto la campana

La medida se repitió cuatro veces en los 12 primeros puntos, para así poder hacer un promedio. En la tabla de la figura 2.19 están los resultados que se obtuvieron con este método de medida. La tabla contiene las cuatro medidas que se hicieron por posición, la media de ellas y el espesor, calculado con la ecuación (2.7).

PUNTOS DE MEDIDA	1ª MEDIDA B ₁ (mm)	2ª MEDIDA B ₂ (mm)	3ª MEDIDA B ₃ (mm)	4ª MEDIDA B ₄ (mm)	PROMEDIO B _{MEDIA} (mm)	ESPESOR (mm)
1	48,2	48,3	48,1	49,1	48,4	12,5
2	54,2	52,9	53,0	53,0	53,3	31,4
3	54,5	54,0	53,2	54,9	54,2	34,8
4	53,6	53,0	52,9	53,6	53,3	31,4
5	49,7	50,6	52,1	52,2	51,2	23,1
6	47,9	48,9	47,7	49,0	48,4	12,6
7	46,3	49,4	48,1	48,5	48,1	11,1
8	46,9	49,3	47,7	47,3	47,8	10,0
9	46,4	49,6	47,3	47,1	47,6	9,2
10	46,3	49,7	47,6	47,5	47,8	9,9
11	45,6	48,5	47,9	47,9	47,5	8,8
12	47,3	48,2	47,1	48,3	47,7	9,7
13	48,2	48,3	46,7	48,5	47,9	10,5
14						
15						
16						
17						
18						

Fig. 2.19 – Tabla con los valores de espesor en las cuatro medidas y la media de todos ellos

Estos resultados de espesor son más coherentes que los obtenidos mediante la técnica de ultrasonidos, por lo que estos espesores son los que se han utilizado para realizar la descripción geométrica de la campana.

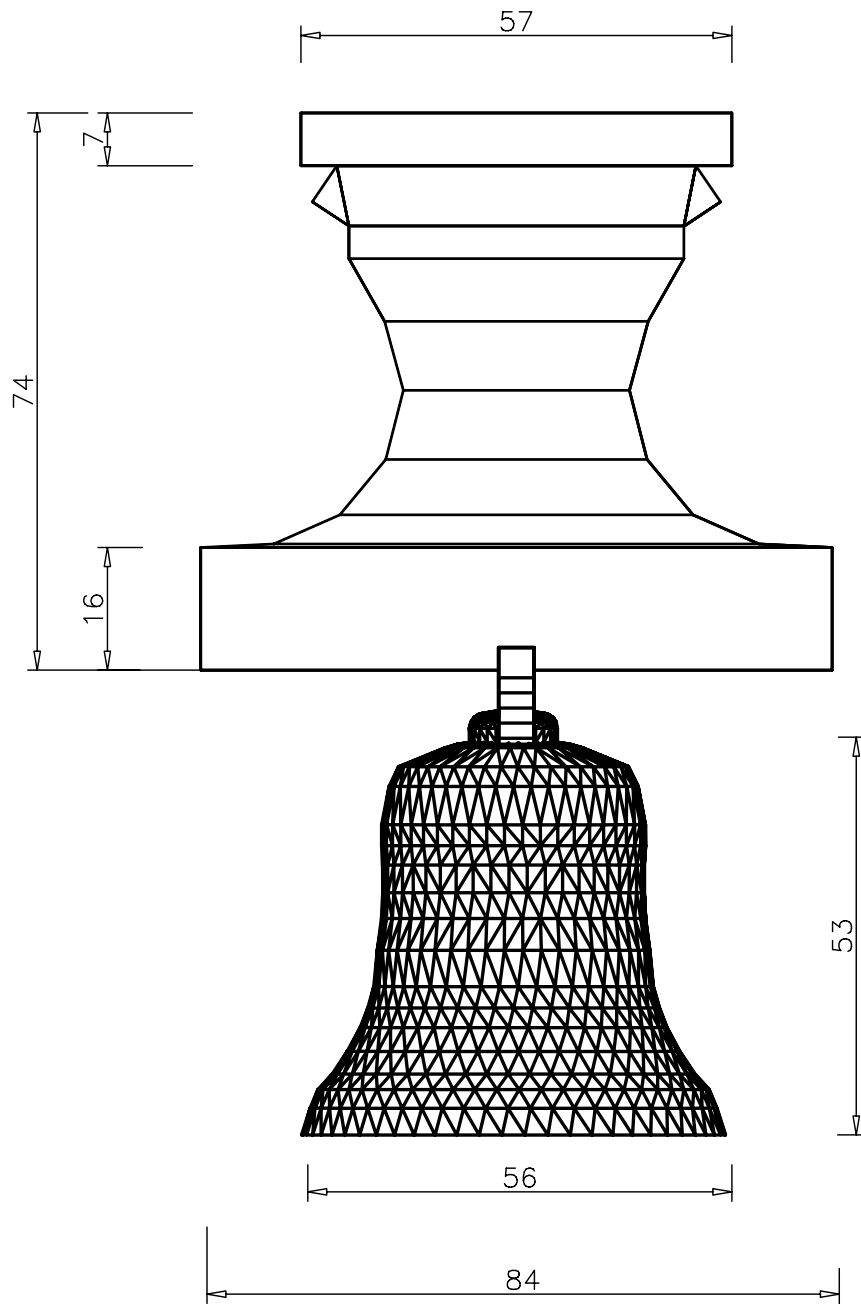
2.4 PLANOS DE DETALLE: PLANTA, ALZADO, PERFIL Y PERSPECTIVA. ACOTACIONES.

En este apartado se expone la geometría completa de la campana, gracias a todas las medidas halladas en los apartados anteriores, espesor, curvatura, etc.

Los planos que se muestran a continuación están elaborados mediante técnicas CAD. Los planos son los siguientes:

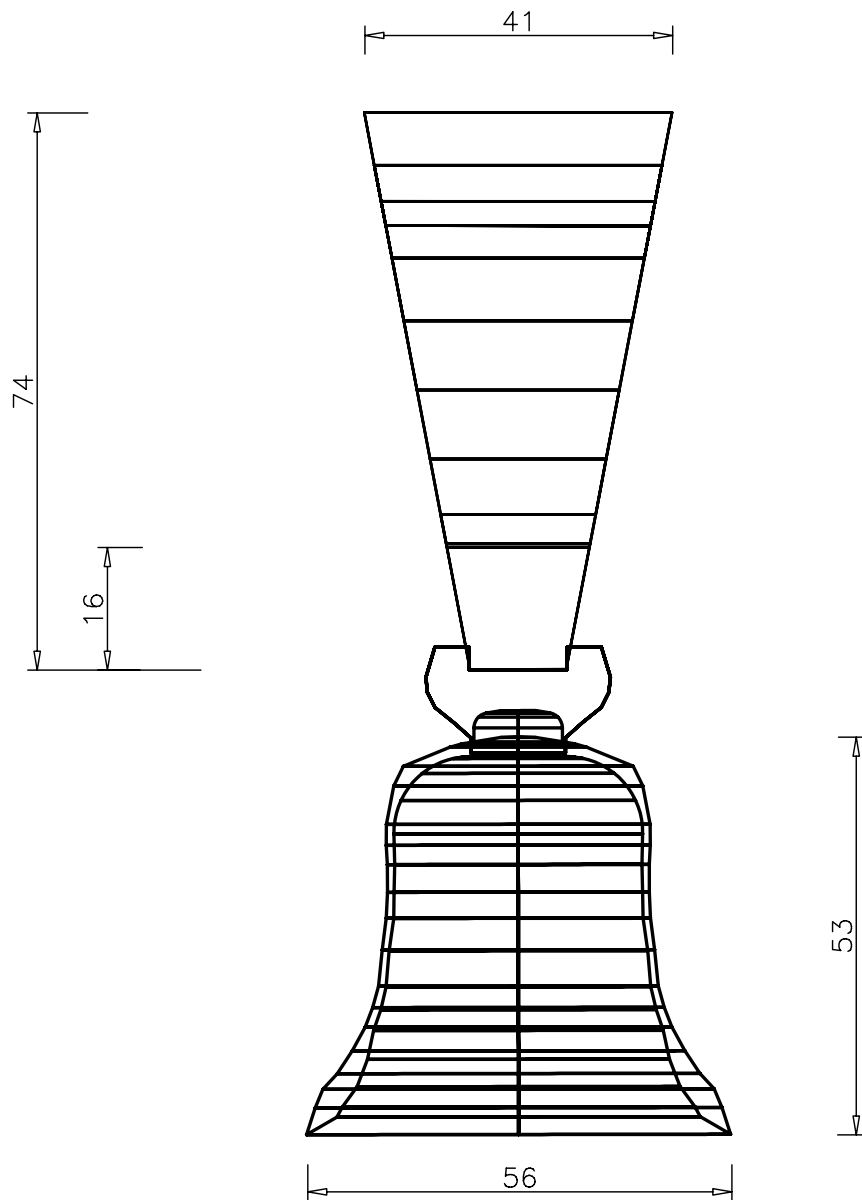
1. ALZADO DEL CONJUNTO CAMPANA-YUGO.
2. PERFIL DEL CONJUNTO CAMPANA-YUGO.
3. PLANTA DEL CONJUNTO CAMPANA-YUGO y SECCIÓN DE LA CAMPANA.
4. PERSPECTIVA CONJUNTO CAMPANA-YUGO.

Acotados en cm.



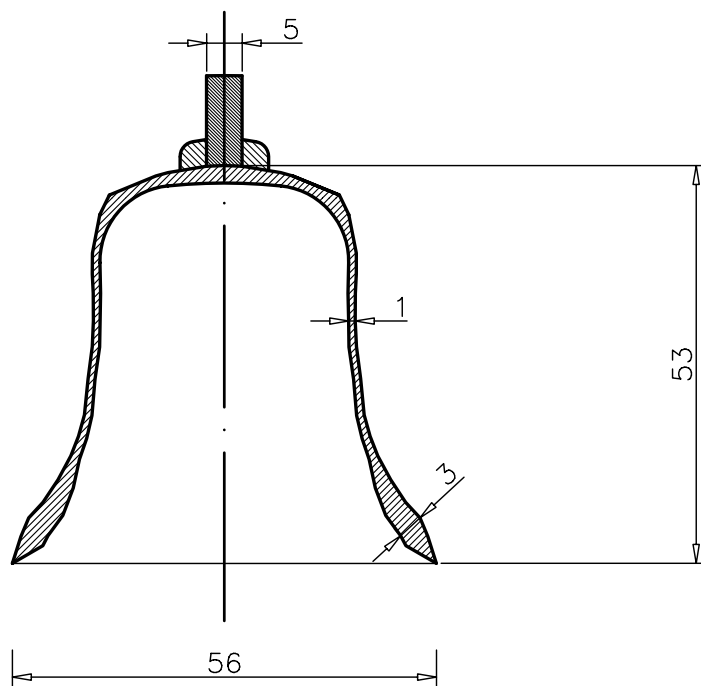
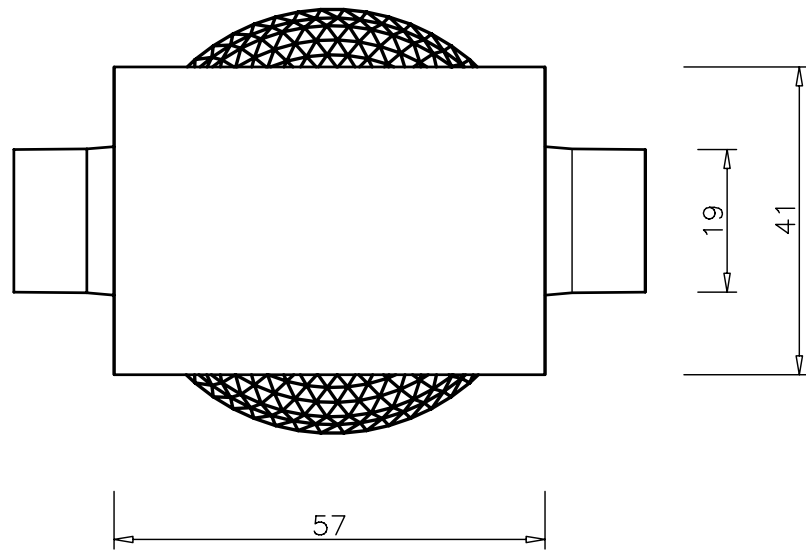
cotas en cm

INGENIERO TECNICO DE TELECOMUNICACIONES Elisa Pérez Piqueras		Fdo.
Fecha Sept. 2006	ESTUDIO VIBROACÚSTICO DE UNA CAMPANA DE BRONCE	
Dibujado por: E.P.P.		
Escala: 1:10	PLANO: ALZADO DE LA CAMPANA	NÚMERO 1



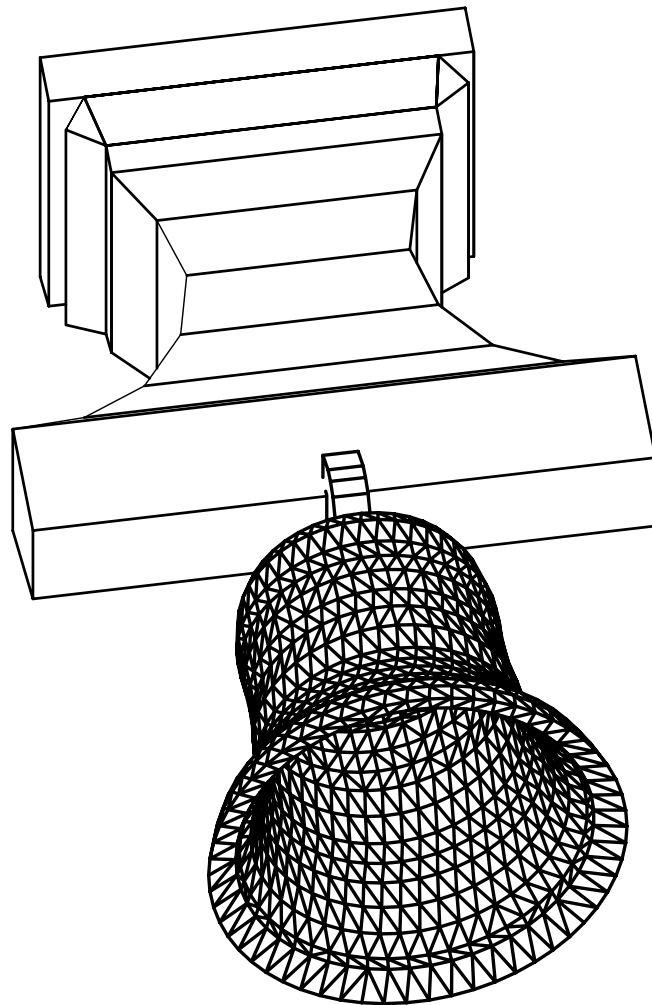
cotas en cm

INGENIERO TECNICO DE TELECOMUNICACIONES Elisa Pérez Piqueras		
Fecha Sept. 2006	ESTUDIO VIBROACÚSTICO DE UNA CAMPANA DE BRONCE	
Dibujado por: E.P.P.		PLANO: PERFIL DE LA CAMPANA
Escala: 1:10		



cotas en cm

INGENIERO TECNICO DE TELECOMUNICACIONES Elisa Pérez Piqueras		
Fecha Sept. 2006	ESTUDIO VIBROACÚSTICO DE UNA CAMPANA DE BRONCE	Fdo.
Dibujado por: E.P.P.		
Escala: 1:10	PLANO: PLANTA Y SECCIÓN	NÚMERO 3



INGENIERO TECNICO DE TELECOMUNICACIONES
Elisa Pérez Piqueras

Fecha
Sept. 2006

Dibujado por:
E.P.P.

Escala:
1:10

**ESTUDIO VIBROACÚSTICO DE UNA
CAMPANA DE BRONCE**

PLANO:
PERSPECTIVA

Fdo.

NÚMERO **4**

CAPÍTULO 3:

EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT

3.1 DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO PROPUESTO

El ensayo propuesto se basa en el estudio de las frecuencias de resonancia mediante el análisis en frecuencia con la transformada rápida de Fourier (FFT). Lo que se pretende hallar es la nota musical que percibimos cuando se hace sonar la campana y comprobar si varía según la posición donde le golpeemos, teniendo en cuenta que el asa y el yugo rompen su geometría. Para ello, habrá que estudiar los parciales de la campana analizando su respuesta en frecuencia bajo excitación mecánica.

Si queremos estudiar la respuesta en frecuencia que produce la campana al ser golpeada, necesitamos capturar la señal en el tiempo. Esto se puede realizar grabando el sonido que produce la campana cuando es accionada.

La figura 3.1 muestra un esquema de la sala de silencio semianecoica donde se ha llevado a cabo el ensayo.

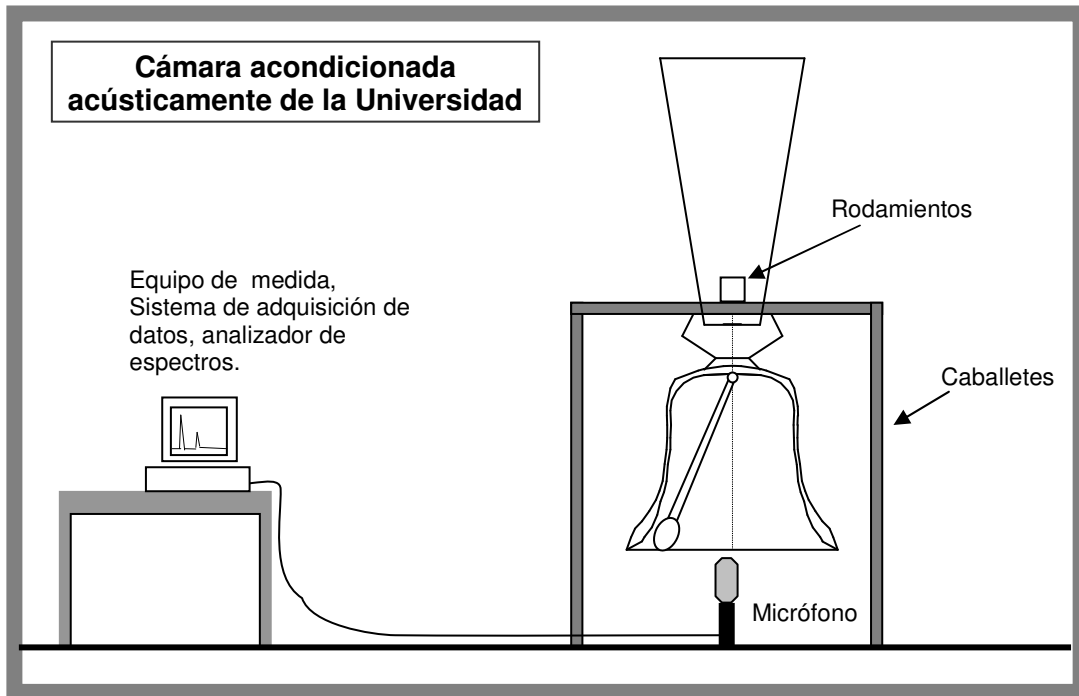


Fig.3.1 – Esquema de la disposición de la campana y la instrumentación en la sala acondicionada acústicamente.

El micrófono con el que se recogieron las grabaciones, es un micrófono condensador de campo libre tipo 40-AF de la marca G.R.A.S, caracterizado por su amplio rango dinámico y una respuesta en frecuencia plana, como se muestra en la figura 3.4.

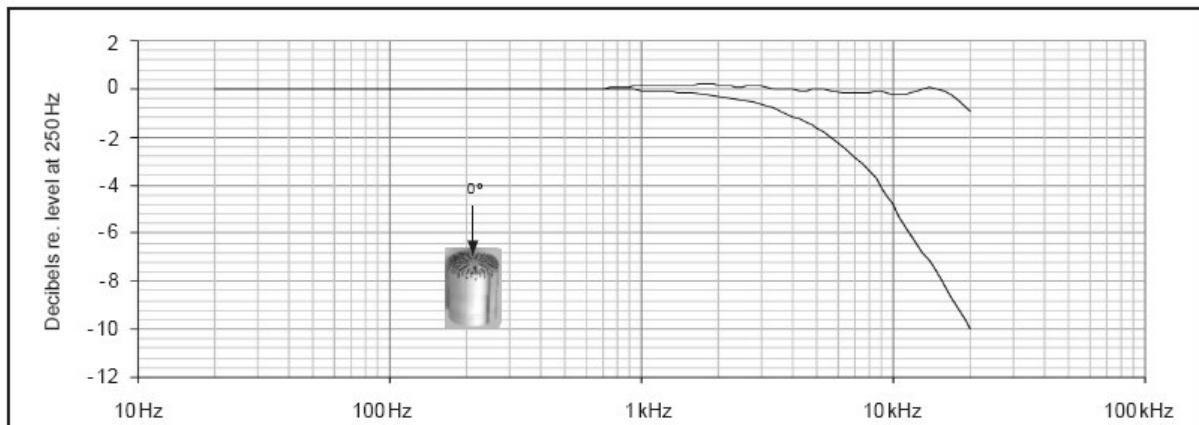


Fig. 3.2 - Respuesta en frecuencia del micrófono GRAS de tipo 40AF

Las principales especificaciones de este micrófono son:

- RESPUESTA EN FRECUENCIA:
 - 3,15 Hz – 20 kHz.....±2,0 dB
 - 5 Hz – 10 kHz.....±1,0 dB
- SENSIBILIDAD NOMINAL 50 Mv/Pa
- VOLTAGE DE POLARIZACIÓN 200 V
- RUIDO TÉRMICO 14,5Dba re. 20 μ Pa

En la fotografía de la figura 3.3 puede verse que el micrófono esta orientado en 0° con respecto a la boca de la campana:

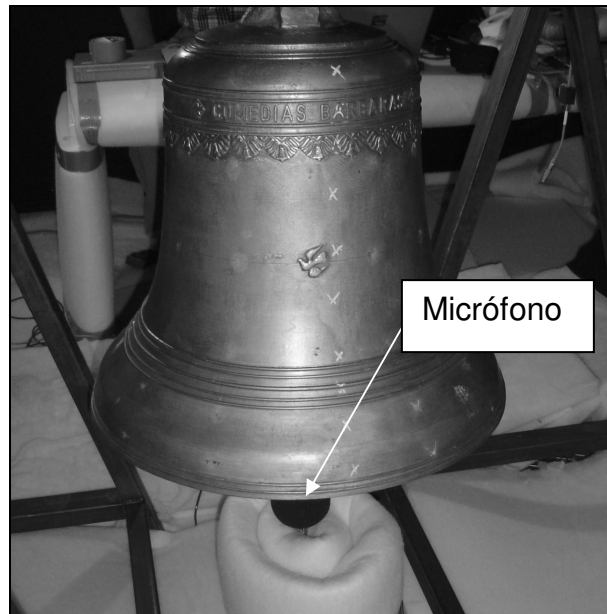


Fig.3.3 – Fotografía de la situación real del micrófono con respecto la campana.

La grabación digital del sonido producido por la campana se ha grabado utilizando el hardware Symphonie y el software dBfa32, pertenecientes ambos a la casa comercial 01dB.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS FFT

Antes de empezar con el estudio de la respuesta en frecuencia, vamos a ver un breve resumen sobre la transformada de Fourier.

3.2.1 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

TRANSFORMADA DE FOURIER

La Transformada de Fourier (TF) se aplica a señales aperiódicas; esta representación en términos de combinación lineal adopta la forma de una integral de exponenciales complejas que están infinitesimalmente cercanas en frecuencia.

La Transformada de Fourier $X(f)$ representa los pesos (a_k) de las exponenciales complejas, que sirven para sintetizar la señal $x(t)$ y es una función continua con la frecuencia. $X(f)$ es el ESPECTRO de $x(t)$ e informa sobre la composición de $x(t)$ en términos de señales sinusoidales de diferentes frecuencias.

Las señales de duración limitada se pueden representar como suma de exponenciales complejas de cualquier frecuencia.

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) \cdot e^{-j\omega n} \quad (3.1)$$

TRANSFORMADA DE FOURIER EN TIEMPO DISCRETO

La transformada de Fourier, $X(f)$, de una señal $x(n)$ de energía finita en tiempo discreto es una función continua en frecuencia. Esta representación continua del

contenido en frecuencia de la señal no es, desde un punto de vista computacional, la mejor de las representaciones.

En este apartado se muestra como también es posible proporcionar una representación discreta de $X(f)$ a través de un muestreo en el dominio de la frecuencia. Dicha representación es lo que se conoce como la transformada de Fourier discreta (DFT, 'Discrete Fourier Transform').

Se puede decir que una secuencia de duración finita $x(n)$ de longitud L tiene una transformada de Fourier:

$$X(\omega) = \sum_{n=0}^L x(n) \cdot e^{-j\omega n} \quad 0 \leq \omega \leq 2\pi \quad (3.2)$$

Cuando se muestrea $X(\omega)$ en frecuencias equiespaciadas $\omega_k = 2\pi k / N$, $k=0,1,2,\dots,N-1$, con $N \geq L$, las muestras resultantes son

$$X(k) \equiv X\left(\frac{2\pi}{N}k\right) = \sum_{n=0}^{L-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad k = 0,1,\dots,N-1 \quad (3.3)$$

donde teniendo en cuenta que $x(n) = 0$ para $n \geq L$, el índice superior del sumatorio se puede cambiar por $N-1$ quedando

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad k = 0,1,\dots,N-1 \quad (3.4)$$

A esta relación se le denomina Transformada Discreta de Fourier (**DFT**, 'discrete Fourier transform').

Para calcular el espectro de una señal, se necesitaría conocer los valores de ésta para todos los instantes de tiempo. Sin embargo, en la realidad esto no puede ser

así, y de hecho las señales se observan sólo durante un periodo de tiempo finito. Como consecuencia de esto, el espectro de la señal debe aproximarse a partir de un registro de datos finito. A continuación se muestran las implicaciones que esto conlleva.

Supongamos una señal discreta $x(n)$ de duración finita $T_0 = L \cdot T_S$, donde L es el número de muestras y T_S es el periodo de muestreo. La limitación del intervalo de observación a una duración finita reduce la resolución en frecuencia. Esto quiere decir que se reduce la capacidad de distinguir entre dos componentes de frecuencia que estén separadas en frecuencia menos de $1/T_0$.

El limitar la duración de la secuencia a L muestras dentro del intervalo $0 \leq n \leq L-1$, es equivalente a multiplicar $x(n)$ por una ventana rectangular $w(n)$ de longitud L .

$$\tilde{x}(n) = x(n) \cdot w(n) \quad (3.5)$$

donde

$$w(n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq L-1 \\ 0 & \text{en el resto} \end{cases} \quad (3.6)$$

Supongamos que la secuencia $x(n)$ es de la forma

$$x(n) = \cos(\omega_o n) \quad (3.7)$$

Por tanto, la transformada de Fourier de la secuencia de duración finita $\hat{x}(n)$ puede expresarse como

$$\hat{X}(\omega) = \frac{1}{2} [W(\omega - \omega_o) + W(\omega + \omega_o)] \quad (3.8)$$

donde $W(\omega)$ es la transformada de Fourier de la secuencia ventana, la cual tiene una expresión, para el caso particular de la ventana rectangular,

$$W(\omega) = \frac{\text{sen}(\omega L / 2)}{\text{sen}(\omega / 2)} e^{-j\omega \frac{(L-1)}{2}} \quad (3.9)$$

Para calcular $\hat{X}(\omega)$ se utiliza la DFT, rellenando previamente con N-L ceros la secuencia $\hat{x}(n)$.

TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)

Debido a la importancia de la DFT en distintas aplicaciones del procesado de la señal digital (filtrado lineal, análisis espectral, etc) el cálculo eficiente de la DFT cobra un papel muy importante.

Básicamente, el problema del cálculo de la DFT consiste en determinar la secuencia $X(k)$ de N números complejos a partir de la siguiente ecuación:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (3.10)$$

Donde,

$$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}} \quad (3.11)$$

y $x(n)$ se supone que es una secuencia de datos compleja de longitud N .

Como se puede observar, para cada valor de k , el cálculo directo de $X(k)$ supone realizar N multiplicaciones complejas ($4*N$ multiplicaciones reales) y $N-1$ sumas complejas ($4*N-2$ sumas reales). Por tanto, para calcular los N valores de la DFT se necesitan N^2 multiplicaciones complejas y N^2-N sumas complejas. Por ello, el cálculo directo de la DFT resulta bastante ineficiente.

Esta es la razón son de interés todos aquellos procedimientos de cómputo que nos permitan reducir el número de multiplicaciones y sumas. La mayoría de estos procedimientos explotan las propiedades de periodicidad y de simetría de W_N^{kn} . En concreto se tiene:

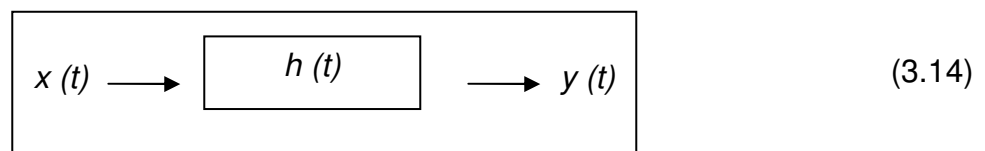
$$W_N^{k[N-n]} = W_N^{-kn} = (W_N^{kn})^* \quad \text{compleja conjugada simétrica} \quad (3.12)$$

$$W_N^{kn} = W_N^{k(n+N)} = W_N^{(k+N)n} \quad \text{periodicidad en } n \text{ y } k \quad (3.13)$$

Todos estos algoritmos se conocen colectivamente como transformada rápida de Fourier (FFT, 'Fast Fourier Transform'). Los algoritmos FFT se basan en el principio fundamental de descomponer el cálculo de una transformada discreta de Fourier de una secuencia de longitud N en transformadas discretas de Fourier sucesivamente más pequeñas. La forma en que se aplica este principio conduce a una variedad de algoritmos diferentes, todos ellos con la ventaja de reducir considerablemente el número de operaciones.

Si el coste computacional para el cálculo directo de la DFT es del orden de N^2 , con los algoritmos FFT se puede reducir a $N \cdot \log N$.

En este proyecto el sistema que tenemos es el siguiente:



Siendo $x(t)$ el golpe producido por el martillo (o badajo, según el caso) , $h(t)$ la función de transferencia de la campana, es decir el comportamiento de la campana, e $y(t)$ que es la salida obtenida al golpear la campana, en nuestro caso el sonido captado por el micrófono.

Lo que realiza la FFT es la transformada de Fourier discreta de la señal de salida, obteniendo $Y(f)$, que es nuestra señal a analizar.

Para realizar el análisis de Fourier, hemos utilizado también el software dBfa32. Las FFT se realizaron con ventanas Hanning con el 50% de solapamiento, en una banda de 5000Hz y con 3201 líneas, obteniendo así una resolución de 1,562 Hz.

Con el fin de conseguir buenas señales, las grabaciones de sonido se realizaron tres veces por medida. Después se les realizó la FFT a cada grabación, y una vez obtenidas las tres respuestas en frecuencia por cada medida, se hizo un promediado de ellas, el cual será nuestra señal a estudiar.

Una vez obtenida la FFT promediada por cada medida posición, se llevó a cabo un estudio de la presión con la que se excitaba cada frecuencia para detectar los parciales de la campana.

3.2.2 OBTENCIÓN DE LAS PARCIALES

Según A. B. Simpson [1] las campanas se caracterizan por tener 5 o 7 parciales en un ligero estado inarmónico llamados HUM, PRIME, TIERCE QUINT, NOMINAL, SUPERQUINT y OCTAVE NOMINAL. La relación numérica que se cumple entre ellos se puede observar en la tabla 3.2.

HUM	1
PRIME	2*HUM
TIERCE	2,4*HUM
QUINT	3*HUM
NOMINAL	4*HUM
SUPERQUINT	6*HUM
OCTAVE NOMINAL	8*HUM

Fig.3.4– Relación numérica entre los parciales de SIMPSOM.

El parcial PRIME es el que nos vas a decir que nota musical oímos cuando la campana es excitada, y el parcial HUM es el parcial que produce el sonido que se escucha después de haberla golpeado, el que persiste tras pasar unos segundos, es decir, el “murmullo” que se oye.

El estudio de la detección de los parciales característicos de la campana (Simpson), se ha llevado a cabo a través de la representación gráfica del espectro en cada posición, visualizando el espectro tanto en representación en pascales como en niveles de presión. Con la representación en pascales se observan los parciales más limpiamente y nos será más fácil detectar el HUM, pero con la representación en decibelios podemos ver el comportamiento de la campana en todo el rango de frecuencias examinado. Los parciales restantes los detectaremos aplicando la tabla de la figura 3.4 y ayudándonos de las representaciones.

Un ejemplo de cómo detectar los parciales según Simpson es el siguiente. Si detectamos el parcial HUM en la frecuencia 326,57 Hz, los demás parciales estarán en:

HUM	1	326,57 Hz
FUNDAMENTAL	2	653,13 Hz
TIERCE	2,4	783,76 Hz
QUINT	3	979,70 Hz
NOMINAL	4	1306,26 Hz
SUPERQUINT	6	1959,39 Hz
OCT.NOMINAL	8	2612,52 Hz

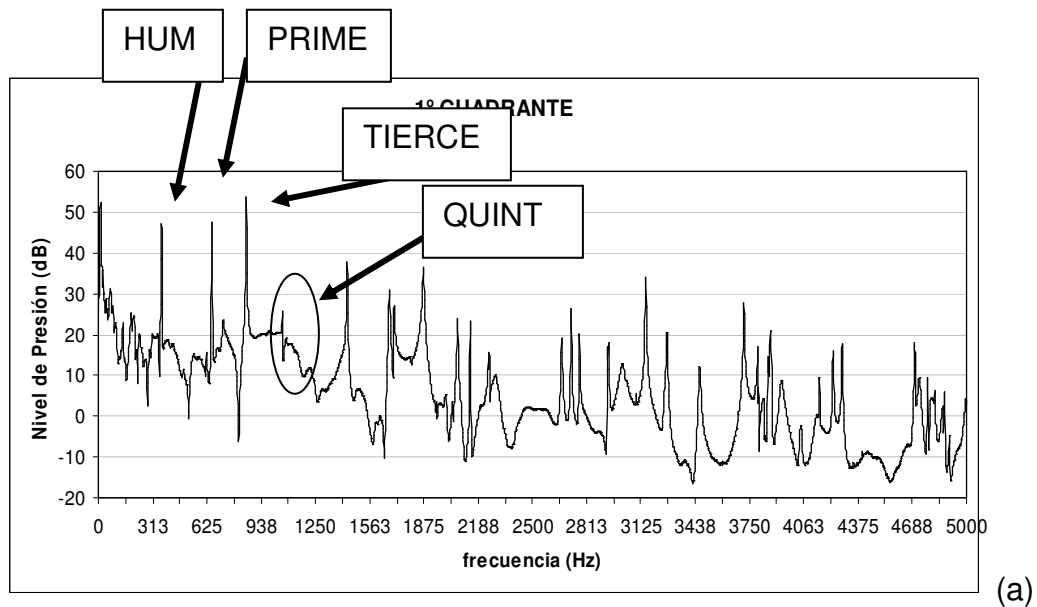
Fig. 3.5 – Ejemplo del cálculo de los parciales de Simpson.

CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT

Hay que tener en cuenta que los valores de frecuencia que obtenemos de la relación numérica entre los parciales de Simpson, son valores aproximados de dónde se tienen que encontrar, porque no olvidemos que la campana esta caracterizado por un ligero estado inarmónico.

Para el estudio no se han tenido en cuenta las frecuencias inferiores a 100 Hz, porque pueden atribuirse a efectos de vibración mecánica originados por el impacto.

Lo primero que vamos a hacer es observar la misma señal representada en nivel de presión sonora y en pascales. En la figura 3.6 se observan las dos representaciones con los parciales HUM, PRIME, TIERCE y QUINT indicados en ella.



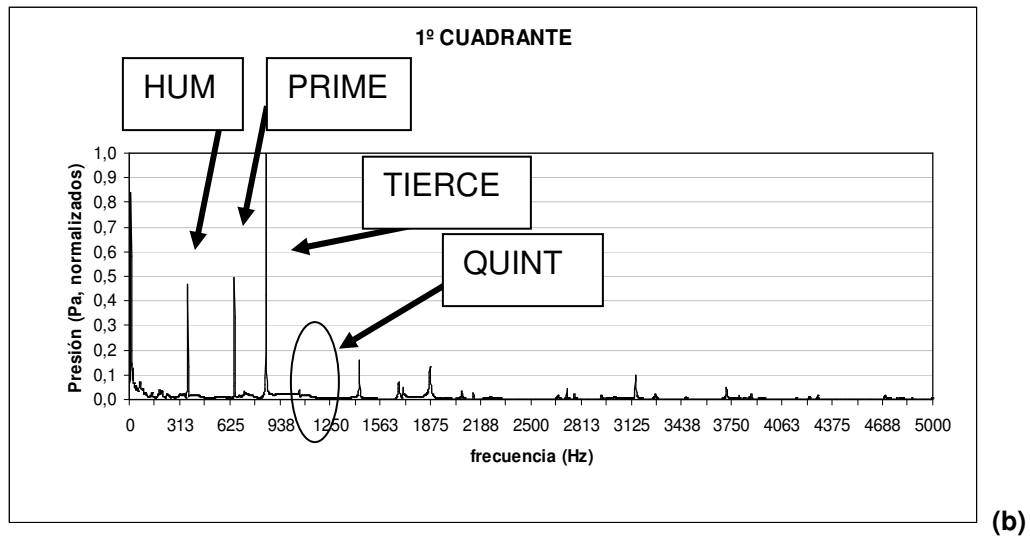


Fig. 3.6 – Tabla con los parciales de Simpson.
(a) Representación en Nivel de Presión, (b) representación en presión (Pa).

Con las dos representaciones se pueden ver identificar los parciales a simple vista. Con la representación en presión (Pa) los parciales están más definidos, pero con la representación en nivel de presión (dB) tenemos mucha más información porque vemos como se excita cada frecuencia. Por poner un ejemplo de lo mencionado, en la figura 3.6.a se observa que entorno a los 1000 Hz existe el parcial QUINT, mientras que en la figura 3.6.b no es visible.

En el estudio posterior las gráficas que se incluyen son las que están representadas en presión (pascales), aunque el estudio de los parciales se haya llevado a cabo estudiando las dos.

3.2.3 OBTENCIÓN DE LAS NOTAS MUSICALES

Para concretar el estudio de los parciales de la respuesta en frecuencia de la del sonido producido por la campana, se va a calcular las notas musicales correspondientes a los principales parciales.

En este proyecto las notas son calculadas basándonos en la escala bien temperada. Como ya se explicó en el capítulo 1, un semitono se divide en 100 centésimas, y con 12 semitonos en una octava, hay 1200 centésimas. Por lo que las centésimas de tono se calculan como se especifica a continuación:

$$Centésimas = \left(\frac{1200}{\log(2)} \right) * \log \left(\frac{f_{nota}}{f_{internacional}} \right) \quad (3.15)$$

En la tabla de la figura 3.7 se muestra la escala bien temperada con sostenidos y bemoles.

NOTA		FRECUENCIA (Hz)				
		2º octava	3º octava	4º octava	5º octava	6º octava
C	DO	130,8	261,6	523,2	1046,5	2093,0
Db	REb	138,5	277,1	554,3	1108,7	2217,5
D	RE	146,9	293,6	587,3	1174,7	2349,3
Eb	MIb	155,6	311,1	622,2	1244,5	2489,0
E	MI	164,8	329,6	659,2	1318,5	2637,0
F	FA	174,6	349,2	698,4	1396,9	2793,8
F#	FA#	185,0	369,9	739,9	1480,0	2960,0
G	SOL	196,0	392,0	783,9	1568,0	3136,0
Ab	LAB	207,7	415,3	830,6	1661,2	3322,4

A	LA	220,0	440,0	880,0	1760,0	3520,0
Bb	Slb	233,1	466,1	932,3	1864,7	3729,3
B	SI	246,9	493,8	987,7	1975,5	3951,1

Fig.3.7– Tabla de la escala bien temperada con sostenidos y bemoles.

Ejemplo

Vamos a obtener la nota musical correspondiente a una frecuencia de 362,5Hz. Fijándonos en la tabla, la frecuencia más cercana es la del F3# (FA3#).

$$f_{nota} = 362,5Hz$$

$$f_{int\ ernacional} = 369,9Hz$$

Empleando la ecuación 3.15, obtenemos las centésimas de tono en las que la f_{nota} se sobrepasa o no llega a la $f_{int\ ernacional}$.

$$Centésimas = \left(\frac{1200}{\log(2)} \right) * \log\left(\frac{362,5}{369,9} \right) = -35,4 \quad (3.16)$$

La nota que corresponde a la frecuencia 362,5 Hz es un FA₃# -35 centésimas. Si hubiéramos obtenido +50 centésimas, tendríamos un SOL₃, ya que está medio semitono por encima del FA₃#.

3.2.4. EXCITACIÓN DE LA CAMPANA CON GOLPE DE BADAJO

Lo primero que se hizo fue captar las grabaciones digitales de la campana frente al golpe de badajo. Al estar el badajo fijo en el interior de la campana, solo tiene movilidad para golpear en la parte delantera y trasera de la campana (primer y tercer cuadrante).

En la figura 3.8 se puede observar el badajo, su situación en el interior de la campana, además de la dirección de oscilación del badajo.

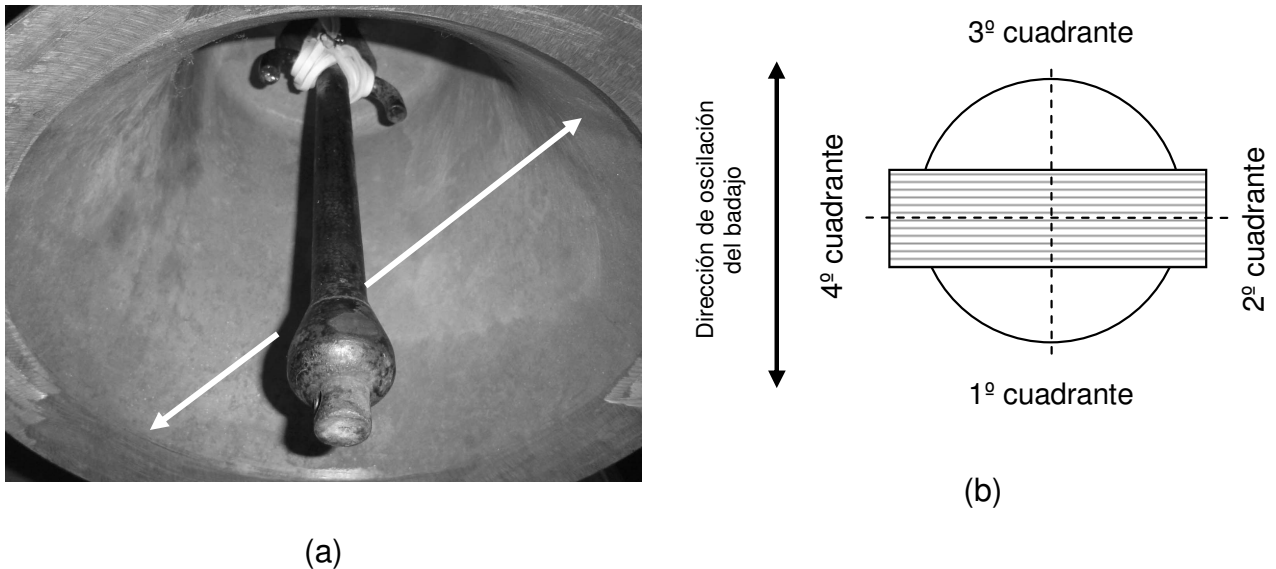
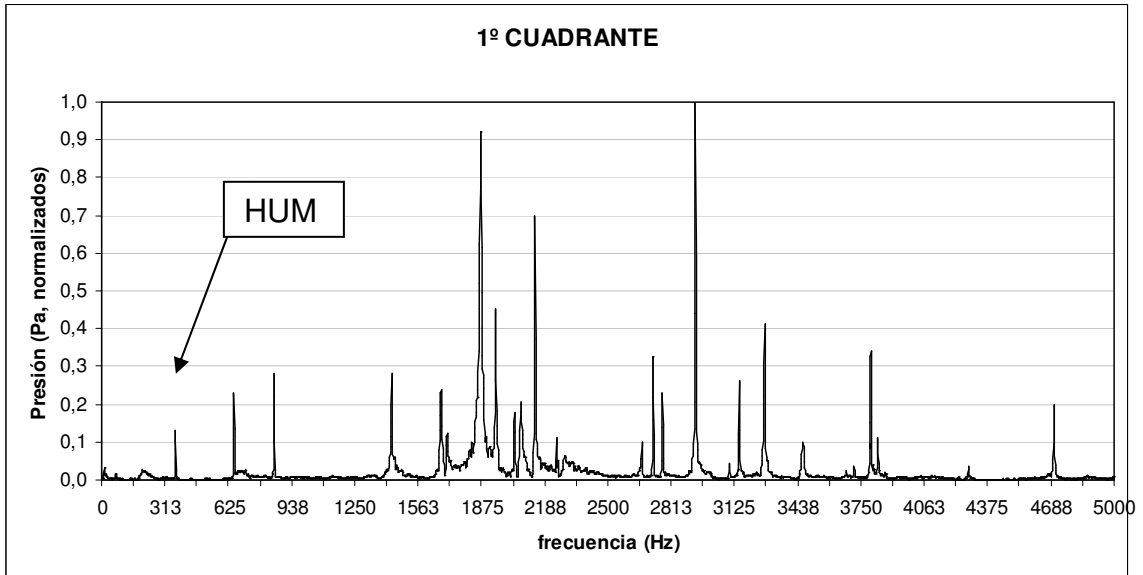


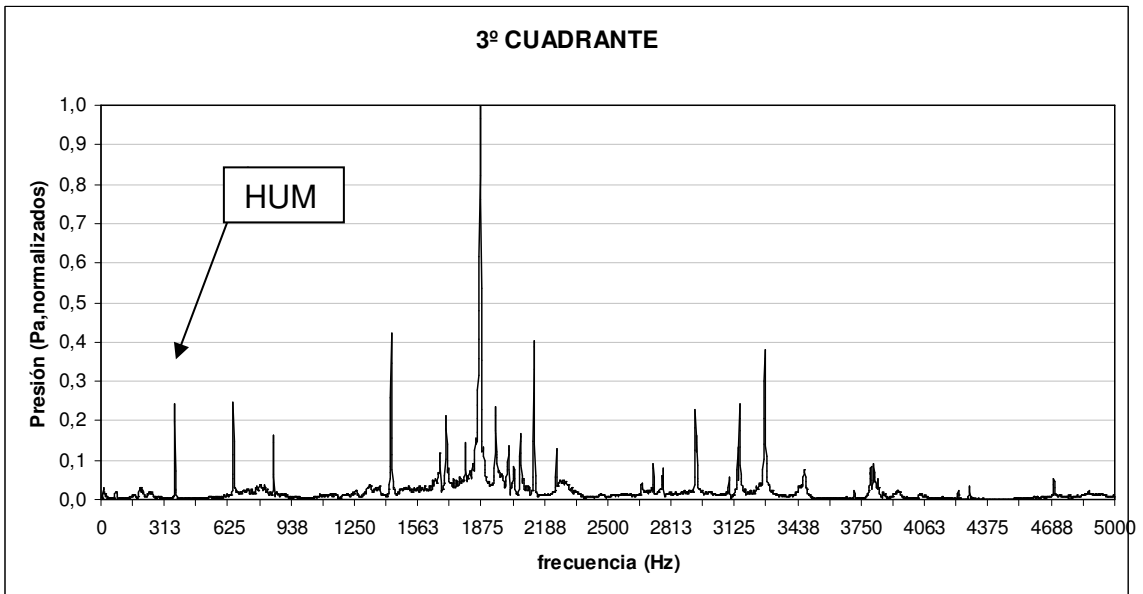
Fig.3.8 – (a) Fotografía de la situación del badajo dentro de la campana. (b) – Esquema de los cuatro cuadrantes en los que se dividió la campana, vista en planta.

Se capturaron tres grabaciones de 30 segundos por posición de golpeo. Una duración de 30 segundos nos asegura el amortiguamiento total del sonido después del golpeo.

A continuación vamos a analizar los espectros obtenidos a través del análisis FFT.

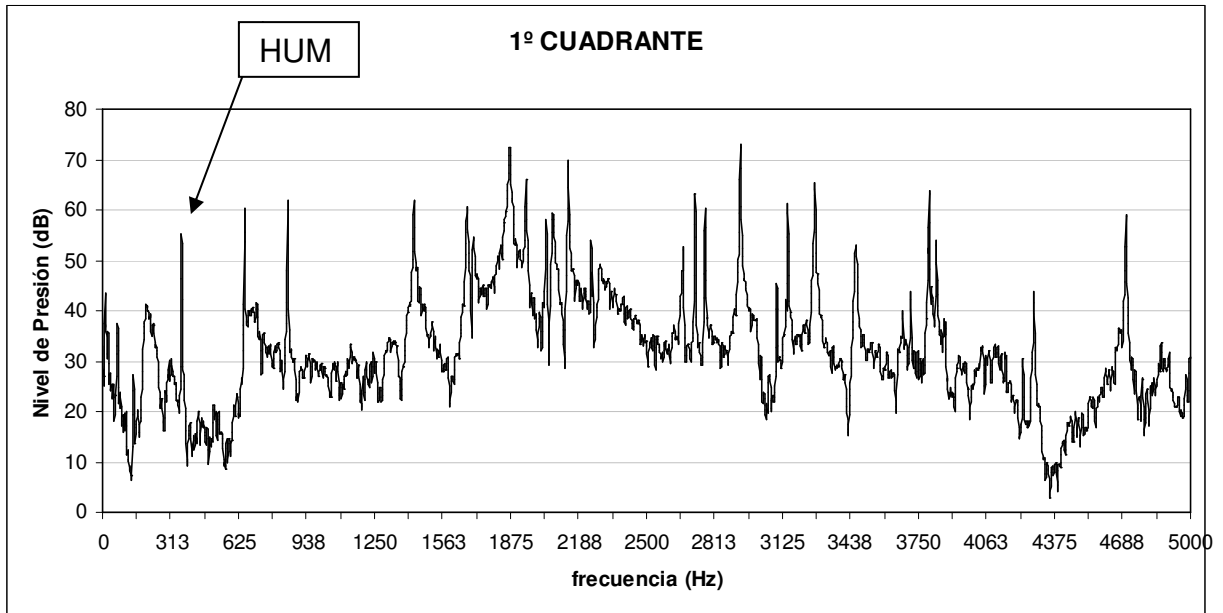


(a)

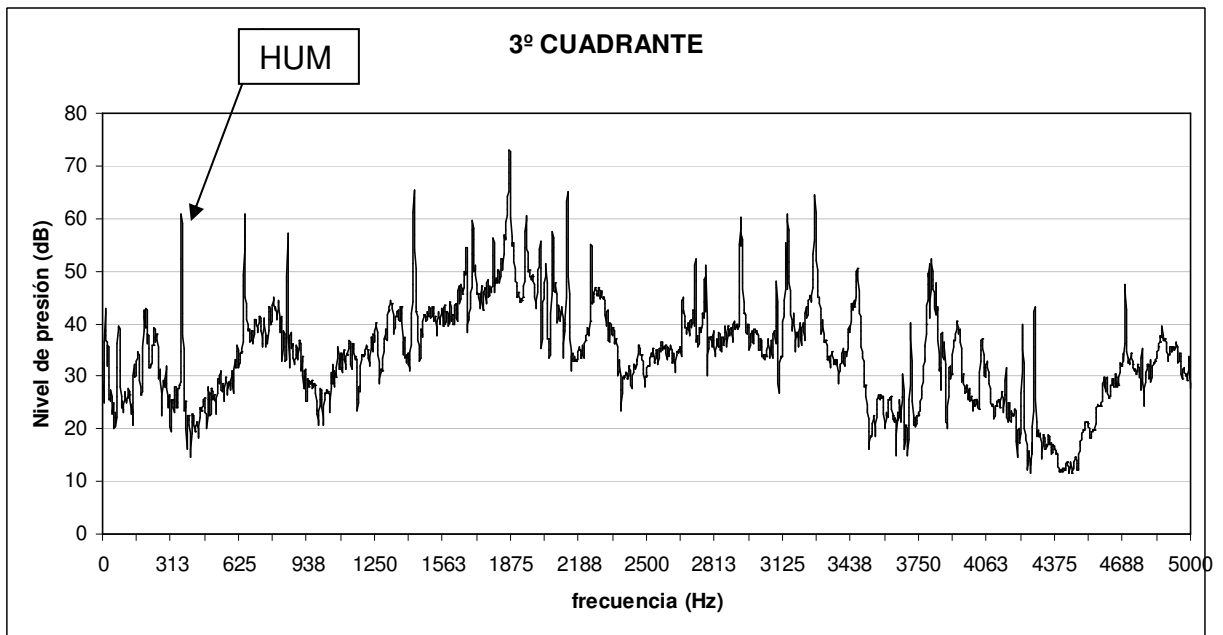


(b)

Fig.3.9– Gráficas de la respuesta en frecuencia de la campana frente a golpe de badajo en el primer (a) y tercer (b) cuadrante en presión normalizada.



(a)



(b)

Fig.3.10– Gráficas de la respuesta en frecuencia de la campana frente a golpe de badajo en el primer (a) y tercer (b) cuadrante, en niveles de presión.

CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT

En el caso del badajo observamos que el parcial HUM esta en la frecuencia 362,50 Hz, por lo que los demás parciales estarán próximos a las frecuencias halladas en la tabla de la figura 3.11.

HUM	1	362,5
PRIME	2	726,0
TIERCE	2,4	871,2
QUINT	3	1089,0
NOMINAL	4	1452,0
SUPERQUINT	6	2178,0
OCT.NOMINAL	8	2904,0

Fig.3.11– Tabla de los principales parciales teóricos de la campana frente a golpe de badajo.

En la tabla de la figura 3.12 están indicadas las frecuencias en hertzios con sus respectivas amplitudes en decibelios, los principales parciales (HUM, PRIME, etc.) identificados con sus notas musicales, en notación latina y europea. Las celdas de color gris claro corresponden a los parciales principales (Simpson) y las de gris oscuro a las frecuencias que se han excitado con más amplitud.

1º Hz	cuadrante dB	3º Hz	cuadrante dB	PARCIALES	NOTAS		
					europea	latina	
362,50	55,3	362,50	60,7	HUM	F(3)#-35	FA(3)# -35	
653,13	60,2	653,13	60,8	PRIME	E(4) -16	MI(4) -16	
851,56	62,0	851,56	57,2	TIERCE	A(4)b +41	LA(4)b +41	
1431,25	62,0	1431,25	65,5	NOMINAL	F(5) + 42	FA(5) + 42	
1676,56	60,6	1673,44	54,5		A(5)b +15	LA(5)b +15	
1704,69	54,7	1701,56	59,6		A(5)b +45	LA(5)b +45	
		1796,88	54,7				
1871,88	72,3	1870,31	73,0			Bb(5) +6	Slb(5) +6
1945,31	65,9	1946,88	60,5				
		2010,94	55,7				
2039,06	58,1	2037,5	51,4	SUPERQUINT	C(6) +37	DO(6) +37	
2068,75	59,3	2068,75	57,5				
2140,63	69,9	2135,94	65,1				
2245,31	53,9	2245,31	55,2				
2668,75	52,8	2667,19	45,1				
2721,88	63,3	2725,00	52,3				
2768,75	60,2	2773,44	51,1	OCT. NOMINAL	F#(6) -15	FA#(6) -15	
2932,81	73,0	2932,81	60,2				

CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT

		3098,44	48,0			
3148,44	61,4	3148,44	60,7		G(6) +7	SOL(6) +7
3273,44	65,3	3273,44	64,6		A(6)b -24	LA(6)b -24
3462,50	52,9	3468,75	50,6			
3715,63	43,9	3715,63	40,2			
3800,00	63,7	3800,00	51,4			
		3810,94	52,2			
3831,25	54,0					
		3928,13	40,6			
4228,13	30,5	4228,13	40,0			
4282,81	39,5	4284,38	43,2			
4704,69	58,9	4700,00	47,5			

Fig.3.12– Tabla de los principales parciales de la campana frente a golpe de badajo en el primer y tercer cuadrante, con sus notas musicales.

Si observamos la figura 3.10 y la tabla de la figura 3.12, se repara en que existe una similitud en cuanto a la excitación de los parciales en los dos cuadrantes. En las dos posiciones se excitan las mismas frecuencias, pero en cada cuadrante con distinta presión y con distinto valor máximo. Los parciales hallados en la tabla 3.10 son fácilmente identificados en la tabla de la figura 3.12, a excepción del parcial QUINT que no aparece.

A partir de los resultados obtenidos podemos decir que indistintamente donde se golpee la campana, ésta se comporta de la misma manera, puesto que sigue el mismo patrón de excitación.

Como mencionamos anteriormente el parcial que da la tonalidad a la campana es el PRIME, que en el caso del golpeo con badajo se encuentra en la frecuencia 653,13 Hz, que corresponde a un MI_4 -16 centésimas.

Para completar el estudio en frecuencia se ha utilizado el editor de audio Sound Forge 7.0 de la casa Sonic Foundry para extraer las representaciones en el tiempo y ver es espectro en banda estrecha en tiempo real. Y el programa dBFa32 para representar sonogramas.

Primero vamos a visualizar la historia temporal de la señal de audio recogida por el micrófono. Al haber captado tres grabaciones por posición para hacer los promediados, disponemos de seis señales de excitación de la campana por golpe de badajo, pero solo mostraremos una por cuadrante. La figura 3.13 muestra las señales temporales de los dos cuadrantes con sus amplitudes normalizadas.

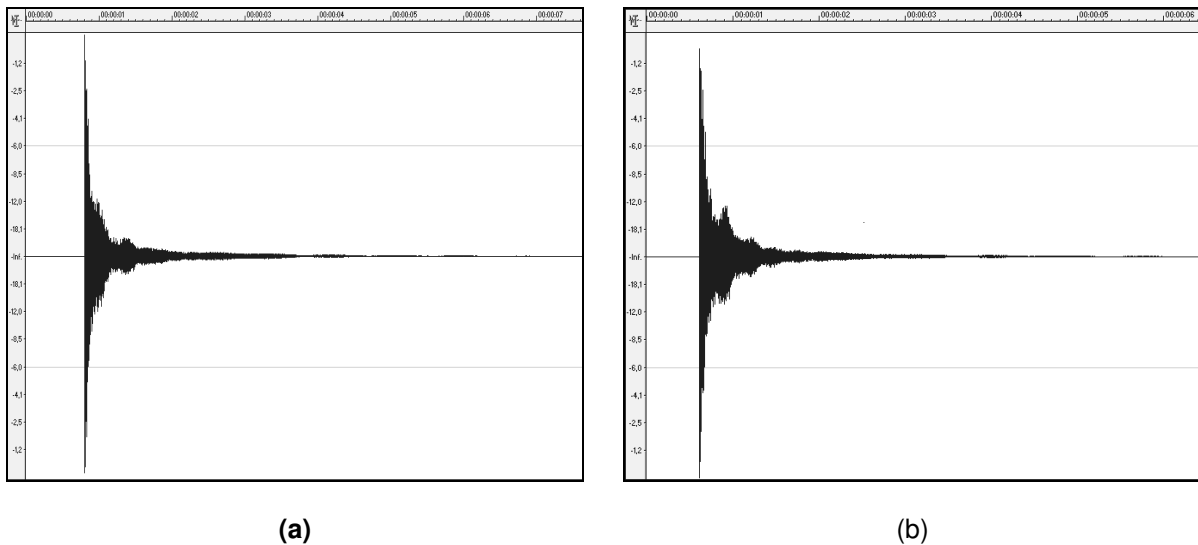


Fig.3.13– Gráficas con la respuesta temporal de la campana por golpe de badajo, en (a) primer cuadrante y (b) segundo cuadrante. Extraídas con el programa SOUND FORGE.

Se observa como hay un máximo de amplitud en el momento de golpeo y después una caída brusca a un nivel más bajo que se sostiene durante un cierto periodo de tiempo. Existe semejanza entre ambas, al igual que en el caso de la respuesta en frecuencia.

Si comparamos sus sonogramas, el resultado es el siguiente:

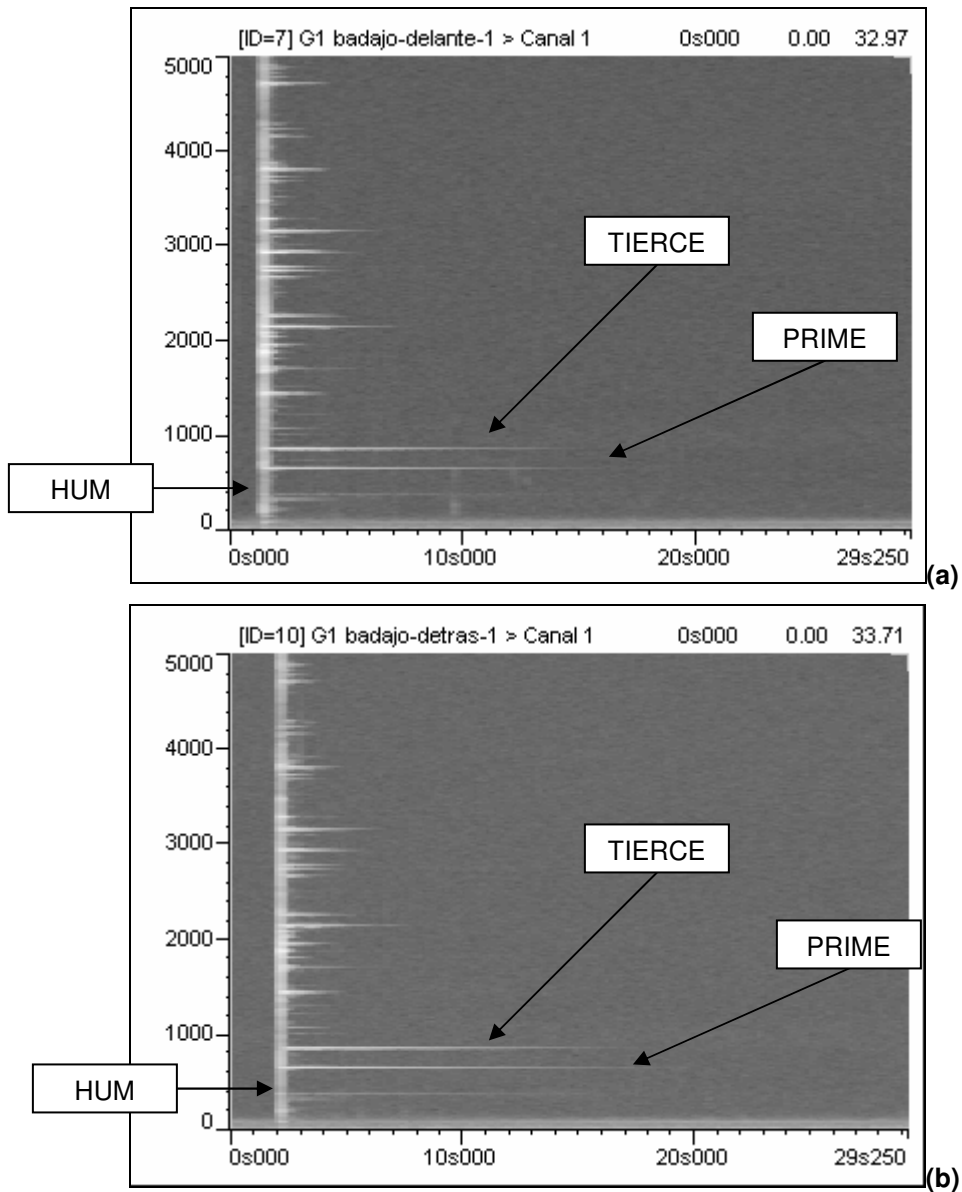


Fig.3.14– Sonogramas de la campana por golpe de badajo, en (a) primer cuadrante y (b) segundo cuadrante.

Los Sonogramas muestran en el eje x el tiempo, y en el eje y la frecuencia, mientras que en el plano xy se representa la intensidad con una gama de grises, cuanto más se aproxime el gris al blanco, más intensa es la frecuencia. Por lo que los parciales que más duran en el tiempo son el HUM, el PRIME y el TIERCE.

En resumen, la campana tiene el mismo patrón de excitación de parciales, y el PRIME esta localizado en 653,13 Hz en los dos cuadrantes. Por lo que, el sonido percibido al golpear la campana con el badajo es una nota $M1_4$ -16 centésimas, pero con distinto timbre en cada cuadrante al ser excitados los parciales con distinta amplitud en cada cuadrante.

3.2.5 EXCITACIÓN DE LA CAMPANA CON GOLPE DE MARTILLO

Para la grabación de la excitación de la campana con golpeo de martillo se ha realizado el mismo procedimiento que con el badajo. La figura 3.17 muestra el esquema del ensayo.

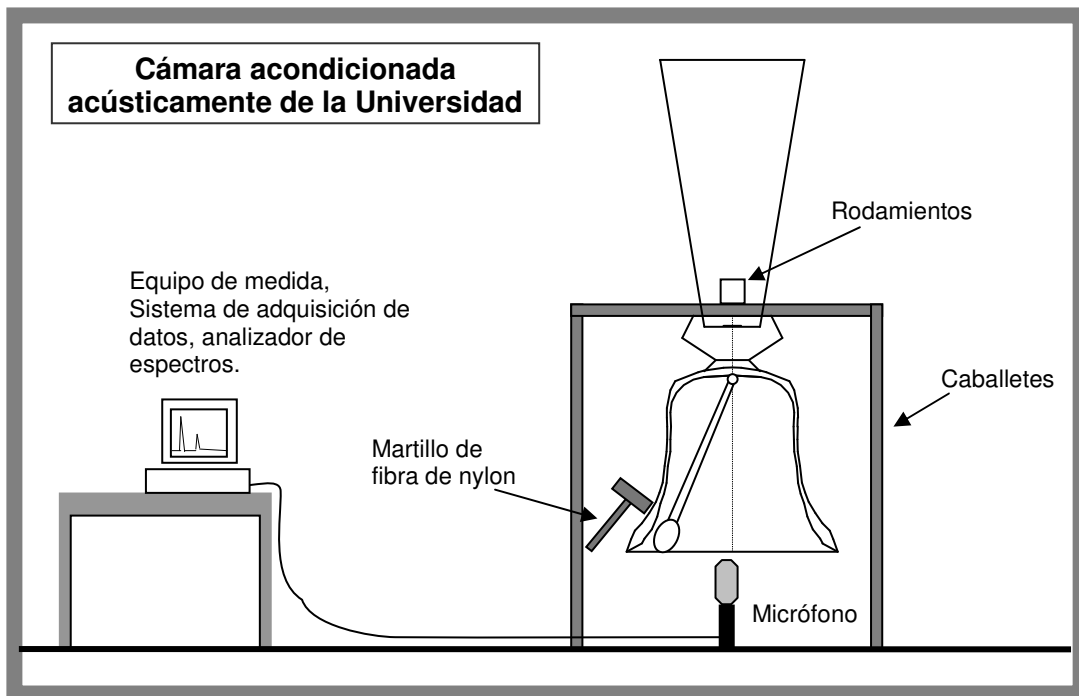


Fig.3.15 - Esquema de la disposición de la campana y la instrumentación en la sala acondicionada acústicamente.

El martillo utilizado es de fibra de nylon. Se optó por este tipo de martillo para obtener un resultado de compromiso, porque al no tener la base ni de goma ni de metal, no se excitan bajas ni altas frecuencias. El martillo es el siguiente:

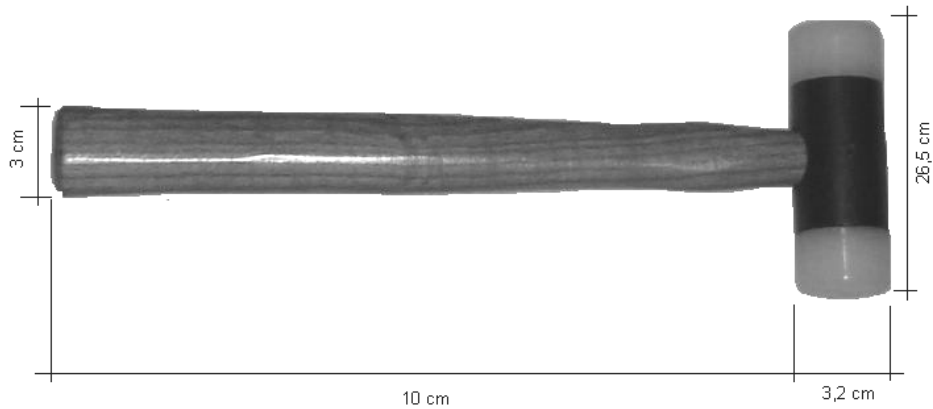


Fig.3.16.- Martillo de fibra de nylon utilizado para golpear la campana.

Con el propósito de estudiar el comportamiento en toda la altura de la campana, se ha golpeado en 10 puntos diferentes en altura, en sus cuatro cuadrantes. En la siguiente fotografía se observan dichos puntos dibujados sobre la campana para el primer cuadrante y el esquema en el que se muestran los cuadrantes

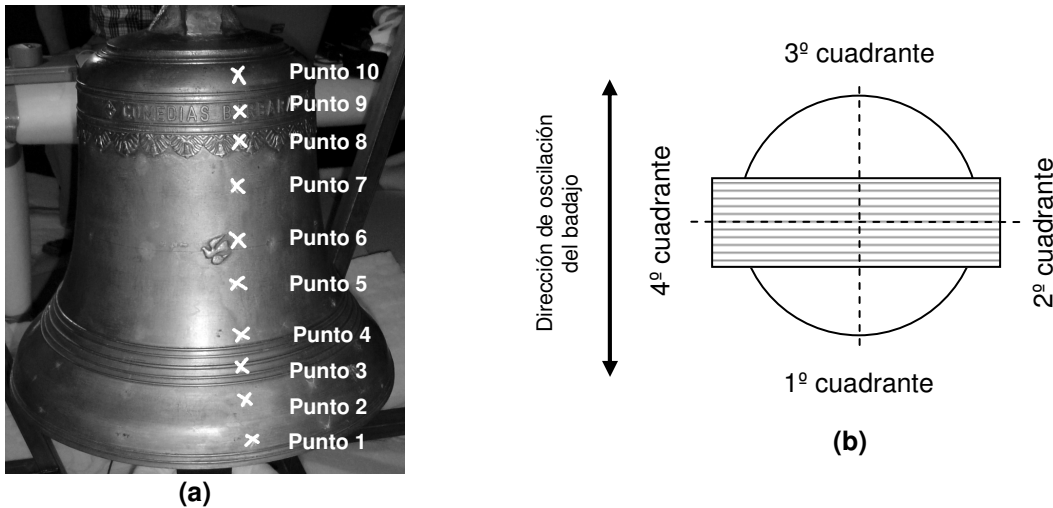


Fig.3.17- Ensayo mediante martillo de fibra de nylon.(a) Posición de los puntos en cada cuadrante. (b) División de la campana en cuadrantes.

CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT

A continuación se muestran los parciales más representativos que se obtuvieron del estudio de la respuesta en frecuencia de la campana frente a golpe con martillo. Los resultados se van a exponer por posiciones de golpeo y cuadrantes, empezando desde la primera que es la que se encuentra en la boca de la campana, y terminando en la décima, que está localizada en la corona.

Por cada posición los resultados se exponen mediante representaciones en el dominio del tiempo y en el de la frecuencia, además de una tabla comparativa de los cuatro cuadrantes, en la que se indican las frecuencias en las que se detectan los siete parciales principales y sus notas musicales.

En el Anexo 1 se incluye una tabla por posición de golpeo con la detección de la mayor parte de los parciales con sus niveles de presión, y la identificación de los principales.

- **POSICIÓN 1**

En la figura 3.18 se muestra la evolución temporal de la señal captada por el micrófono con sus amplitudes normalizadas. Se aprecia que existe similitud entre los cuadrantes 1-3 y 2-4. Se observa el máximo de amplitud en el momento de golpeo y en seguida la caída brusca de la amplitud. Se observan más definidos los “paquetes” de amplitud en los cuadrantes 2 y 4.

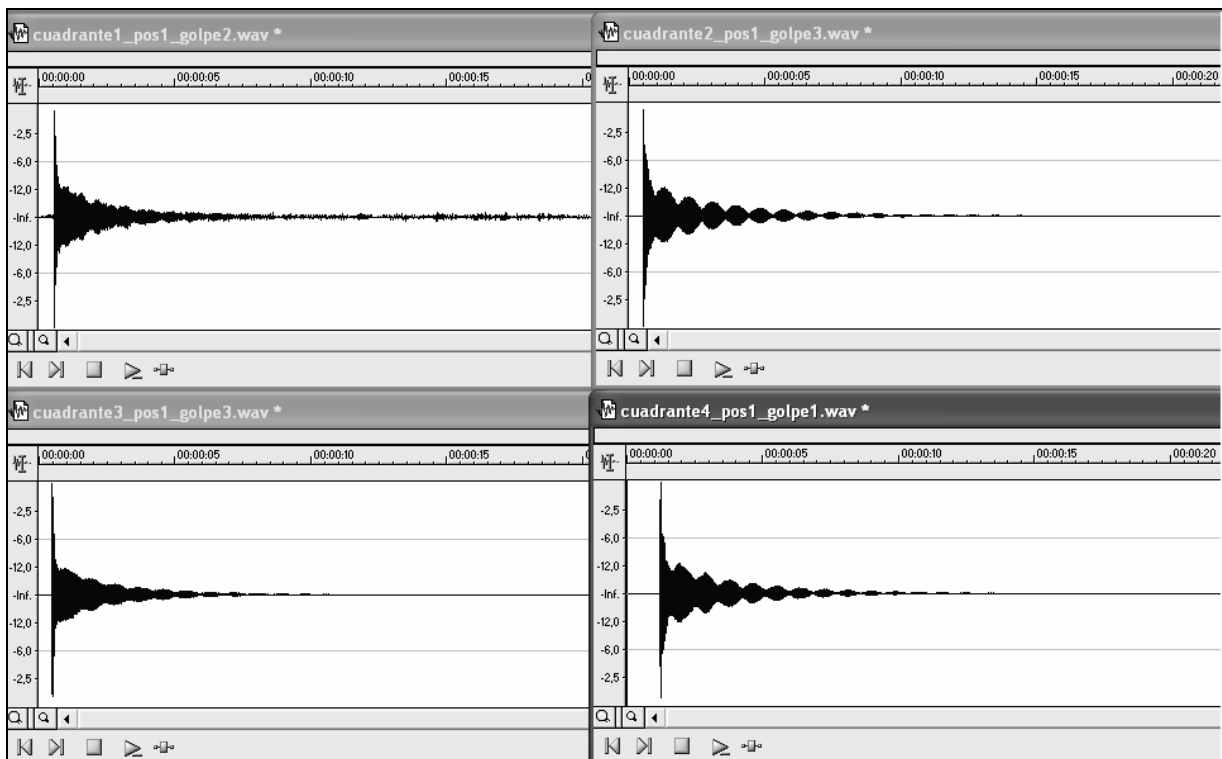
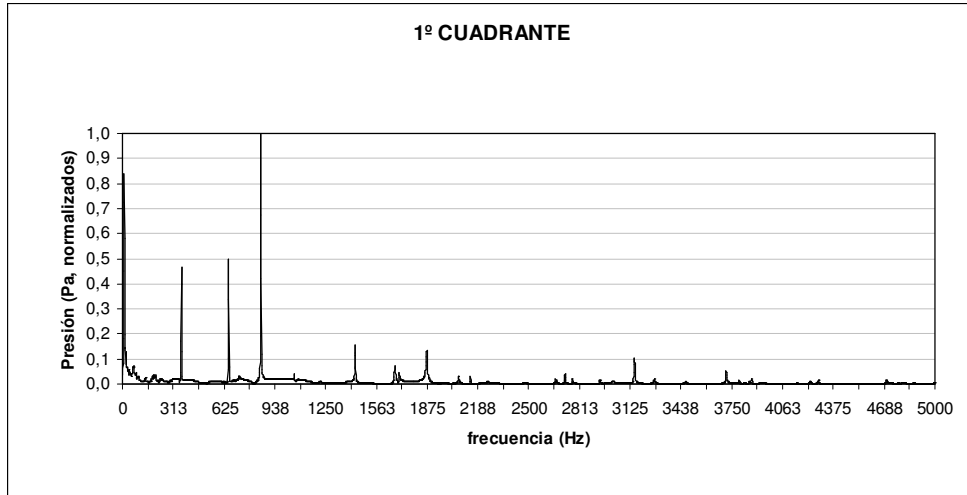


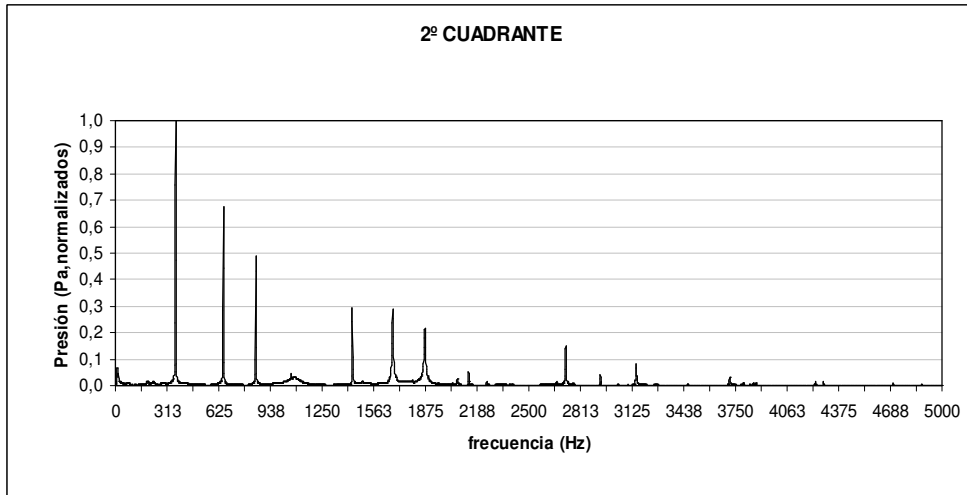
Fig.3.18– POSICIÓN 1: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.

A continuación se exponen los resultados obtenidos a través del análisis en frecuencia. Primero se muestran los espectros de dichas señales y seguidamente los parciales detectados en cada cuadrante con sus notas musicales correspondientes, tanto en notación latina como europea.

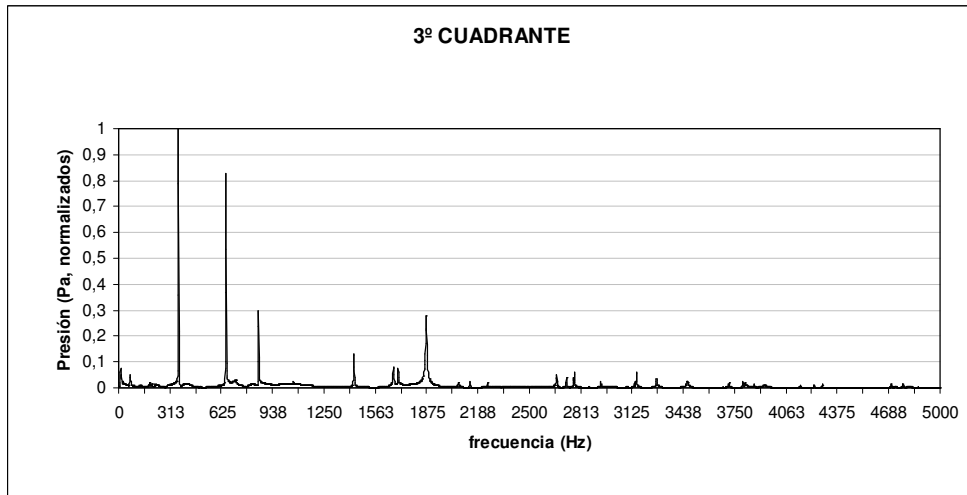
CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT



(a)



(b)



(c)

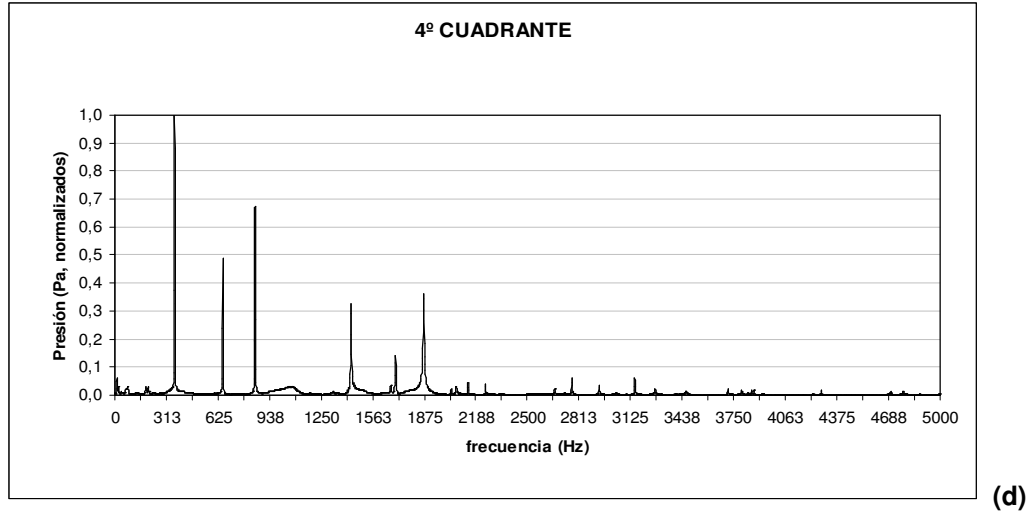


Fig. 3.19.- POSICIÓN 1: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo.

1º cuadrante	2º cuadrante	3º cuadrante	4º cuadrante	PARCIALES	NOTAS	
Hz	Hz	Hz	Hz		europaea	latina
362,50	364,06	362,50	362,50	HUM	F(3)#-35	FA(3)# -35
653,13	653,13	653,13	653,13	PRIME	E(4) -16	MI(4) -16
851,56	850,00	851,56	850,00	TIERCE	A(4)b +41	LA(4)b +41
1057,81	1064,06	1064,06	1062,50	QUINT	C(5) +25	DO(5) +25
1431,25	1431,25	1431,25	1431,25	NOMINAL	F(5) +42	FA(5) +42
2140,63	2135,94	2135,94	2140,63	SUPERQUINT	C(6) +36	DO(6) +36
2932,63	2932,81	2932,81	2932,81	OCT.NOMINAL	F(6) -44	FA(6) -44

Fig. 3.20– POSICIÓN 1: Tabla con los principales parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.

En la primera posición la campana presenta el mismo comportamiento en sus cuatro cuadrantes, puesto que se excitan las mismas frecuencias, pero en cada uno con distinta presión y con distinto valor máximo. Por lo que el tono que percibimos es el mismo, pero el timbre no.

Para los cuadrantes 2-3-4 el parcial más intenso es el HUM y para el cuadrante 1 el TIERCE. Se observa que los cuadrantes 1-3 y 2-4, se comportan de forma parecida entre ellos. Una similitud visible entre ellos está en las frecuencias 1431,25 Hz, 1676,56 Hz y 1871,88 Hz, que están más excitadas en los cuadrantes 2 y 4.

- POSICIÓN 2

La posición 2 corresponde al mismo punto donde el badajo hace contacto con la campana (ver figura 3.17), por ello haremos un análisis más completo.

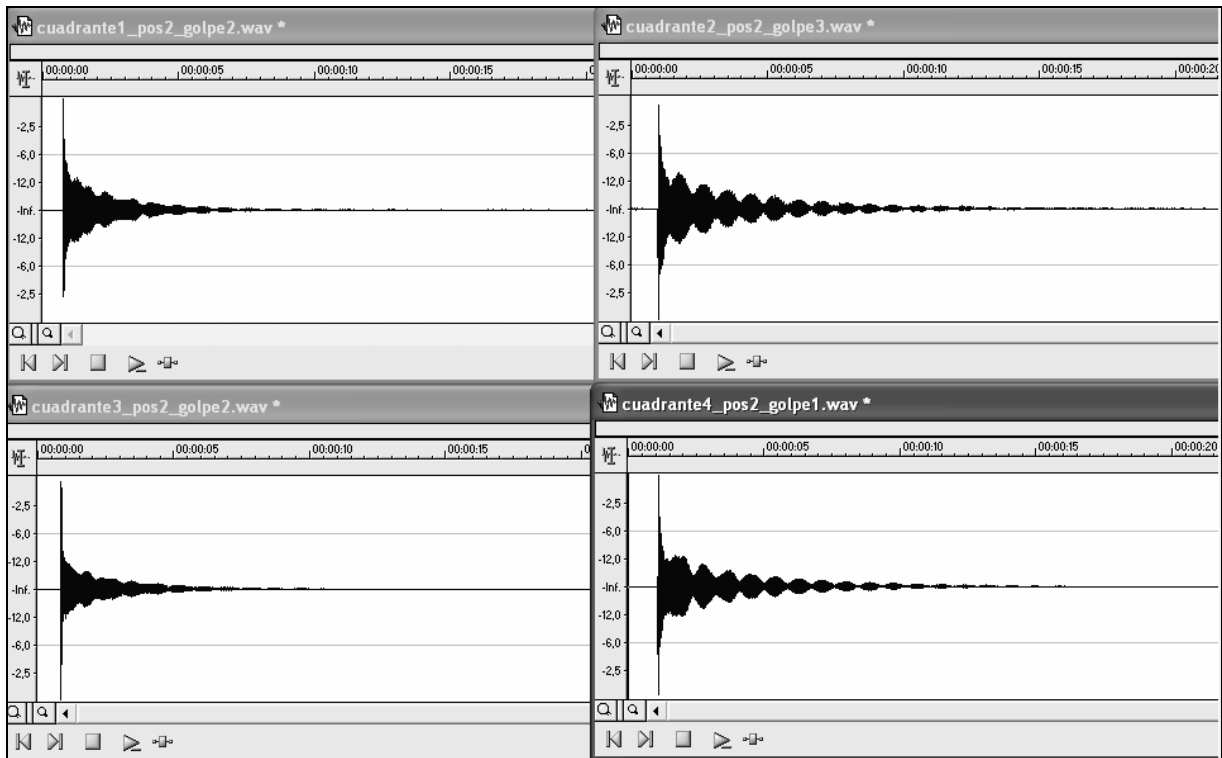


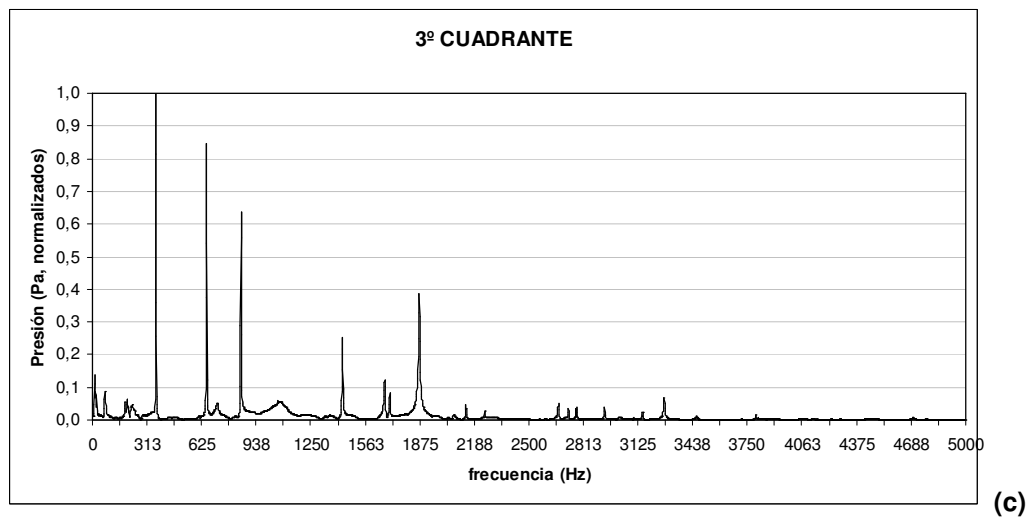
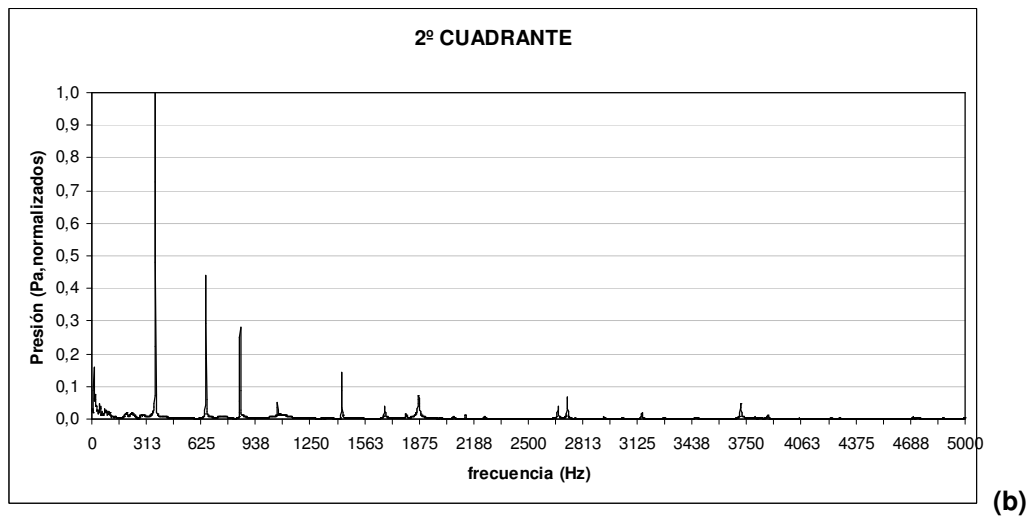
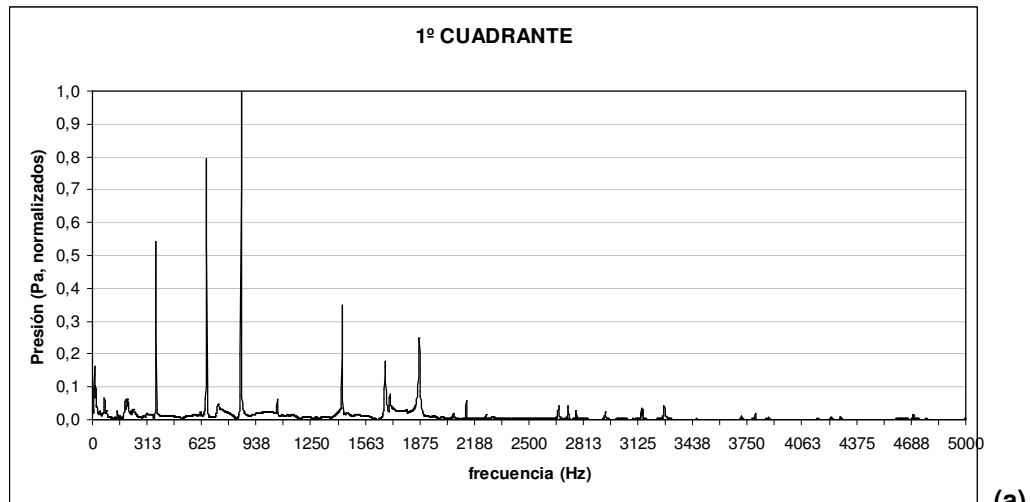
Fig.3.21– POSICIÓN 2: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.

Se sigue apreciando la semejanza entre las respuestas en cuadrantes opuestos.

La respuesta en el tiempo en los cuadrantes 1-3 coincide con la obtenida con el badajo (ver figura 3.13).

En las figura 3.22 y 3.23 se muestran los resultados del estudio en frecuencia de esta posición.

CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT



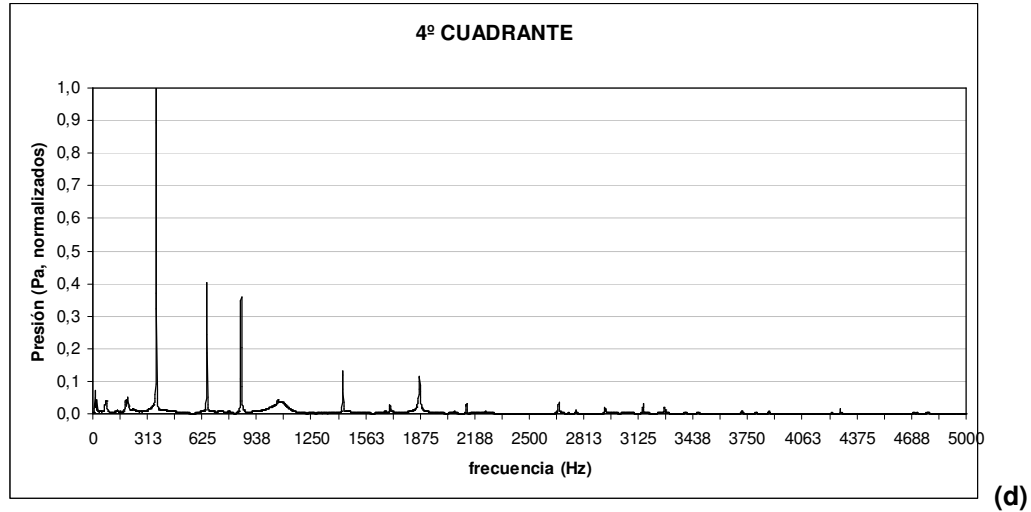


Fig.3.22.- POSICIÓN 2: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo.

1º cuadrante	2º cuadrante	3º cuadrante	4º cuadrante	PARCIALES	NOTAS	
Hz	Hz	Hz	Hz		europaea	latina
362,50	364,06	362,50	362,50	HUM	F(3)#-35	FA(3)# -35
653,13	653,13	653,13	653,13	PRIME	E(4) -16	MI(4) -16
851,56	850,00	851,56	850,00	TIERCE	A(4)b +41	LA(4)b +41
1057,81	1064,06	1064,06	1064,06	QUINT	C(5) +25	DO(5) +25
1431,25	1431,25	1431,25	1431,25	NOMINAL	F(5) +42	FA(5) +42
2140,63	2137,50	2135,94	2140,63	SUPERQUINT	C(6) +36	DO(6) +36
2939,06	2932,81	2932,81	2932,81	OCT.NOMINAL	F(6) -44	FA(6) -44

Fig. 3.23– POSICIÓN 2: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.

En esta posición también se excitan los mismos parciales en todos los cuadrantes y coinciden con los de la posición 1. Por lo que en las dos posiciones la campana produce el mismo tono, un MI₄ -16 centésimas. Vemos que en el primer cuadrante el parcial más intenso es el TIERCE y que en los demás es el HUM.

En la figura 3.24 se vuelve a ver un comportamiento similar en los cuadrantes opuestos en la excitación de las frecuencias 1431,25 Hz, 1676,56 Hz y 1871,88 Hz, tal y como ocurría en la posición anterior. También se observan diferencias en el rango de frecuencia de 2600 – 2900 Hz, ya que en los cuadrantes 1-3 existen tres

CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT

picos claramente definidos, mientras que en los cuadrantes 2-4 están deformados. En la siguiente figura se muestra esta última diferencia entre los cuadrantes 1-3 con respecto 2-4.

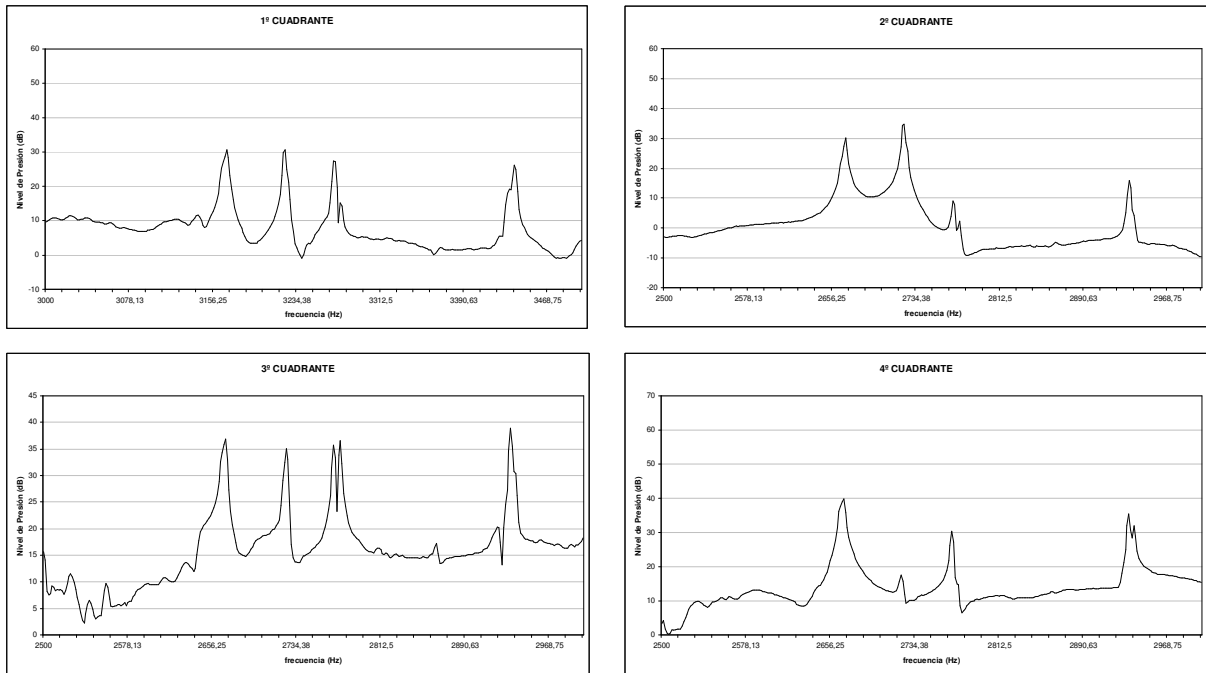


Fig. 3.24– Representación en niveles de presión el rango de frecuencias 2600-2900Hz, en los cuatro cuadrantes.

Seguidamente se van a analizar los sonogramas de cuatro señales de audio, una por cuadrante (las mismas señales representadas en la figura 3.21).

CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT

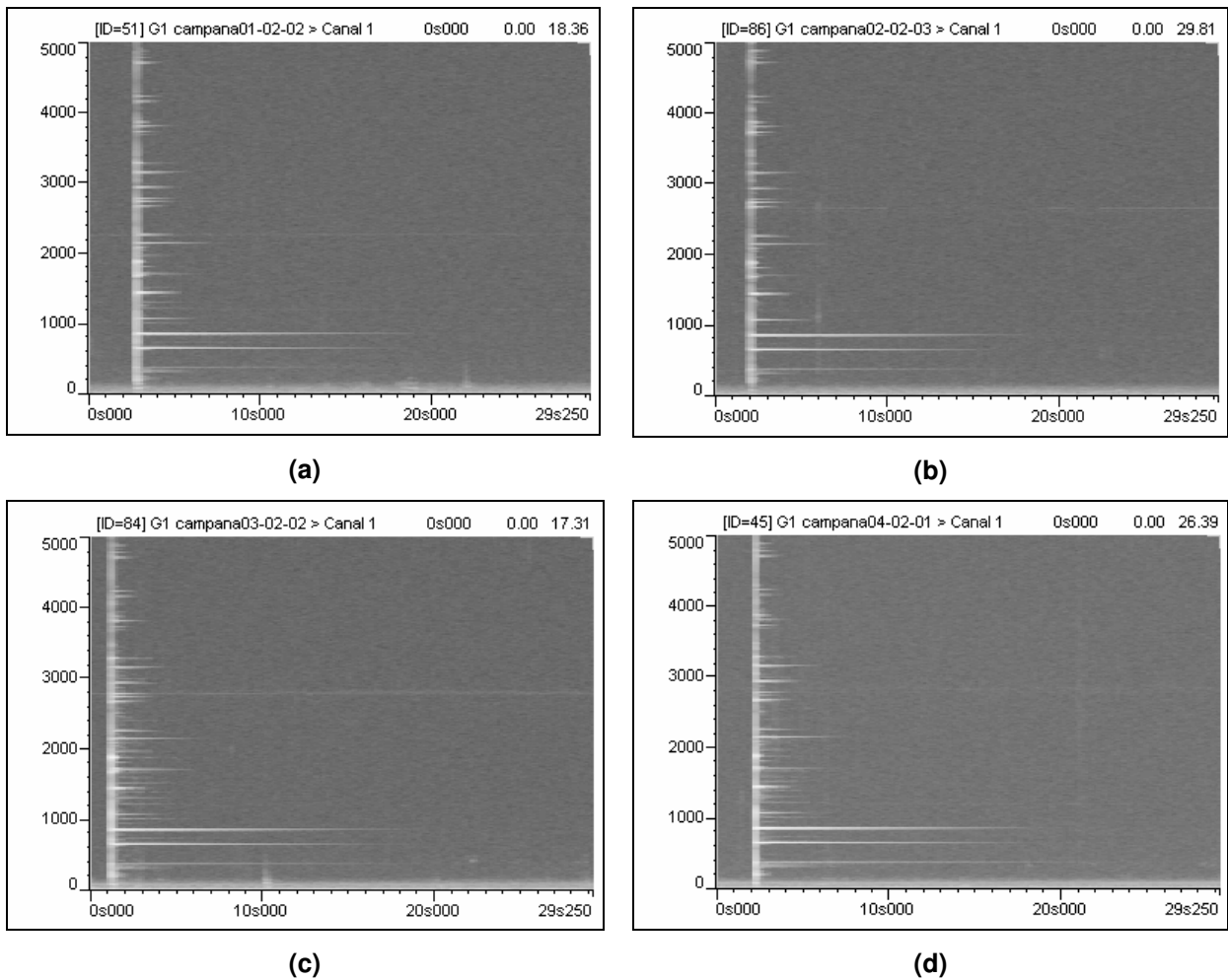


Fig. 3.25– Sonogramas de las grabaciones captadas por el micrófono. (a) Cuadrante 1, (b) cuadrante 2, (c) cuadrante 3 y (d) cuadrante 4.

Con esta visualización se aprecia que el comportamiento de la campana es prácticamente el mismo en los cuatro cuadrantes, teniendo a los parciales HUM, PRIME y TIERCE como las frecuencias que más perduran en el tiempo. Si hacemos la comparación entre cuadrantes observamos como en el cuarto cuadrante el parcial HUM es el que más tarda en desaparecer mientras que en los demás los tres parciales más intensos duran aproximadamente lo mismo. En comparación con el golpe de badajo, se observa que en este caso el HUM repercute más en el sonido, esto es debido a que el contacto de la campana con el martillo es fibra de nylon, y excita frecuencias más bajas que las que excita el badajo por ser de bronce.

- **POSICIÓN 3**

La posición 3 se encuentra en medio del arco sonoro y de la copa de la campana (ver figura 2.2 y 3.17). Como veremos a continuación volvemos a encontrar similitud entre los cuadrantes 1-3 y 2-4 en la respuesta temporal. Pero los “paquetes” en este caso tienen mayor amplitud y duran más en el tiempo.

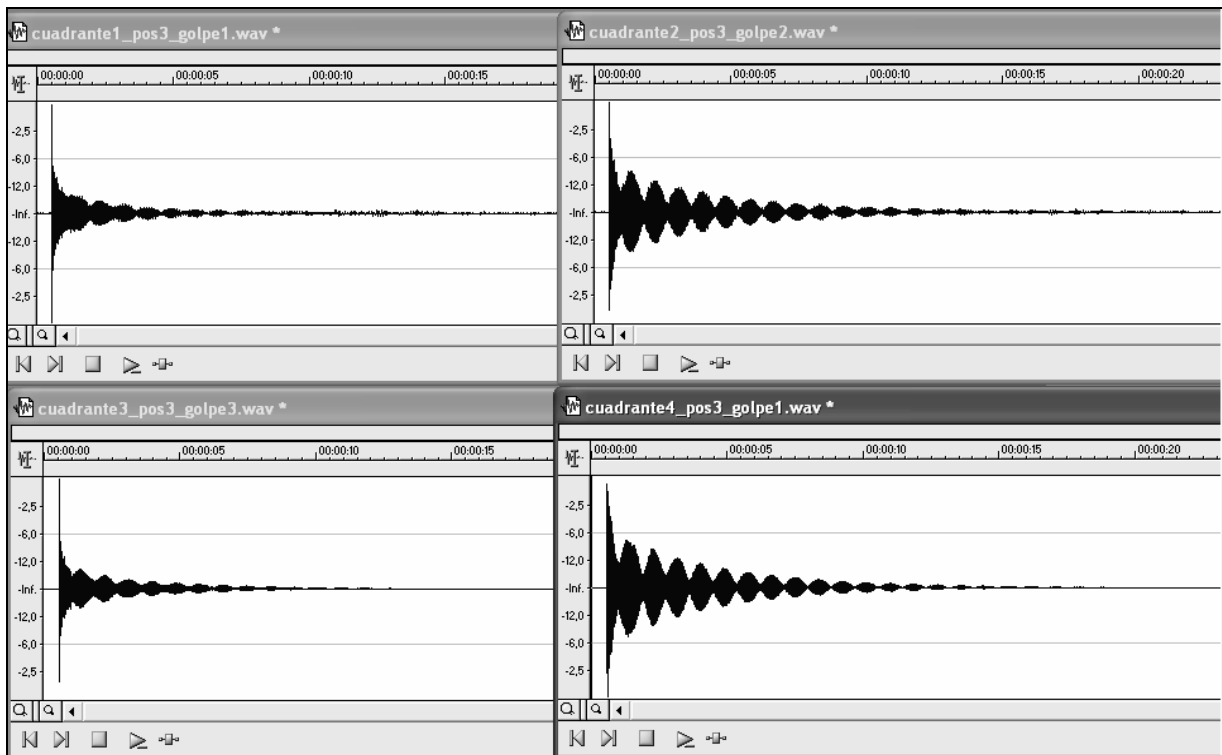
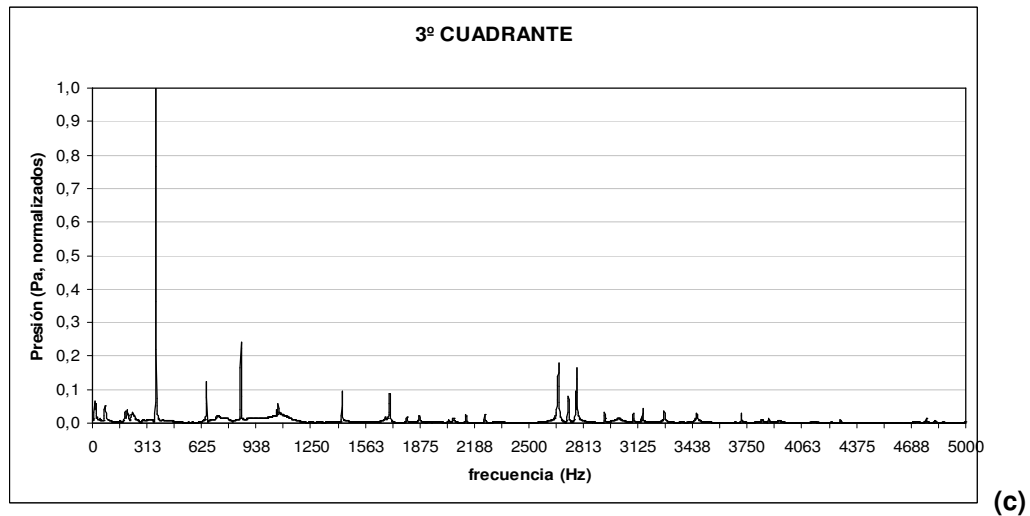
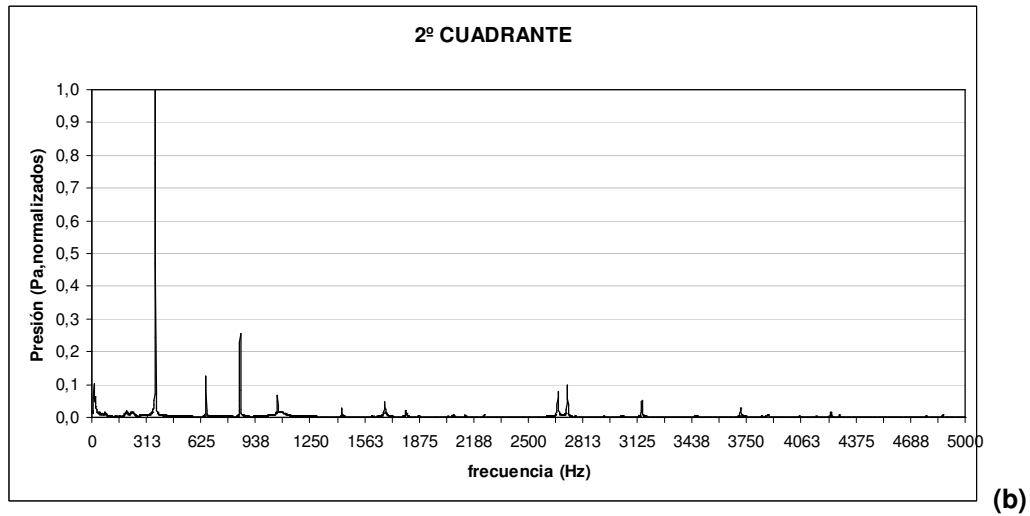
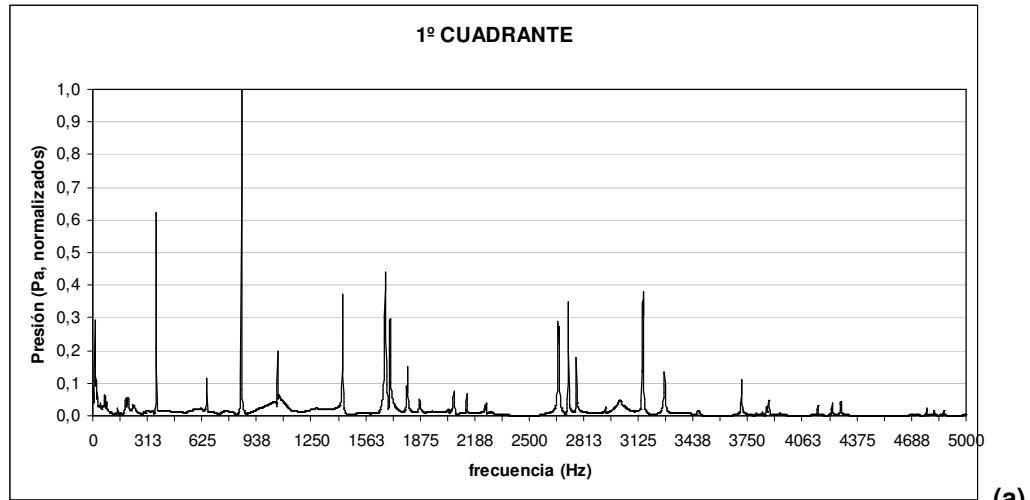


Fig.3.26– POSICIÓN 3: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.

A continuación estudiaremos la respuesta en frecuencia de las grabaciones captadas con el micrófono.

CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT



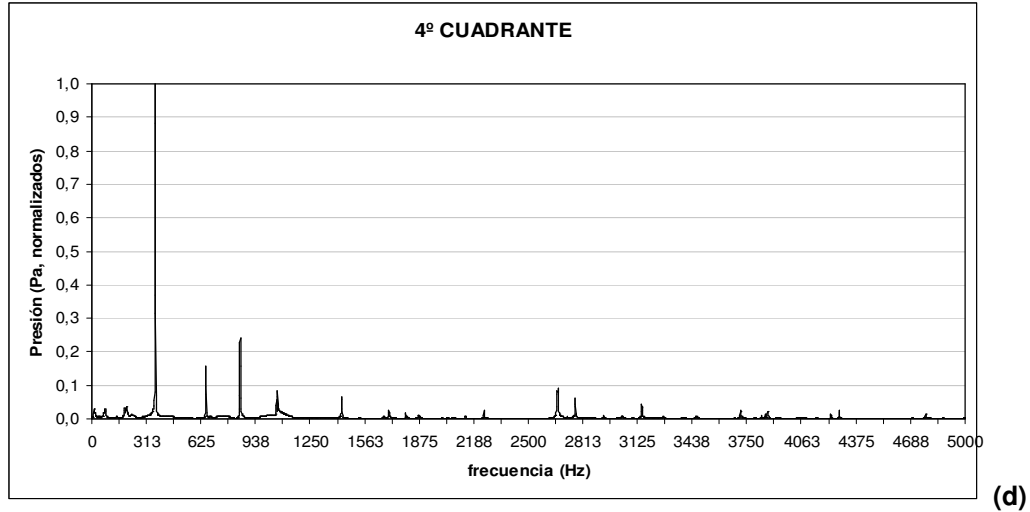


Fig. 3.27.- POSICIÓN 3: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo.

1º cuadrante	2º cuadrante	3º cuadrante	4º cuadrante	PARCIALES	NOTAS	
Hz	Hz	Hz	Hz		europaea	latina
362,50	364,06	362,50	362,50	HUM	F(3)#-35	FA(3)# -35
653,13	653,13	653,13	653,13	PRIME	E(4) -16	MI(4) -16
851,56	850,00	850,00	850,00	TIERCE	A(4)b +41	LA(4)b +41
1057,81	1064,06	1064,06	1064,06	QUINT	C(5) +25	DO(5) +25
1431,25	1431,25	1431,25	1431,25	NOMINAL	F(5) +42	FA(5) +42
2140,63	2135,94	2135,94	2140,63	SUPERQUINT	C(6) +36	DO(6) +36
2937,50	2932,81	2932,81	2932,81	OCT.NOMINAL	F(6) -44	FA(6) -44

Fig. 3.28– POSICIÓN 3: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.

Volvemos a observar que se excitan las mismas frecuencias que en las anteriores posiciones. En el primer cuadrante el parcial más intenso se encuentra en la frecuencia de 851,56 Hz (TIERCE) y en los demás cuadrantes esta en torno a 362 Hz (HUM). En la representación del espectro volvemos a observar que en los cuadrantes 1-3 las frecuencias 1431,25 Hz, 1676,56 Hz y 1871,88 Hz son más intensas. Además vemos que el primer cuadrante excita con más los parciales.

- **POSICIÓN 4**

La posición 4 es la primera de las posiciones de la copa de la campana (figura 3.17).

A continuación vemos la evolución temporal de cuatro señales de audio, una por cuadrante.

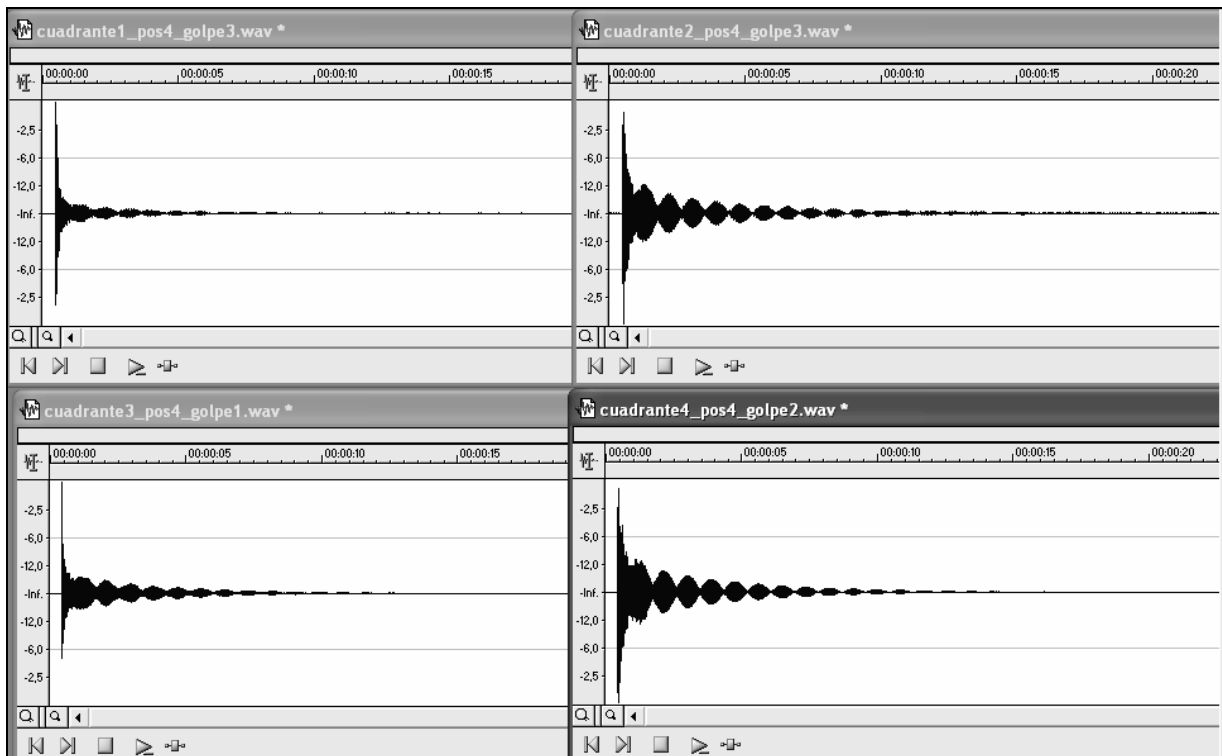
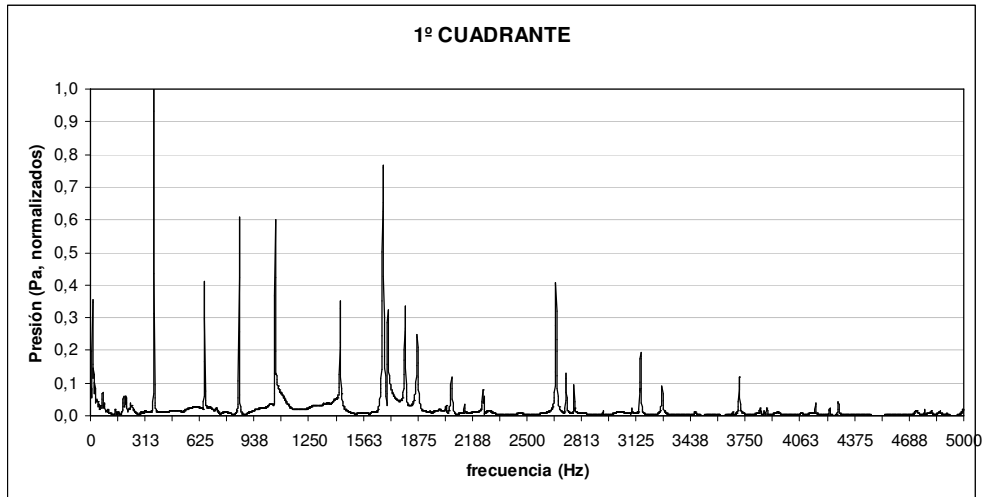


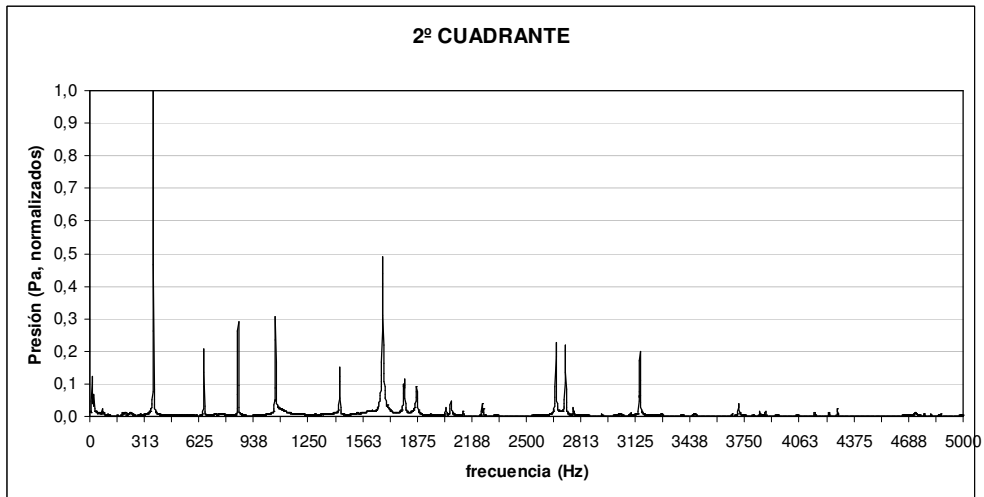
Fig.3.29– POSICIÓN 4: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.

En esta posición empezamos a ver como se va igualando la respuesta en el dominio del tiempo en los cuadrantes. Aunque las respuestas siguen siendo parecidas en cuadrantes opuestos.

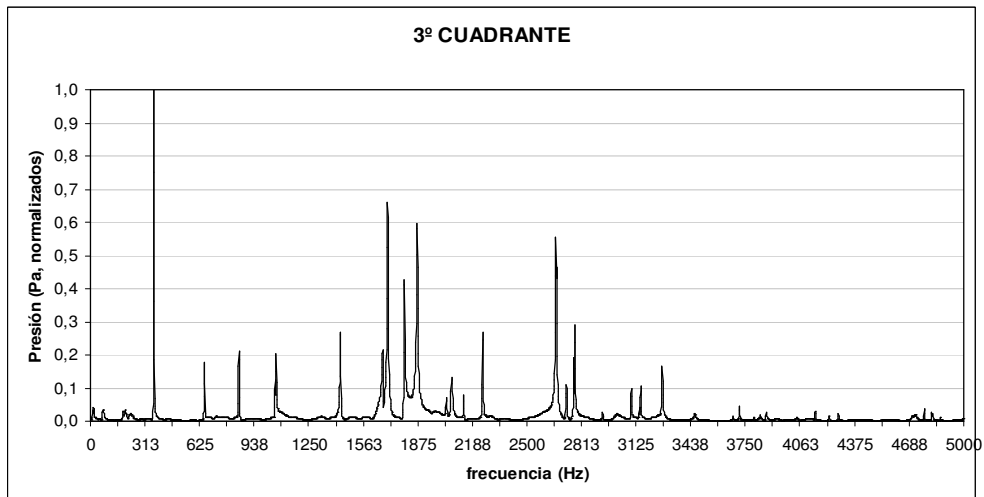
CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT



(a)



(b)



(c)

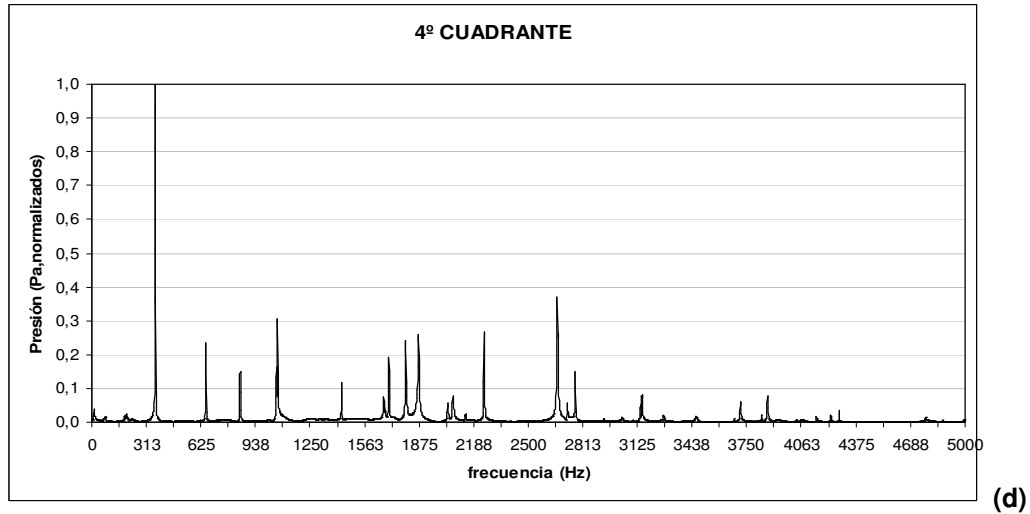


Fig. 3.30.- POSICIÓN 4: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo.

1º cuadrante	2º cuadrante	3º cuadrante	4º cuadrante	PARCIALES	NOTAS	
Hz	Hz	Hz	Hz		europaea	latina
364,06	364,06	362,50	362,50	HUM	F(3)#-35	FA(3)# -35
653,13	653,13	653,13	653,13	PRIME	E(4) -16	MI(4) -16
851,56	850,00	850,00	850,00	TIERCE	A(4)b +41	LA(4)b +41
1057,81	1064,06	1064,06	1064,06	QUINT	C(5) +25	DO(5) +25
1431,25	1431,25	1432,81	1431,25	NOMINAL	F(5) +42	FA(5) +42
2140,63	2135,94	2135,94	2135,94	SUPERQUINT	C(6) +36	DO(6) +36
				OCT.NOMINAL		

Fig. 3.31– POSICIÓN 4: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.

En la cuarta posición se observa un cambio con respecto a las anteriores posiciones, en los cuatro cuadrantes coincide el parcial más intenso y no tenemos el OCTAVE NOMINAL.

Por lo demás la campana se comporta de la misma manera, los espectros son muy parecidos, al excitarse las mismas frecuencias. Con respecto a las similitudes entre cuadrantes 1-3 y 2-4, se aprecia que en el intervalo de 1678 Hz a 1885 Hz existen tres picos que se excitan más en los cuadrantes 1-3.

- **POSICIÓN 5**

Observando la figura 3.32 continúa apreciándose el paralelismo entre cuadrantes 1-3 y 2-4.

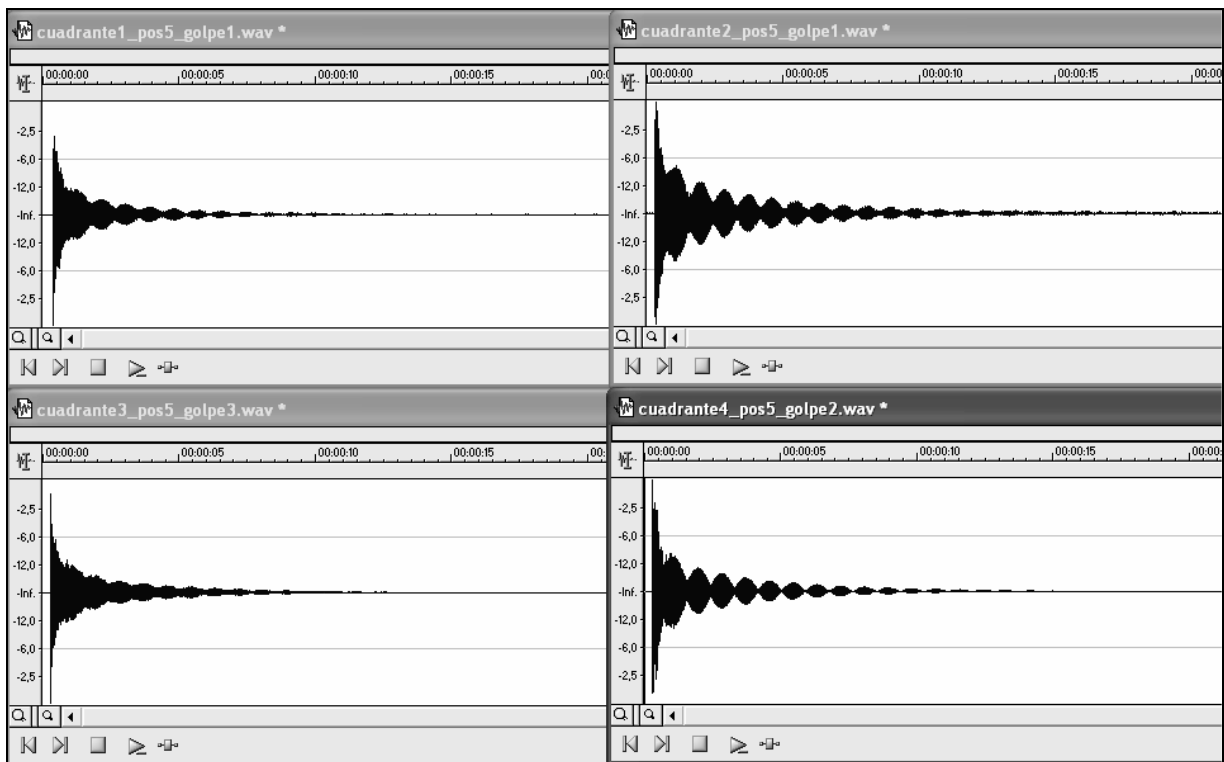
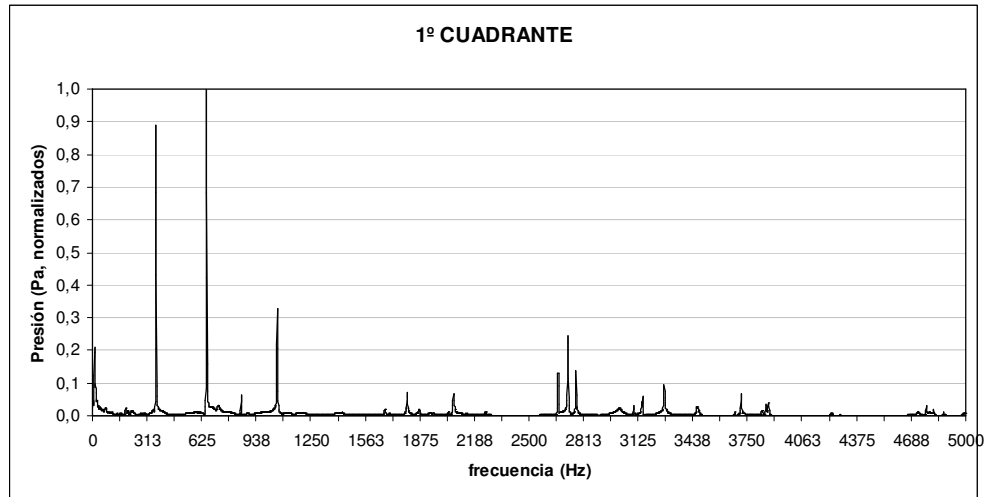
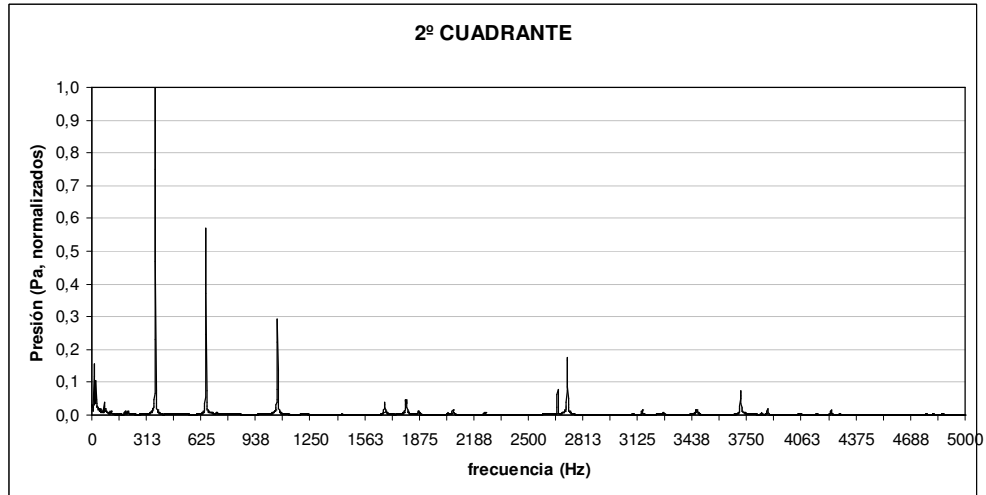


Fig.3.32– POSICIÓN 5: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.

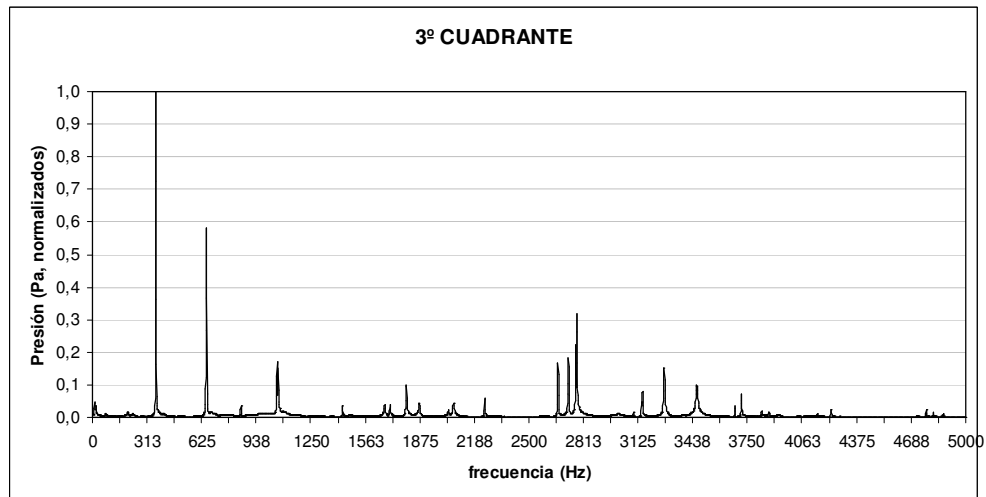
CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT



(a)



(b)



(c)

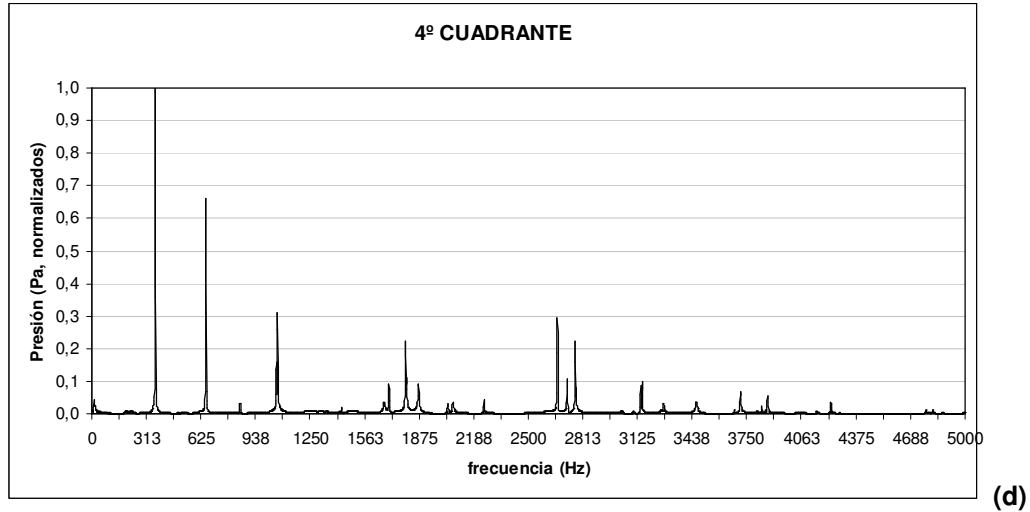


Fig. 3.33.- POSICIÓN 5: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo.

1º cuadrante	2º cuadrante	3º cuadrante	4º cuadrante	PARCIALES	NOTAS	
Hz	Hz	Hz	Hz		europaea	latina
364,06	364,06	362,5	362,5	HUM	F(3)#-35	FA(3)# -35
653,13	653,13	653,13	653,13	PRIME	E(4) -16	MI(4) -16
850	850	850	850	TIERCE	A(4)b +41	LA(4)b +41
1057,81	1064,06	1057,81	1064,06	QUINT	C(5) +25	DO(5) +25
1429,69		1431,25	1431,25	NOMINAL	F(5) +42	FA(5) +42
				SUPERQUINT		
				OCT.NOMINAL		

Fig. 3.34– POSICIÓN 5: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.

La posición cinco esta localizada prácticamente a la mitad de la altura de la campana. En este caso el SUPERQUINT y el OCTAVE NOMINAL no están excitados, puesto que deberían encontrarse en frecuencias entorno a 2140 Hz y 2930 Hz respectivamente (ver ANEXO 1, figura A1.5). Además tampoco encontramos el parcial NOMINAL en el segundo cuadrante.

El primer cuadrante se diferencia de los restantes en que su parcial más intenso es el PRIME, mientras que en los demás es el HUM, como ya ocurría en posiciones anteriores.

- POSICIÓN 6

La posición seis esta situada justo a media altura de la copa de la campana.

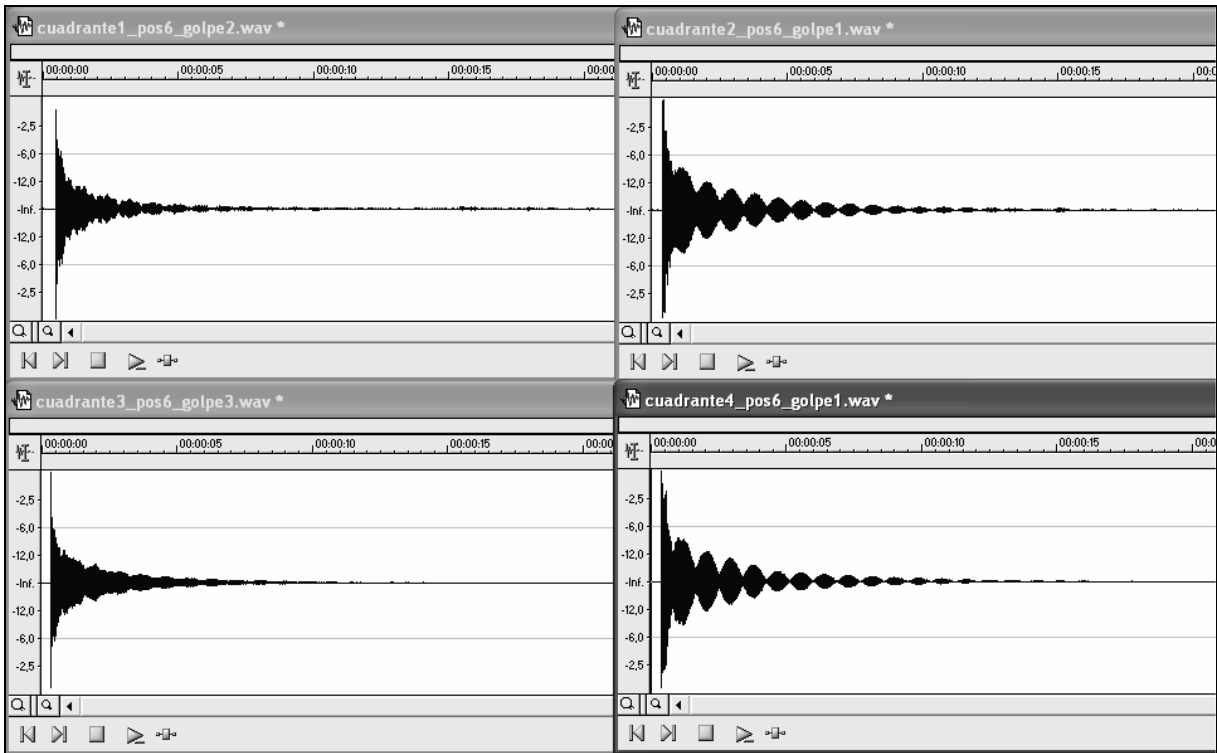
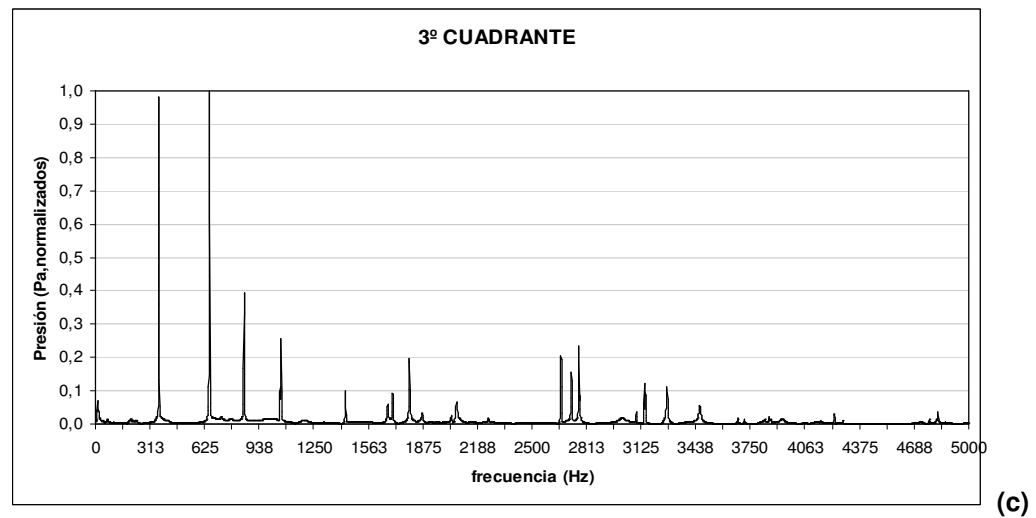
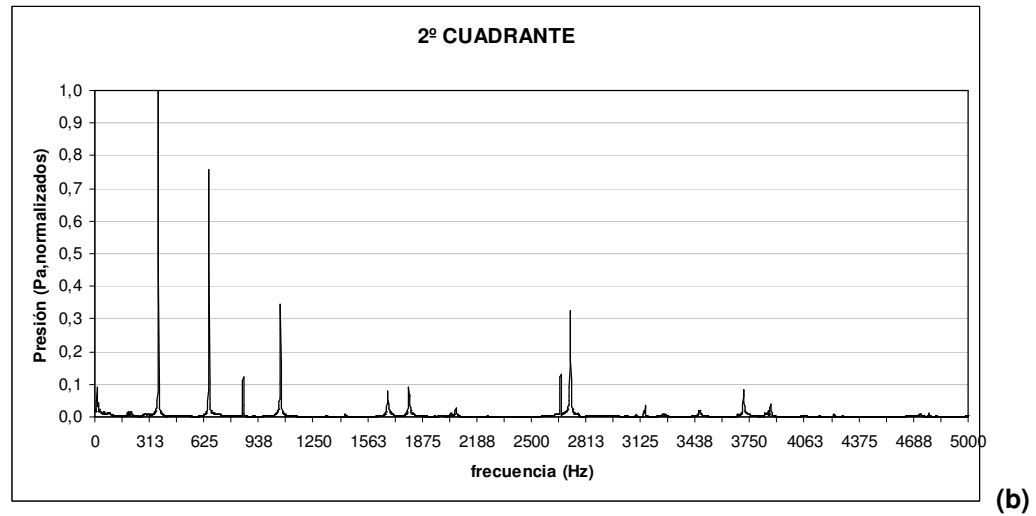
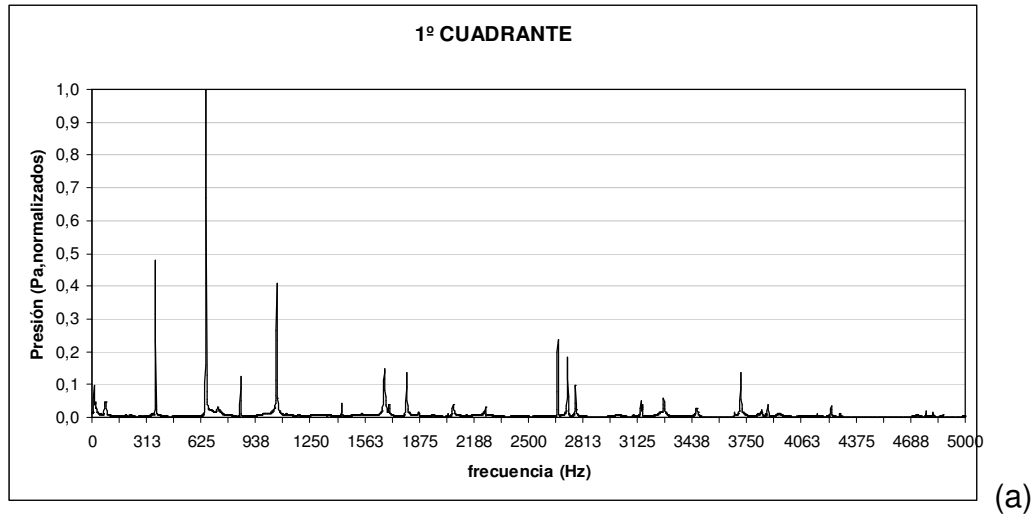


Fig.3.35– POSICIÓN 6: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.

Observando la figura 3.35, se aprecia que la respuesta en el tiempo es parecida a la de las posiciones 2 y 3 (figura 3.21 y 3.26).

A continuación se muestra la respuesta frecuencial en cada cuadrante.

CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT



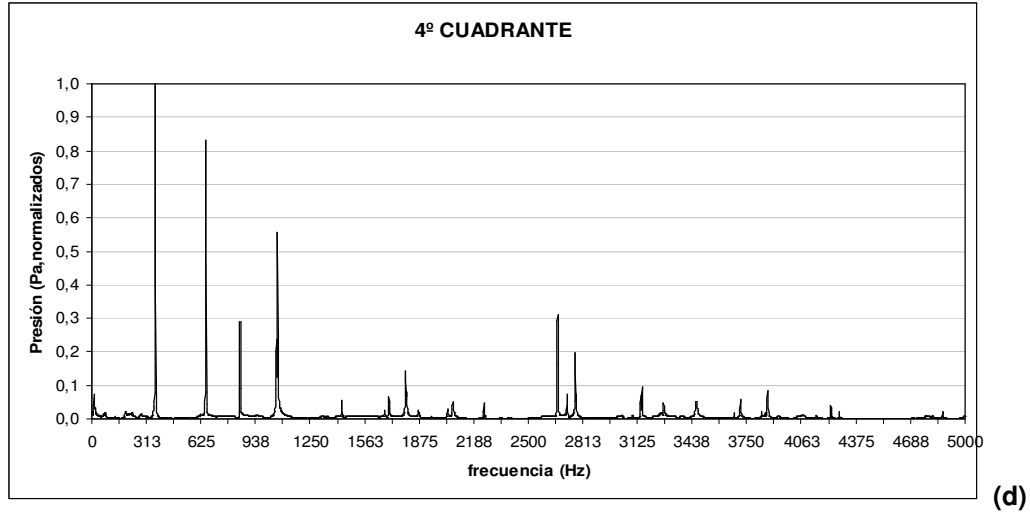


Fig. 3.36.- POSICIÓN 6: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo.

1º cuadrante	2º cuadrante	3º cuadrante	4º cuadrante	PARCIALES	NOTAS	
Hz	Hz	Hz	Hz		europaea	latina
364,06	364,06	362,50	364,06	HUM	F(3)#-35	FA(3)# -35
653,13	653,13	653,13	653,13	PRIME	E(4) -16	MI(4) -16
851,56	850,00	851,56	850,00	TIERCE	A(4)b +41	LA(4)b +41
1057,81				QUINT	C(5) +18	DO(5) +18
	1064,06	1064,06	1064,06		C(5) +28	DO(5) +28
1431,25	1431,25	1432,81	1431,25	NOMINAL	F(5) +42	FA(5) +42
				SUPERQUINT		
				OCT.NOMINAL		

Fig. 3.37– POSICIÓN 6: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.

La campana no excita el SUPERQUINT y OCTAVE NOMINAL, como ocurría en la posición 5.

En esta posición existe un cambio significativo en la identificación del parcial más intenso, coincide en los cuadrantes 1-3 y 2-4. En los cuadrantes 1-3 el parcial más intenso es el PRIME (653,13 Hz) y en los cuadrantes 2-4 es el HUM (362,5 Hz). (Para más información ver Anexo 1, figura A1.6.)

- **POSICIÓN 7**

La respuesta temporal en la posición 7 es muy parecida a la obtenida en posiciones anteriores, sobre todo la posición 2. En esta representación también se aprecia la similitud entre cuadrantes opuestos.

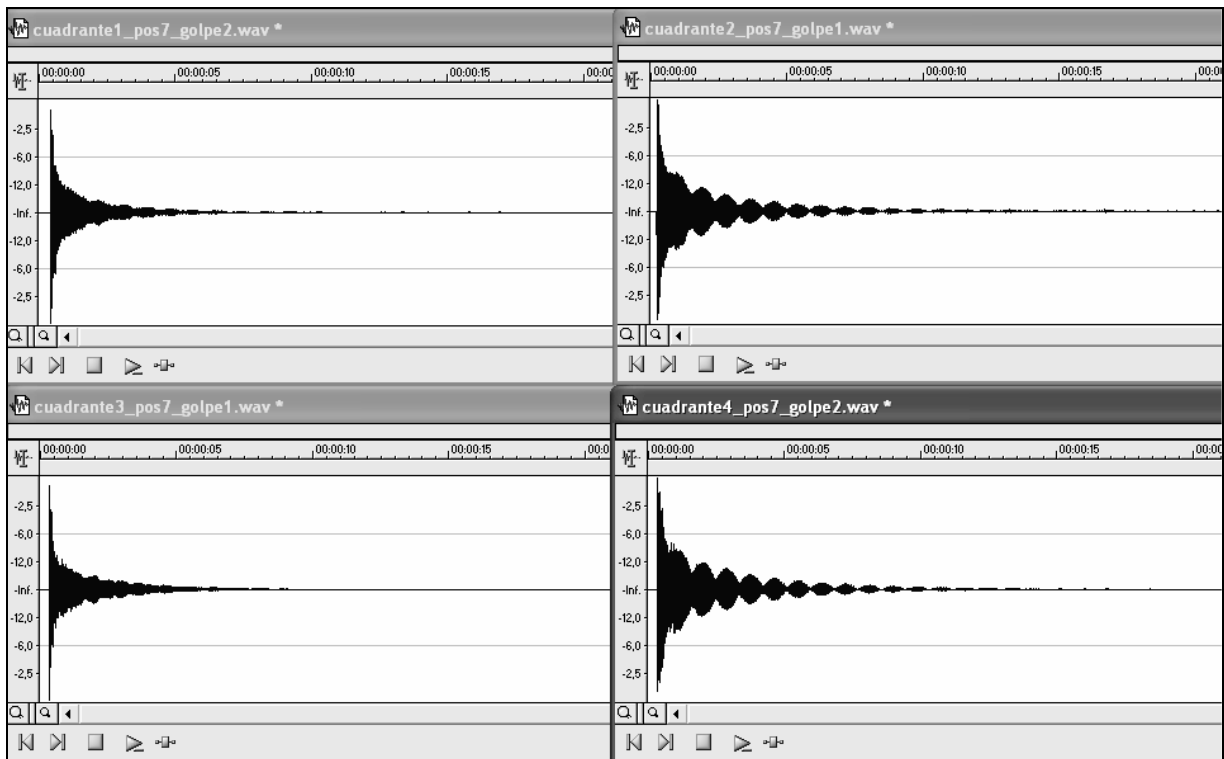
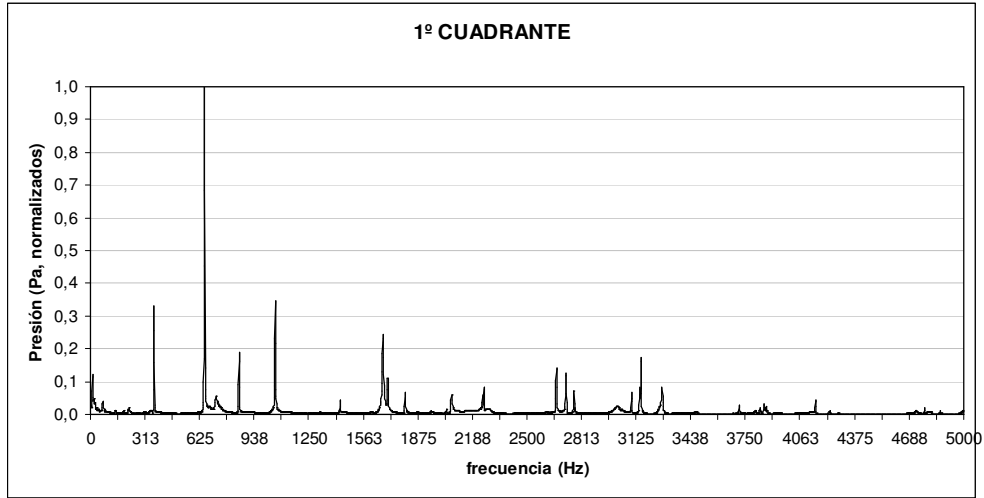


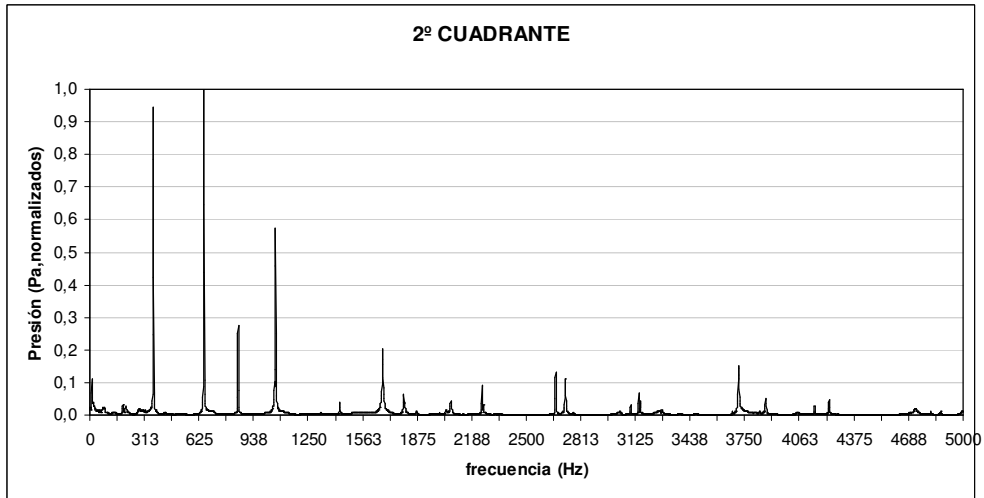
Fig.3.38– POSICIÓN 7: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.

Seguidamente se muestra los resultados del estudio en frecuencia de las grabaciones captadas por el micrófono.

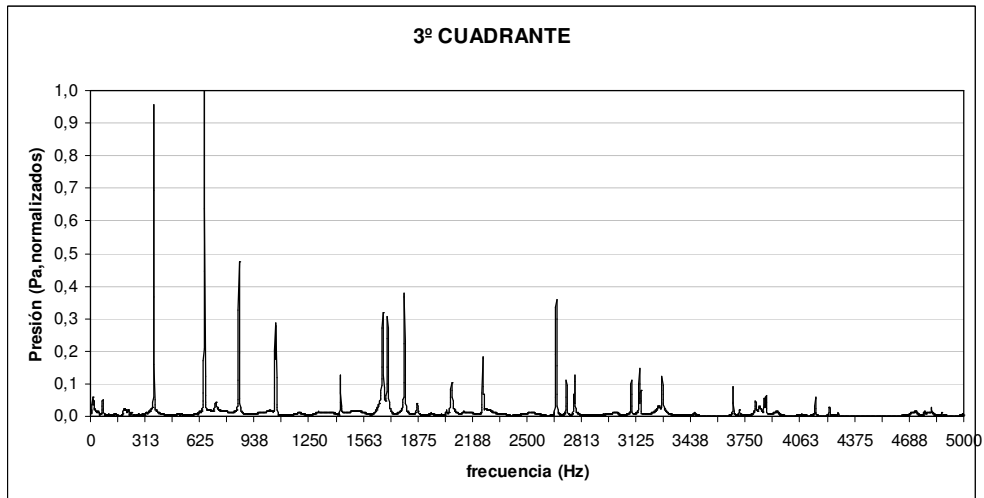
CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT



(a)



(b)



(c)

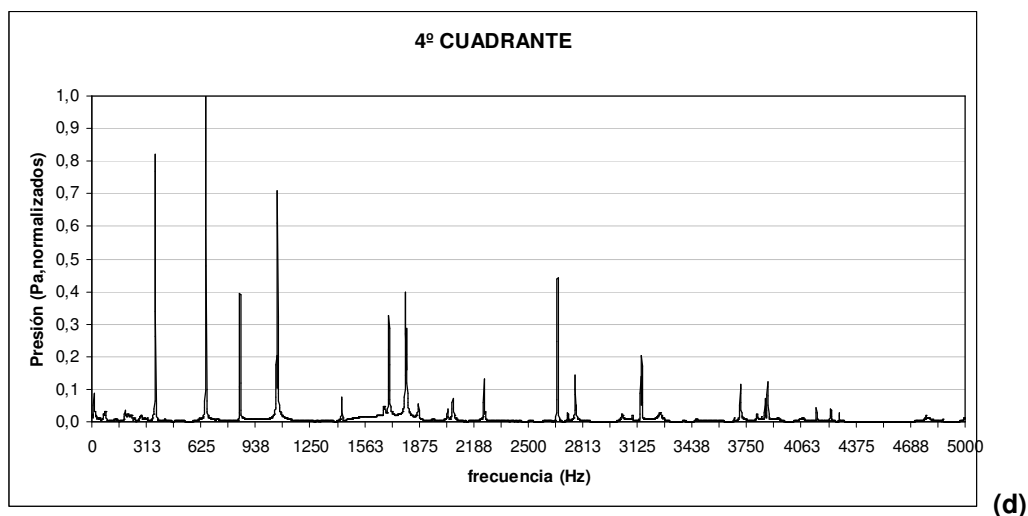


Fig. 3.39.- POSICIÓN 7: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo.

1º cuadrante	2º cuadrante	3º cuadrante	4º cuadrante	PARCIALES	NOTAS	
Hz	Hz	Hz	Hz		europaea	latina
364,06	364,06	362,50	364,06	HUM	F(3)#-35	FA(3)# -35
653,13	653,13	653,13	653,13	PRIME	E(4) -16	MI(4) -16
851,56	850,00	850,00	848,44	TIERCE	A(4)b +41	LA(4)b +41
1057,81		1057,81		QUINT	C(5) +18	DO(5) +18
	1064,06		1064,06		C(5) +28	DO(5) +28
1431,25	1431,25	1432,81	1431,25	NOMINAL	F(5) +42	FA(5) +42
				SUPERQUINT		
				OCT.NOMINAL		

Fig. 3.40– POSICIÓN 7: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.

En esta posición coincide el parcial más intenso en los cuatro cuadrantes, siendo este el PRIME (653,13 Hz). Las frecuencias excitadas son las mismas en los cuatro cuadrantes, siempre con distintas amplitudes.

Una peculiaridad de esta posición se observa en el parcial QUINT, ya que no coincide para los cuatro cuadrantes, pero sí en los cuadrantes 1-3 (1057,81 Hz) y 2-4 (1064,06 Hz).

- **POSICIÓN 8**

La posición 8 esta situada en la parte superior de la copa (ver figura 3.17).

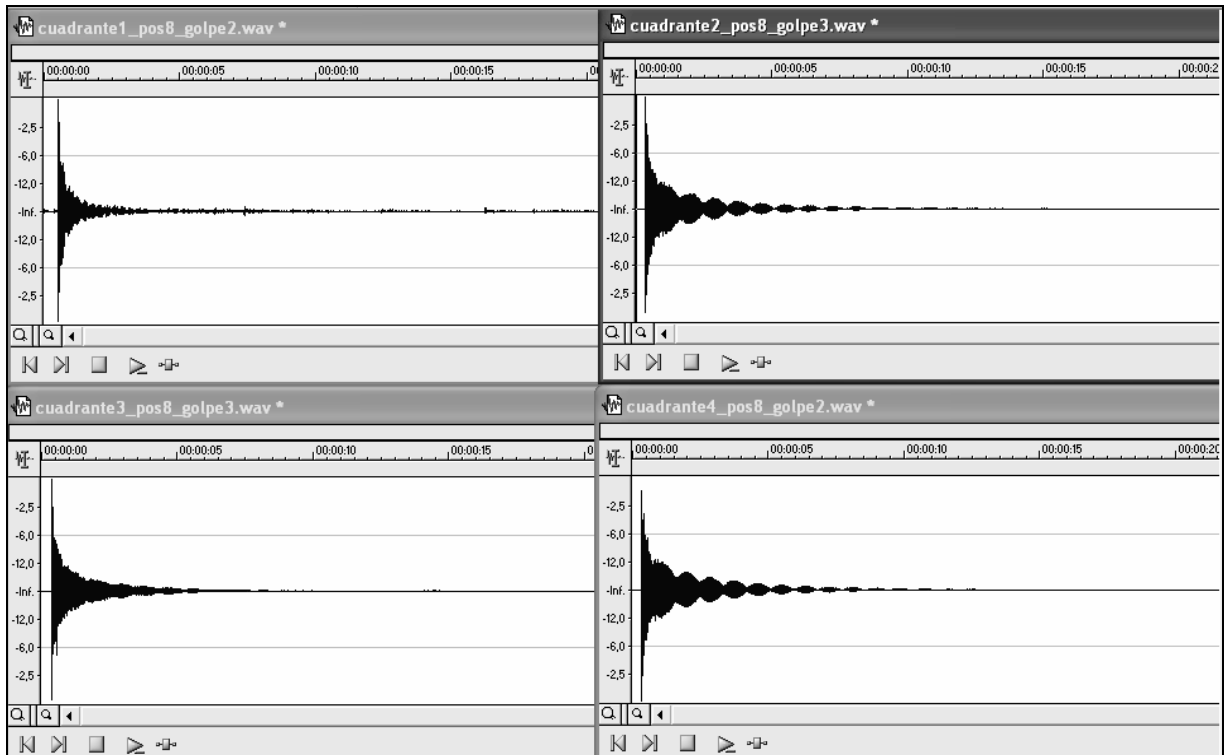
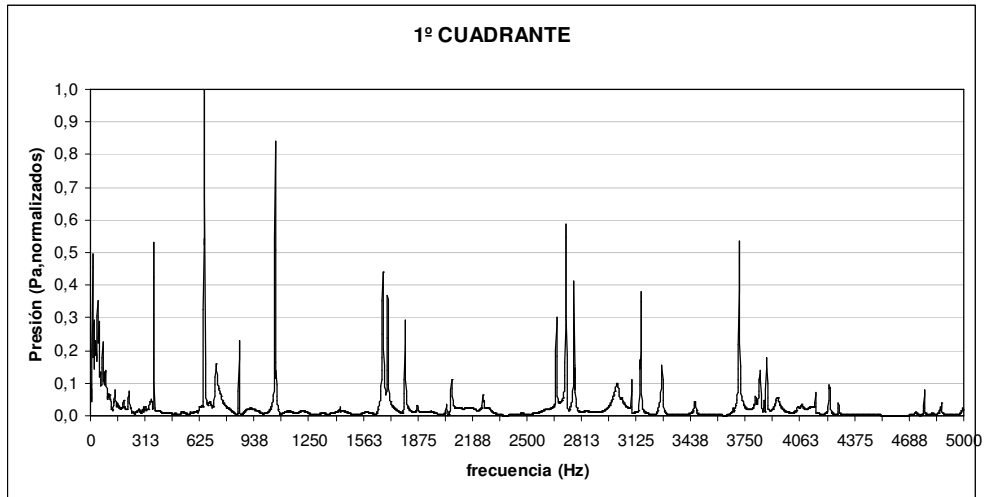


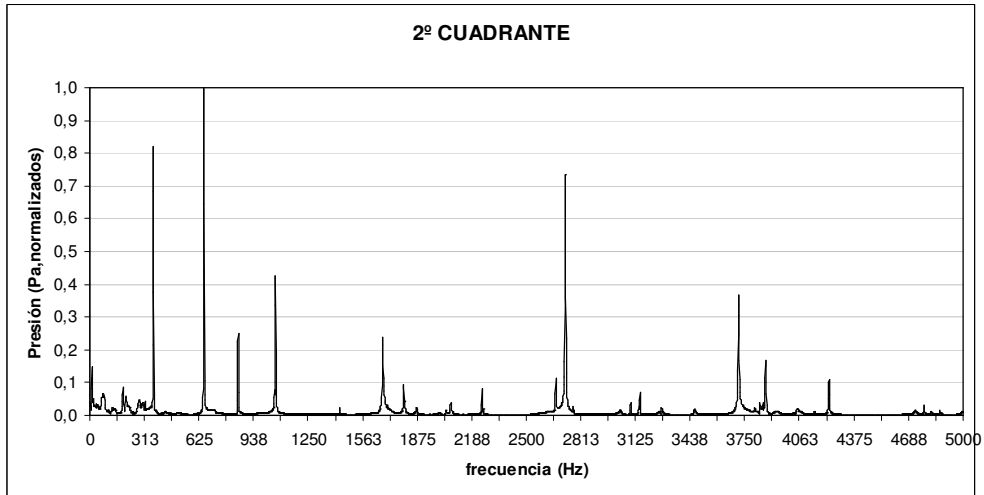
Fig.3.41– POSICIÓN 8: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.

A continuación se exponen los resultados de la respuesta en frecuencia de las grabaciones captadas por el micrófono al golpear la campana con el martillo.

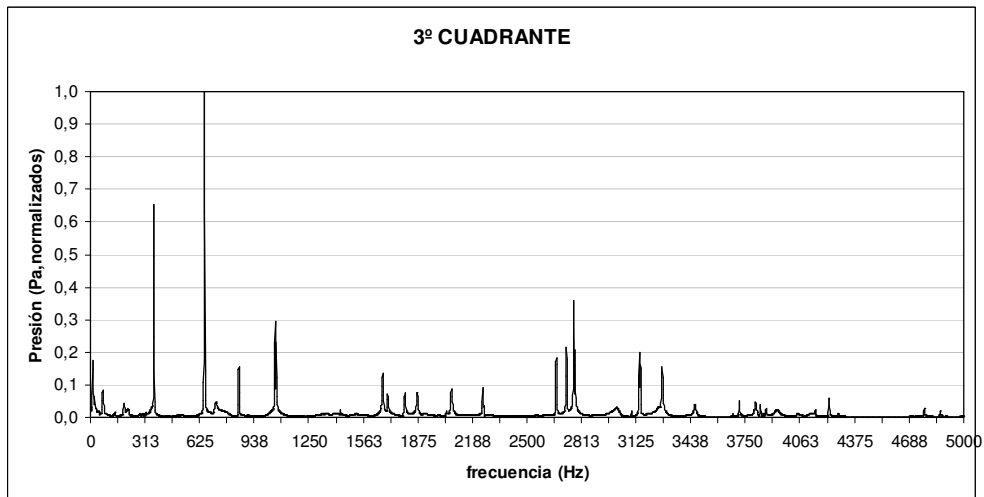
CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT



(a)



(b)



(c)

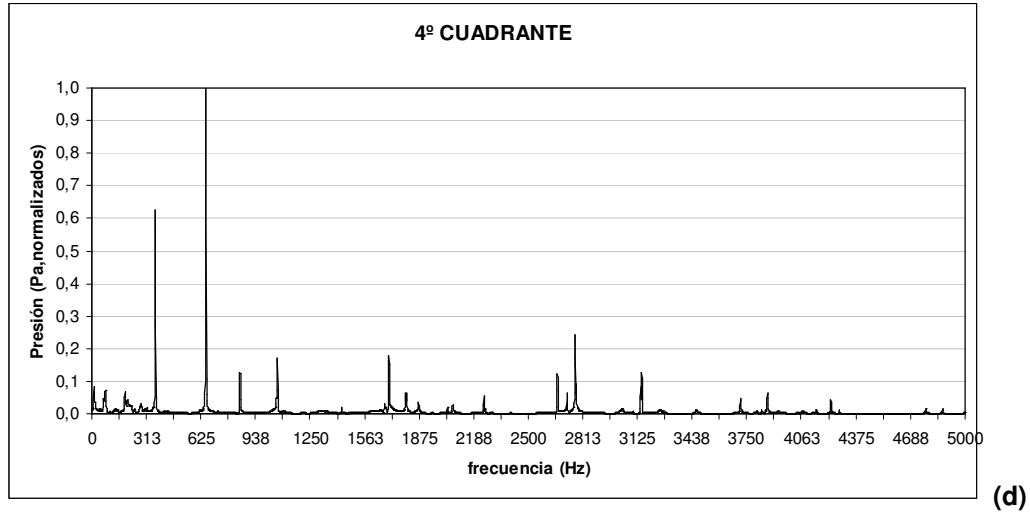


Fig. 3.42 - POSICIÓN 8: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo.

1º cuadrante	2º cuadrante	3º cuadrante	4º cuadrante	PARCIALES	NOTAS	
Hz	Hz	Hz	Hz		europaea	latina
362,50	364,06	362,50	364,06	HUM	F(3)#-35	FA(3)# -35
653,13	653,13	653,13	653,13	PRIME	E(4) -16	MI(4) -16
851,56	850,00	850,00	848,44	TIERCE	A(4)b +41	LA(4)b +41
1057,81		1057,81		QUINT	C(5) +18	DO(5) +18
	1064,06		1064,06		C(5) +28	DO(5) +28
1429,69	1432,81	1432,81	1431,25	NOMINAL	F(5) +42	FA(5) +42
				SUPERQUINT		
				OCT.NOMINAL		

Fig. 3.43– POSICIÓN 8: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.

Se vuelve a comprobar la igualdad con respecto a la excitación de las mismas frecuencias en los cuatro cuadrantes, además de que en esta posición vuelve a coincidir el parcial más intenso en los cuatro cuadrantes, siendo este el PRIME (653,13 Hz). La campana tiene el mismo comportamiento en las posiciones 7 y 8.

Con respecto a la visualización de los espectros, se observa el paralelismo entre cuadrantes opuestos en particular en la frecuencia 717,19 Hz, que solo se excita en

los cuadrantes 1-3. También se observa que el primer cuadrante excita mucho más los parciales que los demás.

- **POSICIÓN 9**

La posición 9 es la que separa la copa de la corona de la campana. La figura 3.44 nos muestra la respuesta temporal en esta posición en sus cuatro cuadrantes. Y la figura 3.45 y 3.46 la respuesta en frecuencia.

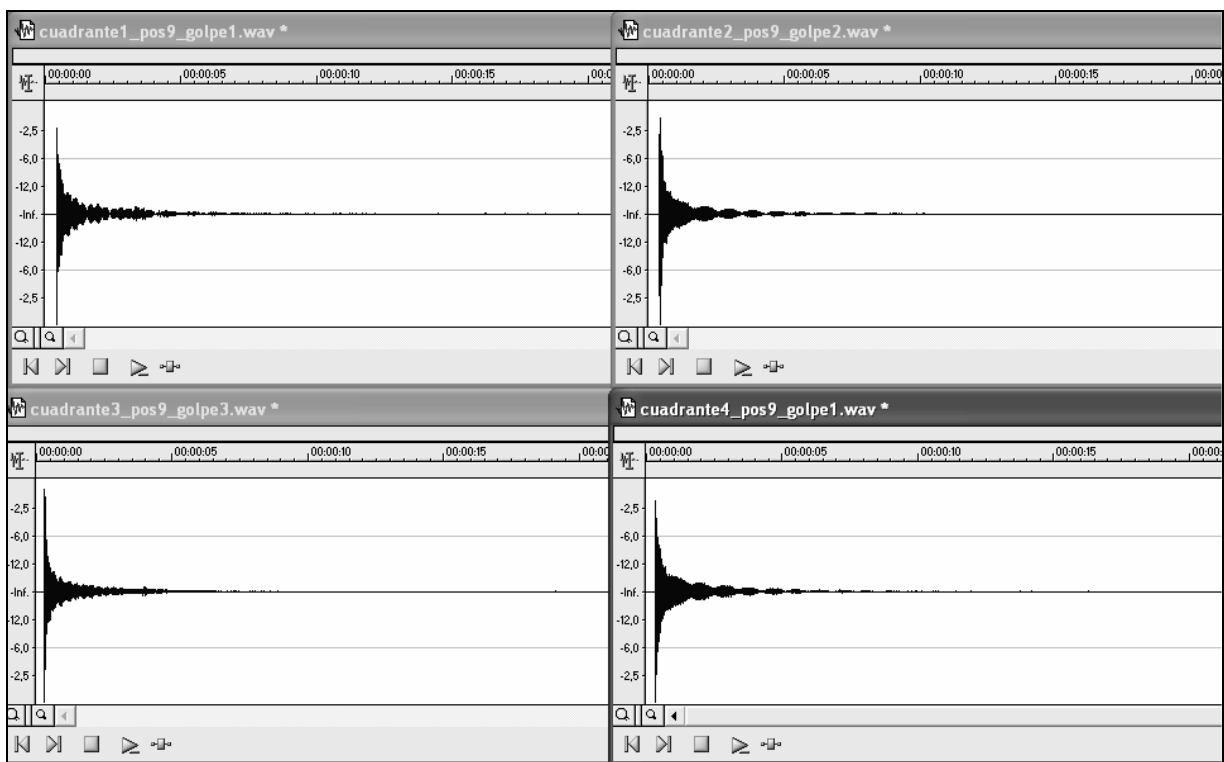
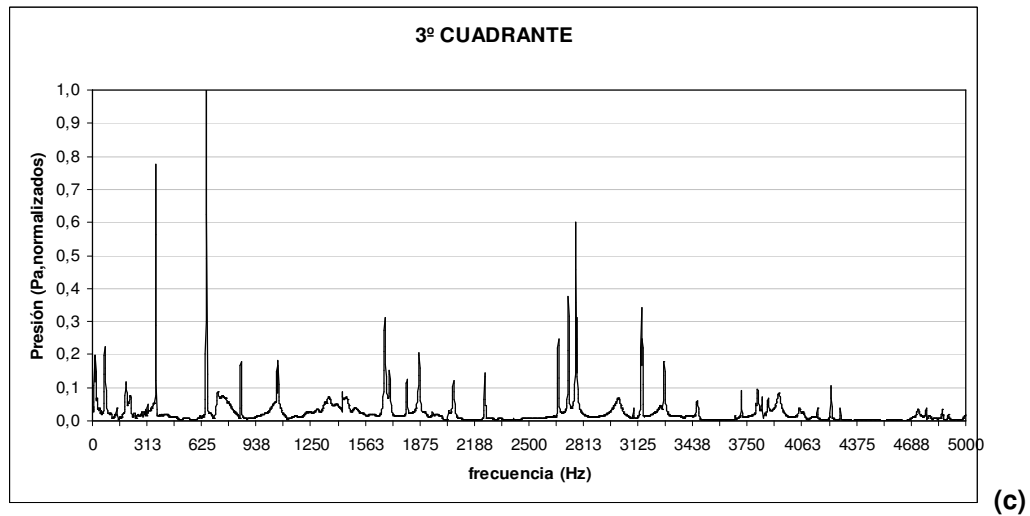
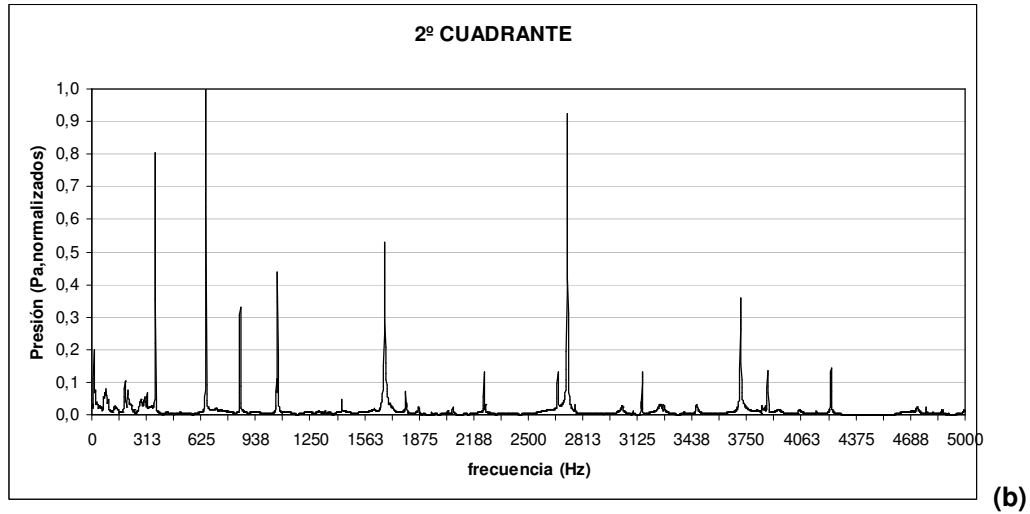
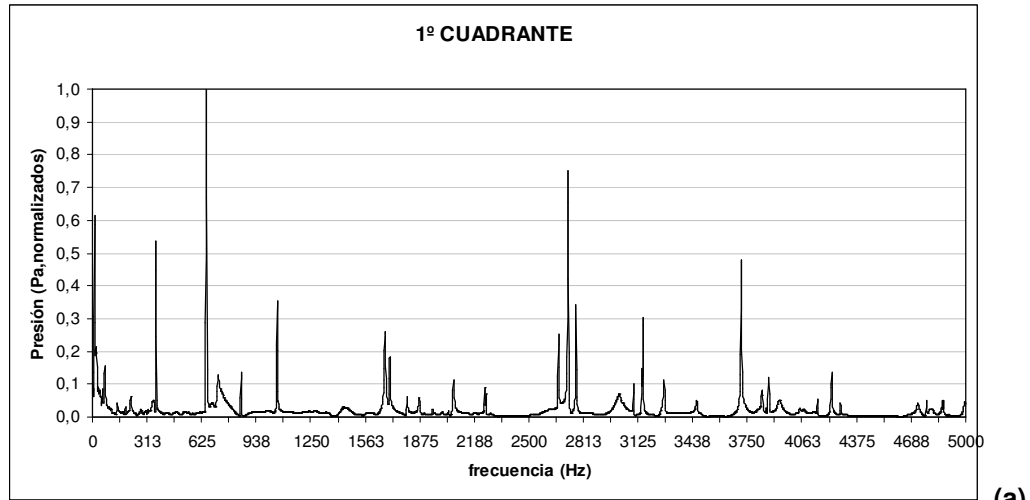


Fig.3.44– POSICIÓN 9: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.

CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT



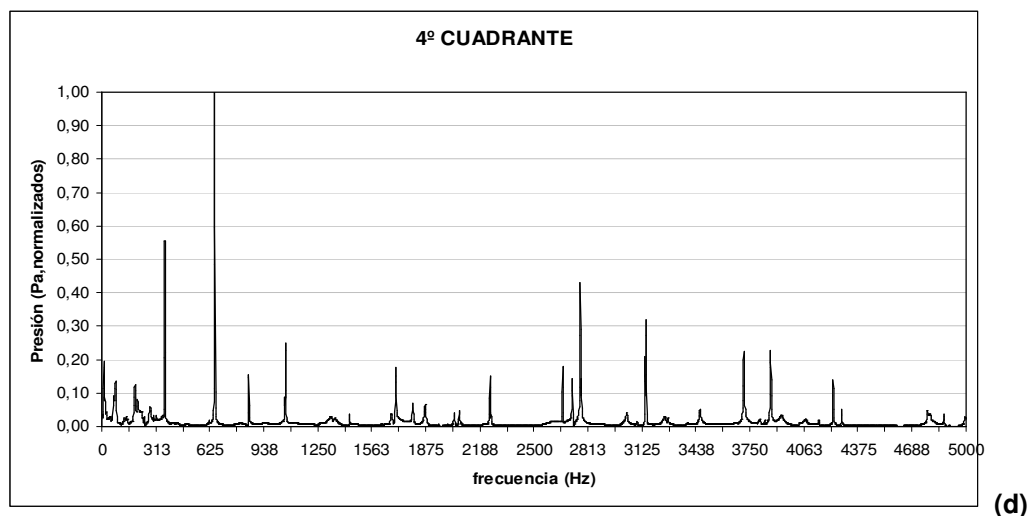


Fig. 3.45 - POSICIÓN 9: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo.

1º cuadrante	2º cuadrante	3º cuadrante	4º cuadrante	PARCIALES	NOTAS	
Hz	Hz	Hz	Hz		europaea	latina
364,06	364,06	362,50	364,06	HUM	F(3)#-35	FA(3)# -35
653,13	653,13	653,13	653,13	PRIME	E(4) -16	MI(4) -16
851,56	850,00	850,00	850,00	TIERCE	A(4)b +41	LA(4)b +41
1057,81				QUINT	C(5) +18	DO(5) +18
	1064,06	1062,5	1064,06		C(5) +28	DO(5) +28
1431,25	1431,25	1432,81	1431,25	NOMINAL	F(5) +42	FA(5) +42
				SUPERQUINT		
				OCT.NOMINAL		

Fig. 3.46– POSICIÓN 9: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.

Tal y como observamos en la tabla de al figura 3.46, la campana sigue el mismo comportamiento que en las posiciones 7 y 8. No reconoce los parciales SUPERQUINT y OCTAVE NOMINAL, excita las mismas frecuencias y además el parcial fundamental coincide en todos los cuadrantes.

- **POSICIÓN 10**

Esta posición se encuentra en la copa de la campana, y por tanto es la última posición bajo estudio. Tal y como en las posiciones anteriores, primero mostraremos la respuesta en el tiempo y después la respuesta en frecuencia.

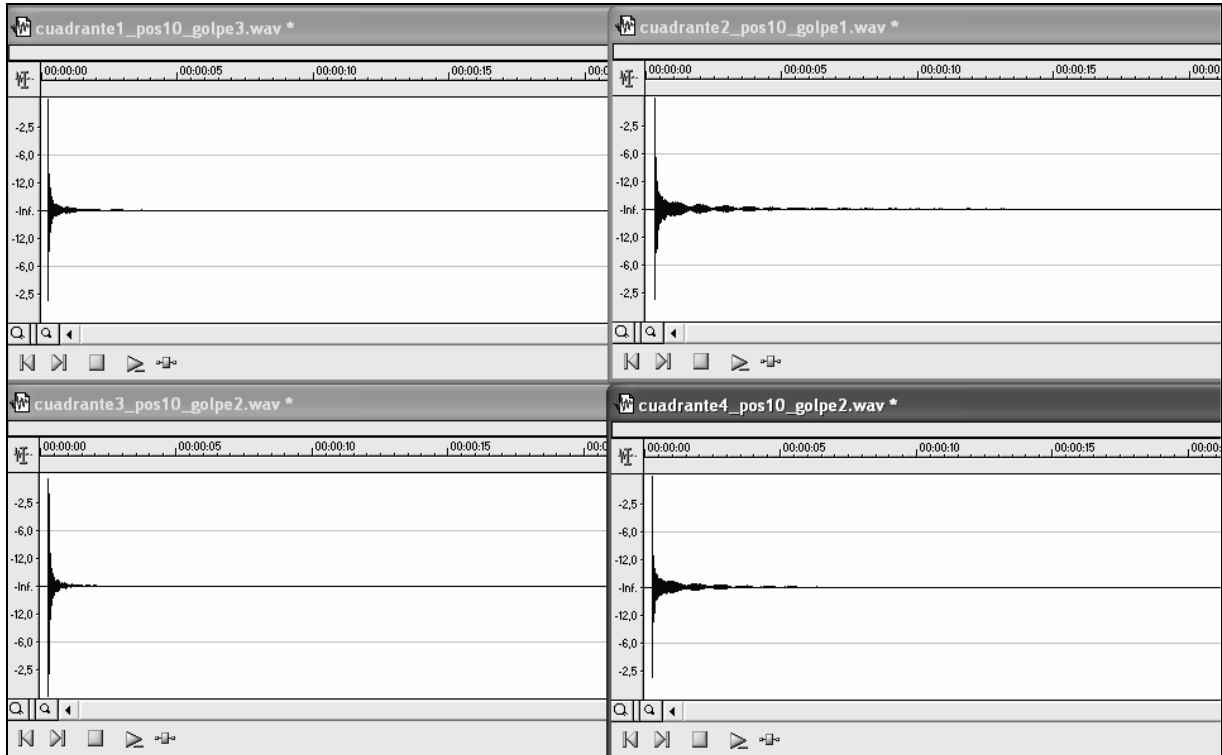
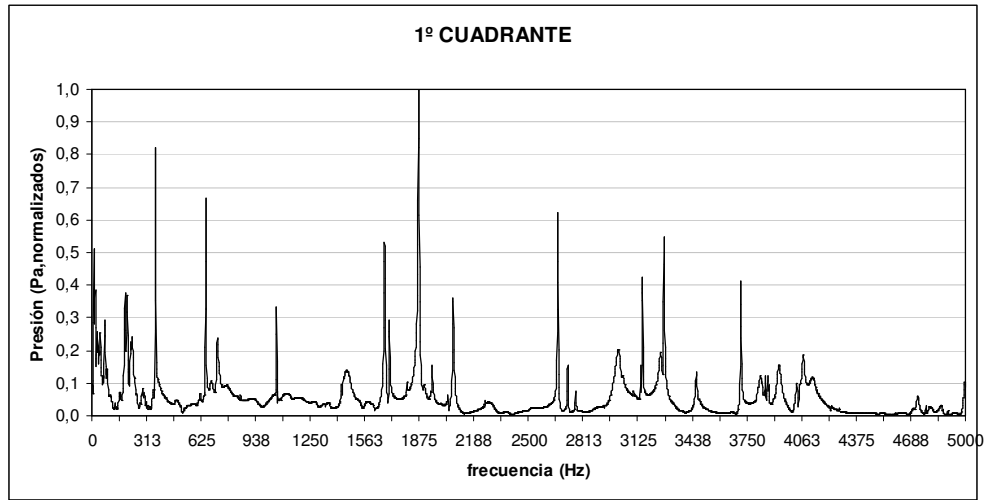
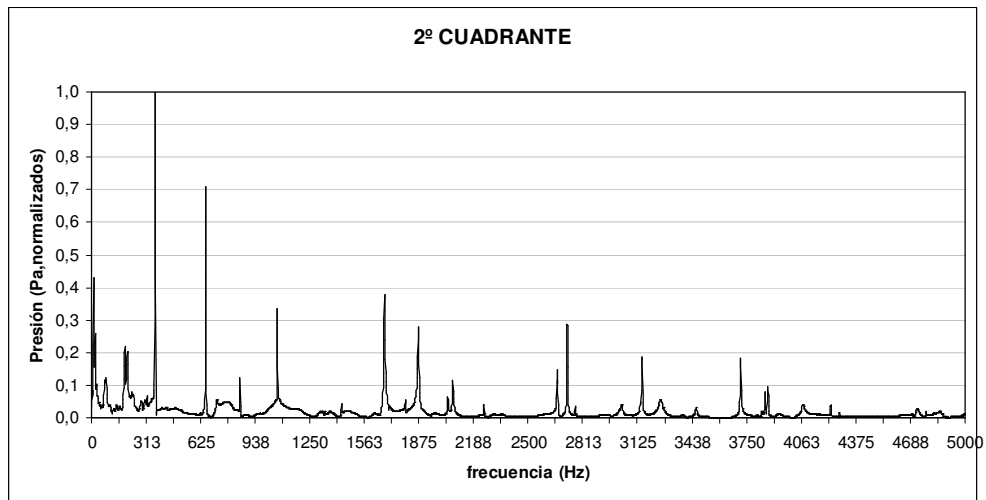


Fig.3.47– POSICIÓN 10: Imagen de la respuesta temporal captada con el micrófono en los cuatro cuadrantes. Imágenes extraídas con el programa SOUND FORGE.

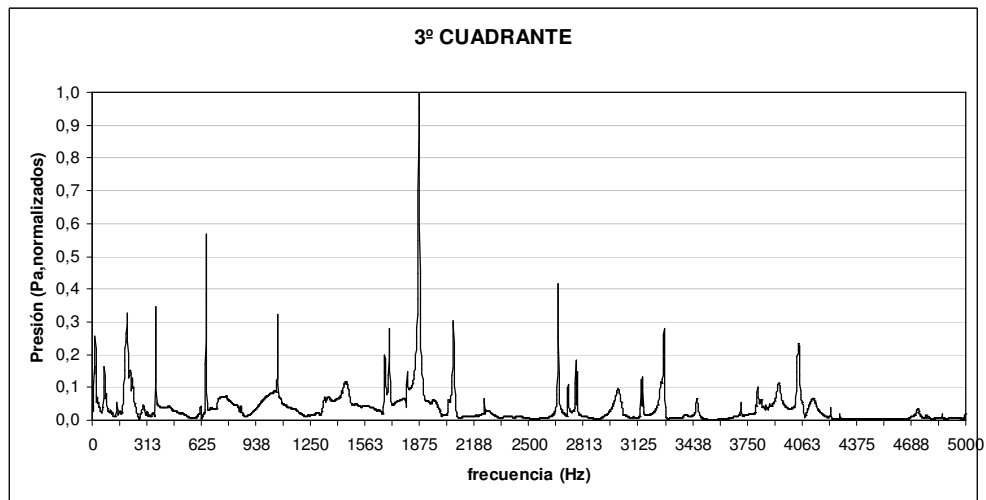
CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT



(a)



(b)



(c)

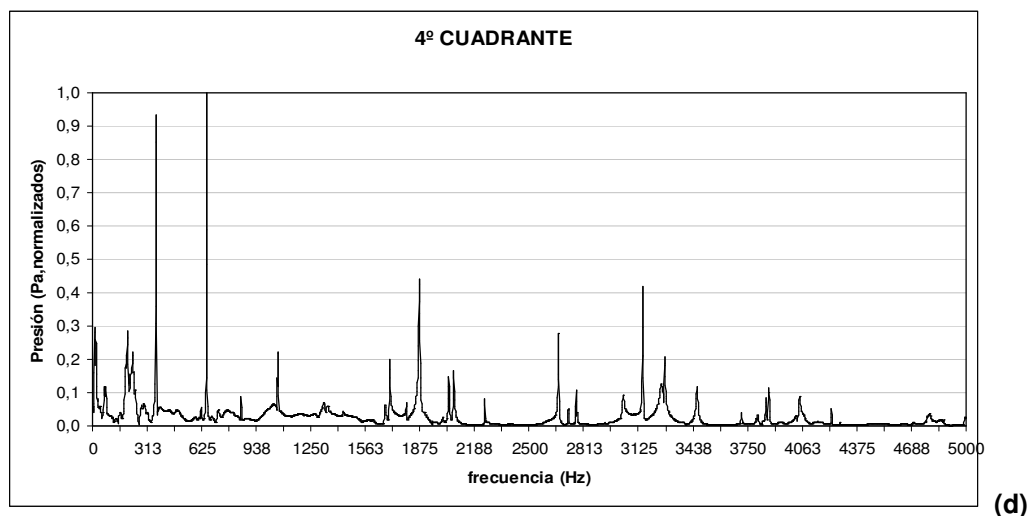


Fig. 3.48. POSICIÓN 10: Estudio en frecuencia de la respuesta al golpe de martillo.

1º cuadrante	2º cuadrante	3º cuadrante	4º cuadrante	PARCIALES	NOTAS	
Hz	Hz	Hz	Hz		europaea	latina
364,06	364,06	362,50	362,50	HUM	F(3)#-35	FA(3)# -35
653,13	653,13	653,13	653,13	PRIME	E(4) -16	MI(4) -16
850,00	850,00	851,56	850,00	TIERCE	A(4)b +41	LA(4)b +41
1057,81				QUINT	A(4)b +41	LA(4)b +41
	1064,06	1062,50	1064,06		C(5) +18	DO(5) +18
	1431,25		1432,81	NOMINAL	F(5) +42	FA(5) +42
1459,38		1450,00			F(5)# -29	FA(5)# -29
				SUPERQUINT		
				OCT.NOMINAL		

Fig. 3.49– POSICIÓN 10: Tabla con los parciales identificados en los cuatro cuadrantes y sus notas musicales.

Tal y como se podía esperar esta posición es la más inestable de todas las estudiadas, al estar localizada en la corona de la campana (ver Anexo I figura A1.10). Observando la respuesta en frecuencia (figura 3.48) apreciamos que es muy rica en parciales sobre todo en frecuencias superiores a 1500 Hz. En esta posición también se aprecia el paralelismo entre cuadrantes 1-3 y 2-4. En el caso de los cuadrantes 1 y 3 la frecuencia más excitada no corresponde a ninguno de los parciales principales

de la campana, esta entorno a 1871,88 Hz (LA₅ bemol +15 centésimas), en el segundo cuadrante es el parcial HUM (364,06 Hz) y en el cuarto el PRIME (653,13 Hz).

3.3 COMPARACIÓN CON EL PROGRAMA WAVANAL.

En este apartado compararemos los resultados obtenidos a través de nuestro análisis en frecuencia con los que se obtienen a partir de las mismas grabaciones de sonido con el programa Wavanal [2], para comprobar el funcionamiento del software.

El programa Wavanal es un analizador de forma de onda de campana a través de sonidos pregrabados. Éste proporciona la representación gráfica de los sonidos de las campanas, la identificación de frecuencias de los parciales con sus notas, y la síntesis del sonido de la campana a partir de una lista de parciales. También permite la determinación completa del carácter armónico de una campana y es capaz de cambiar su afinación y mostrar el sonido resultante.

Antes de ver los resultados obtenidos hay que tener en cuenta que al programa WAVANAL le hemos introducido una señal por cada posición y cuadrante, pero esta señal es sólo una de las tres medidas con las que hacíamos el promediado para hallar las FFT, por lo que podemos obtener resultados que no coincidan con los conseguidos en nuestro análisis.

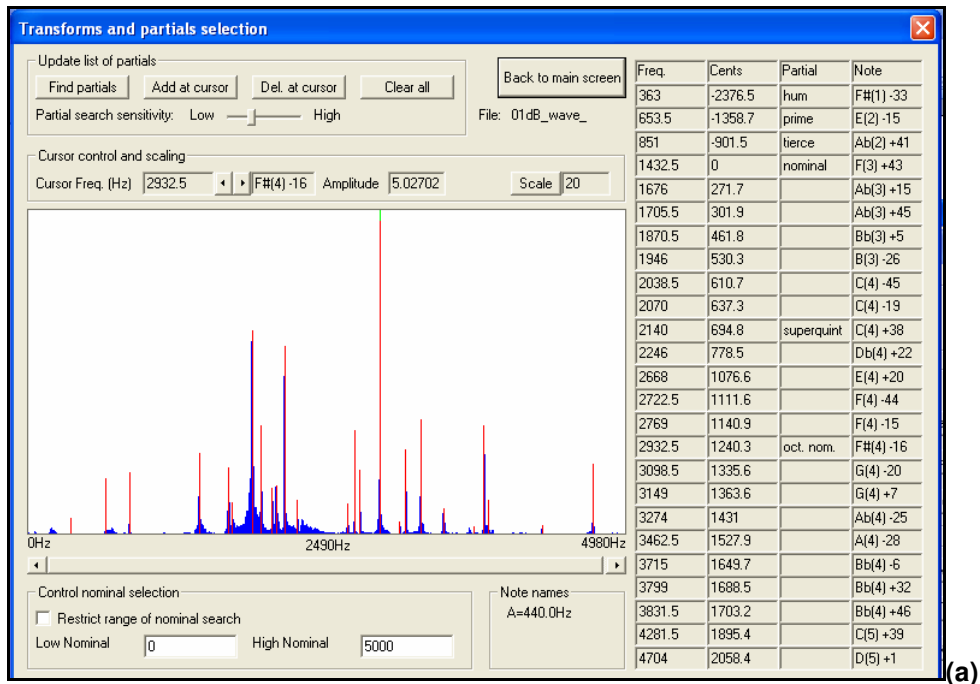
Sólo mostraremos una gráfica por cada punto de grabación, tanto en el caso del badajo como en el del martillo. Ésta representará a las tres señales con las que se hizo el promediado.

En el anexo II se incluye un manual del Wavanal, en el que se explican como obtener los resultados que se muestran a continuación.

3.3.1 EXCITACIÓN DE LA CAMPANA CON GOLPE DE BADAJO

Primero analizaremos los resultados obtenidos mediante la excitación con badajo. Para ello hemos realizado la comprobación de todas las señales captadas por el micrófono y mostraremos los resultados de una señal por cada posición.

En la figura 3.50 se observan los resultados obtenidos.



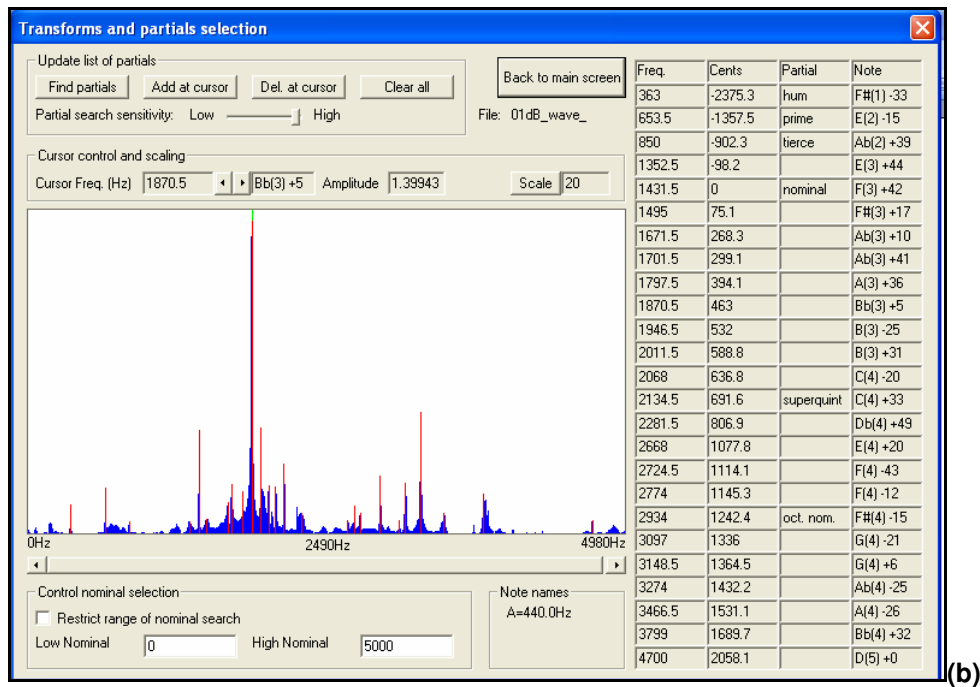


Fig. 3.50– Resultados del programa WAVANAL de la excitación de la campana con badajo. (a) 1º cuadrante y (b) 3º cuadrante.

En estas figuras se ven los resultados tras aplicar la transformada de Fourier a la señal. El gráfico muestra la amplitud de la transformada en el eje Y y la frecuencia en el eje X. Las columnas de la derecha indican las frecuencias donde se han detectado parciales, las centésimas que hay de diferencia entre dichos parciales con respecto al NOMINAL, la identificación de los siete parciales más importantes (Simpson) y las notas correspondientes a cada uno.

En el gráfico se observa la señal en color azul, y las barras rojas indican donde están situados los parciales que aparecen en la tabla de la derecha. Para llevar a cabo esta detección hemos llevado a cabo lo explicado en el Anexo II apartado 4.1.4.

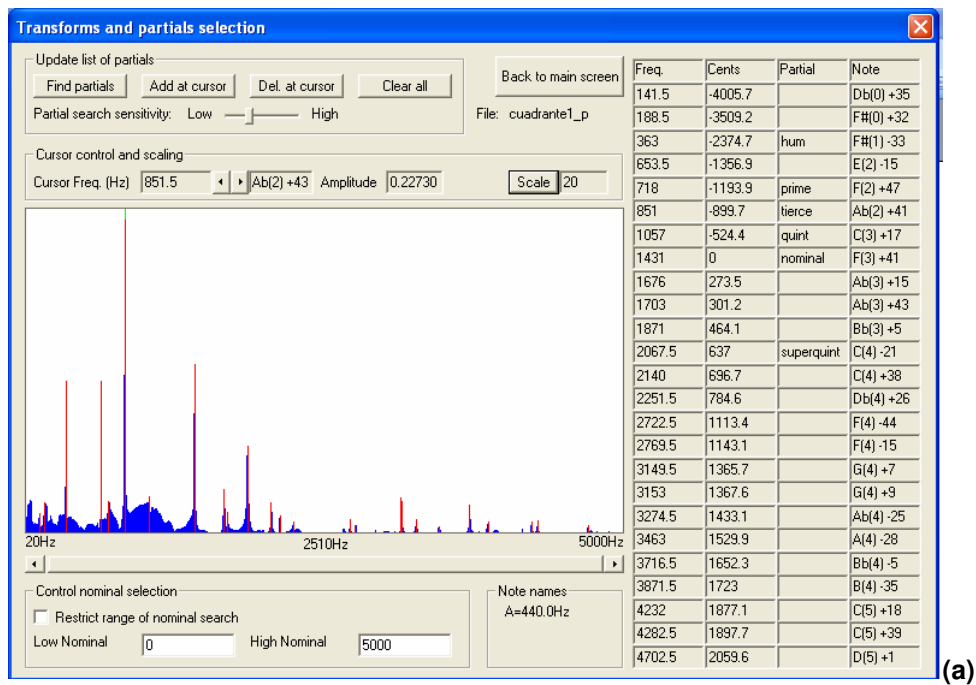
Al comprobar estos resultados con los obtenidos mediante nuestro análisis vemos que coinciden, ya que el Wavanal reconoce los mismos parciales, y dentro ellos también los principales (ver tabla de la figura 3.14). Las frecuencias no son exactamente las mismas, pero esto debido al muestreo realizado en ambos casos, el

Wavanal trabaja con una resolución de 0,5 Hz y en nuestro análisis hemos trabajado con 1,562 Hz.

3.3.2 EXCITACIÓN DE LA CAMPANA CON GOLPE DE MARTILLO

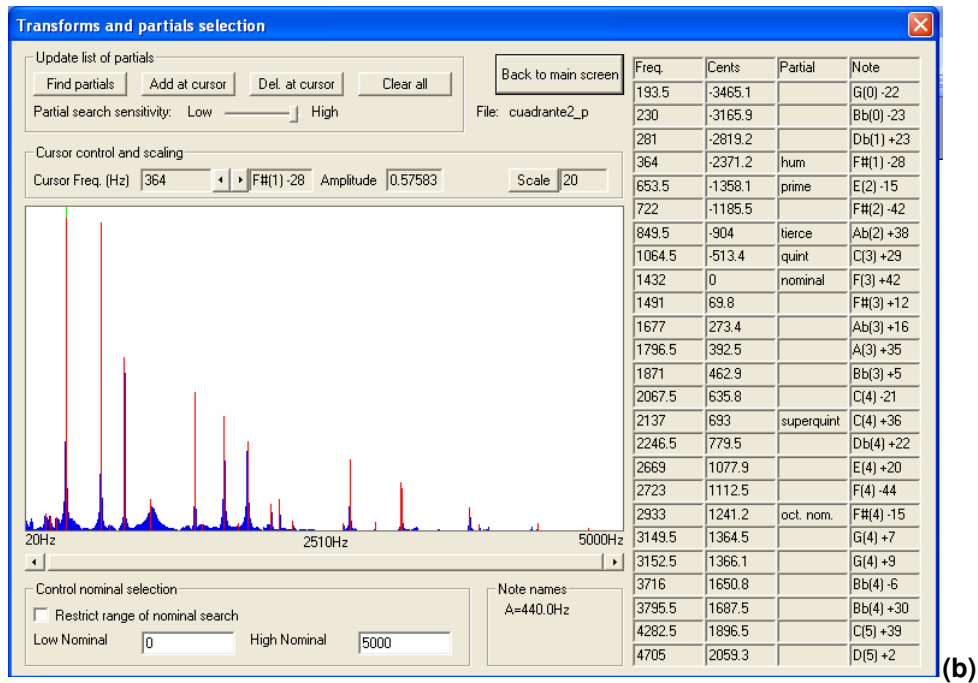
En este apartado veremos los resultados obtenidos mediante golpeo con martillo, al tener 10 posiciones de golpeo en cada cuadrante, hemos optado en seleccionar la posición más relevante de la campana, que es la posición 2 equivalente al golpe de badajo en el exterior. Los resultados de las restantes posiciones están incluidos en el Anexo III.

La figura 3.53 muestra los resultados de la posición 2 en los cuatro cuadrantes.

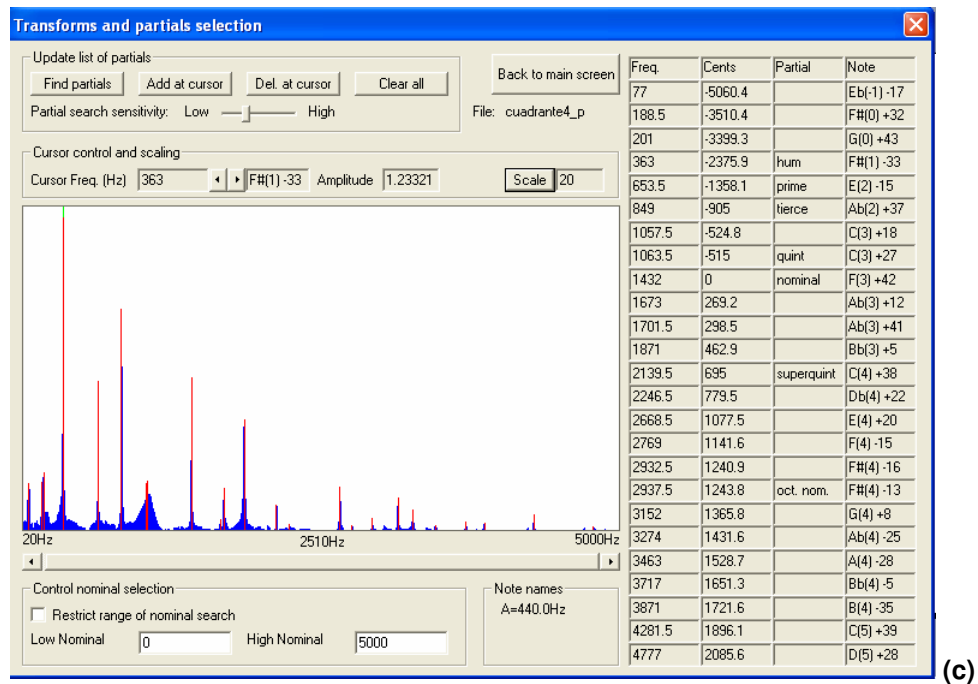


(a)

CAPÍTULO 3 – EVALUACIÓN DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA MEDIANTE ANÁLISIS FFT



(b)



(c)

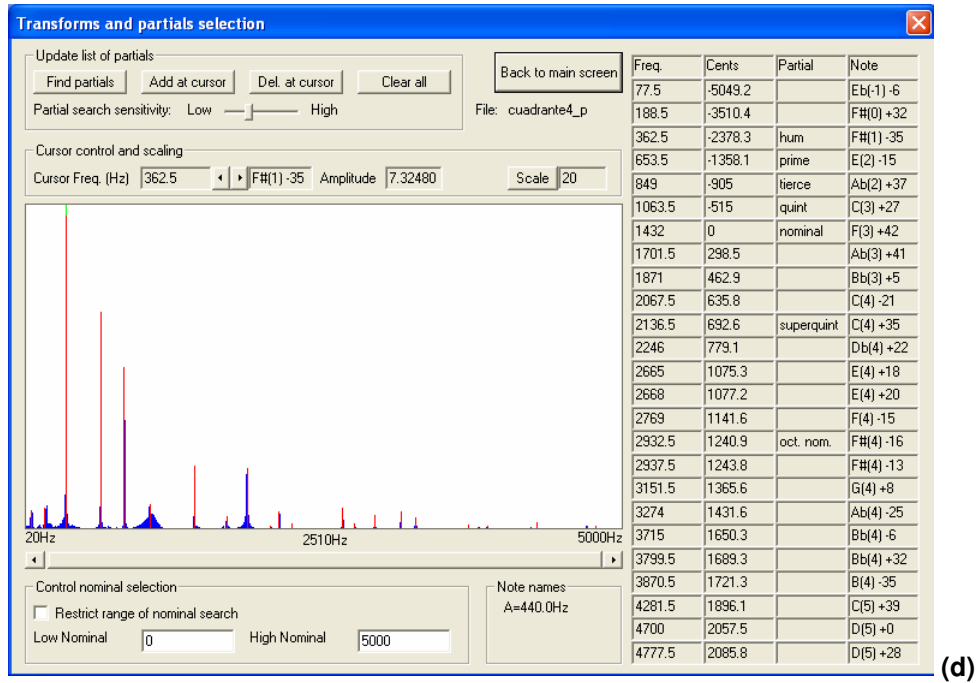


Fig. 3.51– Resultados del programa WAVANAL de la excitación con martillo. (a) 1º cuadrante (b) 2º cuadrante, (c) 3º cuadrante y (d) 4º cuadrante

Si observamos estos resultados con lo obtenido en el apartado 3.2.5, (figuras 3.22 y 3.23) comprobamos que coinciden tanto las representaciones, como la detección de los parciales (ver Anexo I figura A2.2).

3.4 CONCLUSIONES

Para poner fin a este estudio del análisis acústico de una campana con yugo de madera se exponen a continuación las conclusiones alcanzadas.

1. El tono que percibimos al golpear esta campana es un $Ml_4 -16$ centésimas ($E_4 -16$) sin distinción de que el golpe se realice con badajo o martillo y de la posición donde se produzca.
2. La campana se comporta del mismo modo en toda su estructura. La variación acústica que se percibe al golpear en diferentes puntos de su geometría se debe a la variación del timbre provocado por la amplitud relativa de los parciales.
3. El yugo y el asa rompen la simetría del conjunto, esto produce que percibamos timbres diferentes según el cuadrante donde se golpee la campana.
4. El asa rompe la simetría de la campana por lo que provoca que haya más amplitud vibración en los cuadrantes 2 y 4 que en los cuadrantes 1 y 3. Según en que posición en altura se golpee habrá más o menos vibración. En la parte del arco sonoro los cuadrantes 2 y 4 vibran con mayor amplitud que el 1 y el 3. Al alcanzar la copa y conforme vamos subiendo en altura, las respuestas en el dominio del tiempo en los cuadrantes 1 y 3 se parecen más a las de 2 y 4. Y en el caso de la corona, debido a la rigidez que presenta la campana en esta zona, encontraremos respuestas sin amortiguamiento.
5. Al golpear en las tres posiciones que se encuentran en el arco sonoro (1, 2 y 3), percibimos timbres muy similares debido a que la frecuencia más excitada coincide en los tres. Lo mismo ocurre con las posiciones 7, 8 y 9.

6. El primer cuadrante tiene un comportamiento distinto con respecto a los demás si nos fijamos en la amplitud relativa de los parciales. Esto puede ser causado por falta de simetría radial perfecta en la campana, posiblemente producida por defectos de fundición y distribución homogénea del material de la colada en el molde.
7. El software Wavanal ha presentado los mismos resultados que los que se habían conseguido en el estudio realizado en este proyecto. Por lo que se ha comprobado la validez de dicho programa.

Este trabajo presenta los resultados de una parte del estudio completo del comportamiento vibro-acústico de la campana. Paralelamente se están realizando estudios sobre el comportamiento modal y el de elementos finitos. Con el fin de realizar estudios mecánicos de la interacción entre campana y badajo, y la influencia del yugo de madera en el comportamiento acústico del conjunto.

Con la elaboración de este proyecto hemos planteado el proceso de trabajo para la caracterización acústica de una campana con yugo de madera. En futuros trabajos se pretende realizar el mismo estudio para esta misma campana en condiciones de laboratorio con yugo metálico, con el fin de poder comparar resultados.

REFERENCIAS

- [1] A.B. Simpson, artículo *Why Bells sound out of tone (1879)*. También se puede hallar la información en la página web: <http://www.keltek.org>.

- [2] Software Wavanal, consultar su página web <http://www.hibberts.co.uk>.

ANEXO I

PARCIALES DE LA CAMPANA POR GOLPE DE MARTILLO

En este anexo se muestran diez tablas que recogen los parciales detectados en el estudio frecuencial del comportamiento de la campana frente a excitación por golpe de martillo.

Hay una tabla por cada posición de golpeo y cada una contiene la información de los parciales de cada cuadrante con sus frecuencias en hertzios y amplitudes en decibelios, además de la identificación de los parciales principales.

Dichas tablas se han elaborado a través del estudio de la respuesta en frecuencia con los datos extraídos del software dBFA32, que analiza la señal en banda estrecha (FFT) y en bandas porcentuales (1/N octava) en tiempo real y con el que también hemos grabados las señales con micrófono. Las detecciones de los parciales se llevaron a cabo leyendo la historia frecuencial y seleccionando los picos de amplitud.

Para concretar el estudio sólo mostraremos los 30 parciales de mayor amplitud, y las frecuencias las agruparemos entre cuadrantes siempre que se diferencien en menos de 5 Hz. Las celdas coloreadas en gris claro corresponde a parciales principales y las coloreadas en gris oscuro indican la frecuencia que más se ha excitado en esa posición.

A continuación se muestran las tablas ordenadas por posiciones de golpeo (ver figura 3.19).

POSICIÓN 1

1º cuadrante		2º cuadrante		3º cuadrante		4º cuadrante		PARCIALES
Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	
10,94	52,3	10,94	39,4	12,50	41,2	12,50	44,5	
70,31	31,1	79,69	24,0	70,31	37,2	78,13	38,2	
189,06	25,2	192,19	26,8	187,50	29,3	189,06	37,9	
						201,56	38,4	
		229,69	25,4	229,69	25,9	231,25	27,1	
362,50	47,2	364,06	62,7	362,50	63,4	362,50	68,6	HUM
653,13	47,7	653,13	59,3	653,13	61,8	653,13	62,4	PRIME
				712,5	33			
851,56	53,8	850,00	56,5	851,56	52,9	850,00	65,2	TIERCE
1057,81	25,8	1064,06	35,8	1064,06	31	1062,50	38,9	QUINT
1431,25	37,7	1431,25	52,0	1431,25	45,7	1431,25	58,9	NOMINAL
1676,56	30,8	1676,56	51,9	1673,44	41,6			
				1701,56	41,2	1701,56	51,5	
1871,88	36,3	1871,88	49,4	1871,88	52,2	1870,31	59,8	
		2039,06	22,0			2039,06	39,5	
2067,19	23,9	2067,19	30,6	2067,19	30,3	2067,19	38,6	
2140,63	23,3	2135,94	36,9	2135,94	30,9	2140,63	41,9	SUPERQUINT
				2245,31	29,6	2245,31	40,2	
2665,63	19,2	2668,75	27,5	2668,75	37,1	2667,19	35,1	
2723,44	26,3	2723,44	46,1	2725,00	36	2721,88	29,4	
				2775,00	39,2	2768,75	44,1	
2932,81	16,9	2932,81	35,3	2932,81	31,1	2932,81	39,6	OCT.NOMINAL
3150,00	33,9	3150,00	40,8	3151,56	39,4	3148,44	44,1	
				3275,00	34,8	3273,44	34,7	
				3460,94	31,4	3460,94	30,6	
3715,63	27,9	3715,63	32,6	3717,19	30	3715,63	34,7	
		3795,31	24,4	3800,00	31,1	3795,31	33,2	
		3856,25	23,8			3856,25	33,3	
		3873,44	23,0	3870,31	26	3871,88	34,4	
		4231,25	24,5	4231,25	24,7			

Fig. A1.1- POSICIÓN 1: Tabla de los parciales de la campana por golpe de martillo.

POSICIÓN 2

1º cuadrante		2º cuadrante		3º cuadrante		4º cuadrante		PARCIALES	
Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB		
17,19	38,6	10,94	42,1	12,50	46,1	12,5	46,0		
						23,44	41,4		
68,75	34,5			71,88	42,2				
		78,13	25,1			78,13	41,2		
143,75	25,4					142,19	28,8		
189,06	34,0			189,06	38,2	189,06	41,7		
201,56	34,4	198,44	24,0	201,56	38,7	201,56	42,8		
231,25	28,4	229,69	24,3	229,69	36,7	229,69	33,0		
362,50	51,0	364,06	58,0	362,50	63,3	362,50	68,8		HUM
653,13	56,3	653,13	50,9	653,13	61,8	653,13	60,9		PRIME
717,19	31,9			714,06	37,6	718,75	28,1	TIERCE	
851,56	58,3	850,00	47,0	851,56	59,4	850,00	59,9		
1057,81	34,1	1064,06	32,4	1064,06	38,6	1064,06	41,8	QUINT	
1431,25	49,2	1431,25	41,0	1431,25	51,3	1431,25	51,2	NOMINAL	
1676,56	43,4	1676,56	30,0	1673,44	45	1673,44	28,6		
1701,56	34,5			1703,13	41,8	1701,56	38,1		
1871,88	46,2	1871,88	35,3	1870,31	55,1	1870,31	50,0		
2067,19	23,8	2067,19	14,5	2068,75	28	2067,19	26,1		
2140,63	33,5	2137,50	20,2	2135,94	36,9	2140,63	38,8		SUPERQUINT
2246,88	17,6	2246,88	15,8	2245,31	32,3	2245,31	27,8		
2668,75	30,7	2668,75	30,1	2668,75	37,4	2668,75	39,9		
2723,44	30,7	2723,44	34,8	2725,00	34,5				
2768,75	27,3			2768,75	34,2	2768,75	30,3		
				2775,00	35,3				
2939,06	24,9	2932,81	15,9	2932,81	35,4	2932,81	35,5		OCT.NOMINAL
3150,00	27,9	3150,00	23,8	3148,44	31,4	3151,56	38,5		
3275,00	30,8			3275,00	39,8	3273,44	34,1		
		3715,63	31,9			3717,19	27,4		
						4281,25	32,2		
4701,56	22,3			4700,00	22,6	4700,00	24,2		

Fig. A1.2- POSICIÓN 2: Tabla de los parciales de la campana por golpe de martillo.

POSICIÓN 3

1º cuadrante		2º cuadrante		3º cuadrante		4º cuadrante		PARCIALES
Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	
10,94	42,6	10,94	42,0	12,50	41,6	12,50	41,4	
70,31	29,1	73,44	25,0	71,88	39,4	78,13	40,8	
189,06	28,4			189,06	36,1	189,06	42,1	
203,13	28,7	200,00	26,9	200,00	37,2	201,56	43,3	
231,25	24,6	231,25	26,4	229,69	35,0	229,69	34,1	
362,50	49,7	364,06	61,8	362,50	65,1	362,50	71,7	HUM
653,13	35,1	653,13	43,8	653,13	47,0	653,13	55,7	PRIME
				715,63	32,5	717,19	29,1	
851,56	53,8	850,00	50,0	850,00	52,8	850,00	59,4	TIERCE
1057,81	39,7	1064,06	38,2	1064,06	40,4	1064,06	50,2	QUINT
1431,25	45,2	1431,25	30,2	1431,25	44,7	1431,25	48,1	NOMINAL
1676,56	46,7	1676,56	35,2	1676,56	30,8	1671,88	30,2	
1703,13	43,3			1703,13	44,1	1701,56	39,5	
1801,56	37,3	1796,88	28,2	1801,56	30,8	1796,88	36,5	
1871,88	28,1			1871,88	32,3	1870,31	33,4	
2067,19	31,4	2067,19	19,7	2067,19	29,1	2067,19	26,1	
2140,63	30,4	2135,94	17,3	2135,94	33,6	2140,63	29,4	SUPERQUINT
2245,31	25,3	2246,94	18,2	2245,31	33,4	2245,31	39,7	
2665,63	43,0	2668,75	39,9	2668,75	50,1	2668,75	50,9	
2723,44	44,7	2723,44	41,6	2725,00	43,4	2721,88	27,3	
2770,31	38,8	2768,75	17,0	2768,75	44,8	2768,75	47,8	
				2776,56	44,3			
2937,50	23,2	2932,81	16,8	2932,81	35,9	2932,81	31,3	OCT.NOMINAL
				3098,44	34,8	3098,44	20,9	
3150,00	44,9	3150,00	36,3	3151,56	37,7	3148,44	44,6	
3275,00	36,4			3275,00	36,0	3273,44	28,3	
3715,63	34,8	3717,19	30,3	3717,19	34,4	3717,19	39,3	
3871,88	27,5	3871,88	19,3	3873,44	28,1	3870,31	38,9	
4284,38	25,4	4282,81	21,0	4284,38	25,6	4281,25	39,7	
4776,56	21,0			4776,56	28,9	4776,56	34,9	

Fig. A1.3- POSICIÓN 3: Tabla de los parciales de la campana por golpe de martillo.

POSICIÓN 4

1º cuadrante		2º cuadrante		3º cuadrante		4º cuadrante		PARCIALES
Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	
12,50	43,5	12,50	44,7	12,50	37,9	12,50	42,0	
70,31	29,7	70,31	30,6	71,88	42,2	78,13	34,3	
190,63	27,5	189,06	23,7	189,06	36,8	189,06	36,2	
203,13	28,1	200,00	25,3	200,00	38,0	201,56	37,7	
364,06	52,7	364,06	62,9	362,50	67,3	362,50	70,1	HUM
653,13	45,0	653,13	49,2	653,13	52,2	653,13	57,5	PRIME
				718,75	30,1	717,19	25,9	
851,56	48,4	850,00	52,2	850,00	53,8	850,00	53,5	TIERCE
1057,81	48,3	1064,06	52,6	1064,06	53,5	1064,06	59,8	QUINT
1337,50	24,0			1321,88	30,0			
1431,25	43,6	1431,25	46,4	1432,81	55,8	1431,25	51,6	NOMINAL
1676,56	50,4	1676,56	56,7	1673,44	54,0	1671,88	47,5	
1701,56	41,8			1701,56	63,7	1701,56	55,7	
1801,56	43,2	1801,56	44,2	1798,44	59,9	1796,88	57,8	
1871,88	40,6	1871,88	42,1	1870,31	62,8	1870,31	58,4	
2037,50	23,0	2037,50	29,2	2039,06	44,4	2039,06	45,2	
2067,19	34,3	2067,19	36,2	2068,75	49,8	2068,75	47,8	
2140,63	24,0	2135,94	27,9	2135,94	45,1	2135,94	36,3	SUPERQUINT
2245,31	30,6	2246,88	34,6	2245,31	55,8	2245,31	58,6	
2665,63	44,9	2668,75	50,0	2668,75	60,6	2665,63	61,5	
2723,44	35,1	2723,44	49,7	2725,00	48,2	2721,88	45,0	
2770,31	32,3	2770,31	30,6	2775,00	56,6	2768,75	53,6	
		3098,44	24,8	3098,44	47,2	3098,44	26,4	
3150,00	38,5	3150,00	48,8	3151,56	47,8	3151,56	48,3	
3275,00	31,7	3275,00	22,1	3275,00	51,7	3275,00	36,4	
3715,63	34,1	3715,63	34,7	3711,19	40,6	3715,69	45,6	
4153,13	24,7	4150,00	25,2	4151,56	37,0	4150,00	35,0	
4232,81	20,3	4232,81	25,1	4229,69	30,9	4231,25	36,8	
4282,81	25,1	2481,25	30,1	4284,35	34,4	4281,25	41,1	
4776,56	17,3	4776,56	18,5	4776,56	38,4	4776,56	33,9	

Fig. A1.4- POSICIÓN 4: Tabla de los parciales de la campana por golpe de martillo.

POSICIÓN 5

1º cuadrante		2º cuadrante		3º cuadrante		4º cuadrante		PARCIALES
Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	
10,94	41,7	12,50	43,2	10,94	41,3	12,50	40,8	
		70,31	31,0	75,00	27,7			
				204,69	30,8	229,69	26,5	
364,06	54,2	364,06	59,3	362,50	67,6	362,5	67,8	
653,13	55,2	653,13	54,4	653,13	62,9	653,13	64,2	HUM
850,00	28,3	850,00	13,9	850,00	38,3	850,00	37,5	PRIME
1057,81	45,5	1064,06	48,6	1057,81	52,3	1064,06	57,6	TIERCE
1429,69	15,7			1431,25	39,0	1431,25	34,6	QUINT
1676,56	21,4	1676,56	30,8	1673,44	39,3	1671,88	39,3	NOMINAL
				1704,69	39,3	1701,56	47,2	
1803,13	30,4	1796,88	32,9	1796,88	47,5	1796,88	54,8	
1870,31	21,2	1870,31	20,4	1870,31	40,8	1870,31	47,0	
2039,06	17,5	2039,06	15,3	2039,06	35,4	2039,06	37,5	
2067,19	31,5	2067,19	23,9	2067,19	40,4	2067,19	39,0	
2253,13	16,6	2245,56	16,7	2245,56	42,9	2245,56	40,3	
2667,19	37,5	2667,19	37,0	2665,63	52,1	2665,63	57,2	
2723,44	43,0	2723,44	44,2	2725,00	52,8	2721,88	48,4	
2770,31	37,9			2775,00	57,7	2768,75	54,8	
3100,00	25,1	3100,00	10,8	3100,00	32,3	3100,00	25,2	
						3142,19	46,7	
3150,00	30,8	3151,56	22,7	3150,00	45,7	3151,56	47,7	
3275,00	34,8	3273,44	15,9	3273,44	51,3	3275,00	37,8	
3462,50	24,6	3462,50	23,7	3460,94	47,6	3460,94	39,3	
				3679,69	39,0	3679,69	28,7	
3715,63	31,7	3715,63	36,6	3717,19	44,7	3715,63	44,2	
3871,88	27,2	3870,31	24,3	3873,44	32,3	3870,31	42,9	
				4151,56	28,0	4150,00	25,7	
4232,81	14,9	4232,81	22,5	4229,69	35,2	4231,25	38,7	
4776,56	25,5	4778,13	13,5	4776,56	34,9	4778,13	30,2	
4818,75	19,7	4817,19	14,4	4817,19	30,9	4815,63	29,6	

Fig. A1.5- POSICIÓN 5: Tabla de los parciales de la campana por golpe de martillo.

POSICIÓN 6

1º Cuadrante		2º cuadrante		3º cuadrante		4º cuadrante		PARCIALES
Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	
10,94	42,3	12,50	40,3	10,94	41,5	12,50	40,3	
				68,75	28,6	67,19	27,0	
190,63	20,4	190,63	25,5			190,63	29,3	
		206,25	25,0	204,69	27,7			
364,06	56,3	364,06	61,2	362,50	64,2	364,06	63,0	HUM
653,13	62,7	653,13	58,8	653,13	64,3	653,13	61,4	PRIME
851,56	44,5	850,00	43,0	851,56	56,3	850,00	52,2	TIERCE
1057,81	54,9			1057,81	45,2	1057,81	50,5	QUINT
		1064,06	52,0	1064,06	52,5	1064,06	57,9	
1431,25	35,0	1431,25	20,8	1432,81	44,3	1431,25	37,6	NOMINAL
1675,00	46,0	1676,56	39,1	1673,44	40	1676,56	31,1	
1703,13	34,4			1701,56	43,7	1701,56	39,5	
1801,56	45,4	1796,88	40,3	1796,88	50,2	1796,88	46,0	
2039,06	22,7	2039,06	23,4	2039,06	33,2	2039,06	32,5	
2067,19	34,4	2067,19	29,7	2067,19	40,7	2067,19	37,1	
2251,56	32,6			2246,88	29,3	2245,31	36,5	
2667,19	50,2	2667,19	43,6	2665,63	50,6	2667,19	52,9	
2723,44	47,9	2723,44	51,4	2725,00	48,2	2721,88	40,5	
2770,31	42,5	2768,75	21,7	2768,75	51,7	2768,75	48,9	
3142,19	37,1	3142,19	26,9	3142,19	46	3142,19	39,8	
3151,56	34,1	3151,56	32,3	3148,44	44	3151,56	42,7	
3275,00	37,8			3273,44	45,3	3275,00	36,4	
3462,50	31,4	3462,50	27,1	3460,94	39,4	3460,94	37,5	
3681,25	26,8	3679,69	20,6	3678,13	29,1	3679,69	27,6	
3715,63	45,5	3715,63	39,6	3715,63	27,3	3715,63	38,6	
3837,50	30,3	3837,50	22,7	3832,81	27,8	3837,50	29,2	
3857,81	23,4	3856,25	26,5	3856,25	30,7	3856,25	29,0	
3871,88	34,1	3870,31	33,1	3870,31	27,3	3870,31	41,4	
4232,81	33,3	4232,81	18,5	4229,69	34,2	4231,25	35,4	
4776,56	28,5			4775,00	27,9			

Fig. A1.6- POSICIÓN 6: Tabla de los parciales de la campana por golpe de martillo.

POSICIÓN 7

1º cuadrante		2º cuadrante		3º cuadrante		4º cuadrante		PARCIALES
Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	
142,19	23,5			139,06	21,4			
		190,63	30,8			190,63	34,2	
		281,25	26,0			279,69	29,4	
364,06	51,4	364,06	60,0	362,50	62,3	364,06	61,2	HUM
653,13	61,0	653,13	60,5	653,13	62,7	653,13	62,9	PRIME
717,19	35,8			717,19	35,5			TIERCE
851,56	46,5	850,00	49,3	850,00	56,2	848,44	54,8	
1057,81	51,8			1057,81	51,8	1057,81	49,0	QUINT
		1064,06	55,7	1064,06	51,6	1064,06	59,9	NOMINAL
1431,25	33,6	1431,25	32,6	1432,81	44,7	1431,25	40,4	
1675,00	48,7	1676,56	46,6	1675,00	52,8	1676,56	36,7	
						1701,56	53,2	
1801,56	37,5	1796,88	36,6	1796,88	54,3	1796,88	54,9	
1871,88	20,1	1870,31	20,9	1870,31	35,1	1870,31	37,9	
2039,06	25,2	2039,06	25,3	2039,06	28,7	2039,06	34,7	
2068,75	36,4	2067,19	33,7	2067,19	43,1	2067,19	40,1	
2245,31	36,5	2245,31	39,8	2246,88	48,0	2245,31	45,2	
2668,75	44,0	2667,19	42,9	2667,19	53,3	2667,19	55,8	
2723,44	43,0	2723,44	41,6	2725,00	43,5	2725,00	32,3	
2768,75	38,1	2768,75	18,5	2768,75	39,3	2768,75	46,0	
3100,00	37,7	3098,44	30,1	3098,44	43,6	3096,88	29,3	
		3142,19	36,9	3142,19	46,0	3142,19	45,7	
3151,56	45,7	3151,56	33,5	3151,56	40,6	3148,44	49,1	
3273,44	39,3	3275,00	24,4	3275,00	44,4			
3715,63	29,7	3714,06	41,5	3717,19	29,3	3715,63	44,1	
3809,88	22,9	3810,94	20,2	3809,38	36,4	3809,38	30,7	
3857,81	31,0			3856,25	37,8	3856,25	34,0	
		3870,31	34,8	3870,31	38,8	3870,31	44,7	
4153,13	33,8	4151,56	29,3	4151,56	38,1	4150,00	35,4	
4232,81	21,6	4232,81	33,9	4229,69	32,0	4231,25	35,0	

Fig. A1.7- POSICIÓN 7: Tabla de los parciales de la campana por golpe de martillo.

POSICIÓN 8

1º cuadrante		2º cuadrante		3º cuadrante		4º cuadrante		PARCIALES
Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	
12,50	43,2	10,94	39,5	12,50	44,7	10,94	41,8	
70,31	36,4	75,00	32,6	70,31	38,4	78,13	40,4	
		190,63	34,6	192,19	32,5	190,63	40,1	
362,50	43,8	364,06	54,3	362,50	56,2	364,06	59,2	HUM
653,13	49,3	653,13	56,0	653,13	59,9	653,13	63,3	PRIME
717,19	33,3			717,19	33,6			
851,56	36,6	850,00	43,9	850,00	43,8	848,44	45,4	TIERCE
1057,81	47,8			1057,81	49,3			QUINT
		1064,06	48,6	1064,06	47,1	1064,06	47,9	
1429,69	17,9	1432,81	20,2	1432,81	26,8	1431,25	29,9	NOMINAL
1675,00	42,2	1676,56	43,6	1673,44	42,5	1678,13	33,1	
1701,56	40,6			1701,56	36,8	1701,56	48,4	
		1796,88	35,3			1796,88	39,3	
1801,56	38,6			1801,56	37,4	1801,56	39,2	
2067,19	30,2	2067,19	27,9	2067,19	38,8	2067,19	32,3	
2246,88	25,4	2245,31	34,1	2245,31	39,3	2245,31	38,0	
2668,75	38,9	2668,75	37,0	2667,19	45,2	2665,63	45,0	
2723,44	44,7	2723,44	53,3	2725,00	46,5	2721,88	39,2	
2768,75	41,6	2768,75	25,2	2768,75	51,0	2768,75	51,0	
3015,63	29,2			3012,50	29,5			
3100,00	30,1	3098,44	27,8	3100,00	25,3	3098,44	20,2	
3151,56	40,9	3150,00	32,7	3150,00	43,5	3148,44	45,4	
3273,44	33,1	3273,44	22,5	3273,44	43,7	3273,44	22,5	
3462,50	22,0	3462,50	21,0	3462,50	31,8	3460,94	24,2	
3715,63	43,9	3717,19	47,3	3717,19	33,9	3715,65	36,8	
3837,50	32,2	3837,50	28,1	3837,50	23,5	3837,50	23,5	
3873,44	34,3	3870,31	40,5	3870,31	39,3	3870,31	39,3	
4153,13	26,6	4150,00	18,0	4150,00	29,9	4150,00	25,4	
4229,69	28,8	4232,81	36,9	4231,25	36,5	4231,25	36,5	
4776,56	27,4	4778,13	25,9	4776,56	28,3	4776,56	28,3	

Fig. A1.8- POSICIÓN 8: Tabla de los parciales de la campana por golpe de martillo.

POSICIÓN 9

1º cuadrante		2º cuadrante		3º cuadrante		4º cuadrante		PARCIALES
Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	
12,50	46,7	10,94	42,4	12,50	39,8	10,94	42,3	
70,31	34,7	82,81	34,6	70,31	40,8	78,13	39,4	
189,06	20,4	190,63	36,7	192,19	35,1	190,63	38,4	
		206,25	33,9			204,69	34,6	
364,06	45,6	364,06	54,5	362,50	51,6	364,06	51,4	HUM
653,13	50,9	653,13	56,4	653,13	53,8	653,13	56,5	PRIME
718,75	33,0			717,19	32,8			
851,56	33,5	850,00	46,8	850,00	38,9	850,00	40,2	TIERCE
1057,81	41,9			1057,81	38,3			QUINT
		1064,06	49,2	1062,50	39,1	1064,06	44,5	
1431,25	20,6	1431,25	30	1432,81	32,7	1431,25	28,2	NOMINAL
1675,00	39,2	1676,56	50,9	1673,44	23,7	1673,44	28,2	
1703,13	36,2			1701,56	37,4	1701,56	41,4	
1801,56	26,9	1796,88	33,7	1801,56	35,7	1796,88	33,6	
1870,31	26,2	1870,31	24,3	1870,31	40,0	1870,31	33,0	
2068,75	31,7	2067,19	23,4	2067,19	35,4	2067,19	30,2	
2246,88	30,1	2245,31	38,7	2245,31	36,9	2245,31	40,0	
2668,75	38,9	2667,19	38,7	2667,19	41,7	2665,63	41,6	
2723,44	48,4	2721,88	55,7	2725,00	45,3	2721,88	39,7	
2768,75	41,6	2768,75	26,3	2768,75	49,4	2768,75	49,2	
3100,00	31,1	3100,00	16,6	3100,00	25,1	3098,44	20,5	
				3142,19	44,5	3142,19	43,0	
3151,56	40,5	3151,56	38,9			3150,00	45,2	
3273,44	32,0	3275,00	26,5	3275,00	38,9	3275,00	25,0	
3460,94	24,9	3462,50	26,2	3462,50	29,3	3460,94	30,8	
3715,63	44,5	3715,63	47,5	3717,19	32,9	3715,63	43,5	
3832,81	29,0	3837,50	25,4	3835,94	31,2	3837,50	22,1	
3871,88	32,4	3870,31	39,1	3870,31	30,5	3870,31	43,7	
4232,81	33,5	4232,81	39,6	4228,13	34,4	4231,25	39,4	
4776,56	25,0	4778,13	23,4	4775,00	25,5	4776,56	30,0	

Fig. A1.9- POSICIÓN 9: Tabla de los parciales de la campana por golpe de martillo.

POSICIÓN 10

1º cuadrante		2º cuadrante		3º cuadrante		4º cuadrante		PARCIALES
Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	
71,88	39,0			68,75	39,5	65,63	32,0	
189,06	41,2	189,06	39,4					
201,56	41,0	204,69	38,7	200,00	45,6	200,00	39,6	
364,06	47,8	364,06	52,6	362,50	46,1	362,50	49,9	HUM
				620,31	27,6	620,31	25,4	
653,13	46,2	653,13	49,6	653,13	50,4	653,13	50,5	PRIME
717,19	37,2	717,19	27,8					
850,00	25,5	850,00	34,4	851,56	28,0	850,00	29,6	TIERCE
1057,81	40,2							QUINT
		1064,06	43,1	1062,50	45,5	1064,06	37,5	
		1431,25	25,1			1432,81	23,5	NOMINAL
1459,38	32,5			1450,00	36,6			
1675,00	44,2	1678,13	43,0	1675,00	41,2	1676,56	36,6	
				1701,56	44,2	1701,56	36,6	
1871,88	49,7	1870,31	41,5	1870,31	55,3	1870,31	43,4	
1948,44	33,4			1951,56	31,1			
2067,19	40,9	2067,19	34,0	2067,19	44,9	2067,19	34,9	
		2245,31	25,0	2245,31	31,5	2245,31	28,8	
2668,75	45,6	2665,63	35,9	2668,75	47,7	2668,75	39,4	
2723,44	33,5	2721,88	41,7	2723,44	35,9	2725,00	25,0	
2768,75	27,2	2768,75	24,0	2768,75	40,6	2768,75	31,2	
3150,00	42,3	3148,94	38,1	3151,56	37,8	3148,44	42,9	
3256,25	35,4	3256,25	27,8			3256,25	32,4	
3275,00	44,5			3273,44	44,3	3275,00	36,9	
3462,50	31,8	3460,94	22,3	3462,50	31,9	3460,94	32,1	
3715,63	42,0	3717,19	37,9	3715,63	30,1	3715,63	22,6	
3856,25	31,6	3856,25	30,5			3856,25	29,2	
3870,31	31,5	3871,88	32,2			3870,31	31,6	
3932,81	33,5			3931,25	36,3			
4125,00	31,1			4125,00	31,8			

Fig. A1.10- POSICIÓN 10: Tabla de los parciales de la campana por golpe de martillo.

ANEXO II

MANUAL DEL PROGRAMA WAVANAL

1. INTRODUCCIÓN

El propósito del programa Wavanal es el análisis de la forma de onda de la campana a través del análisis sus sonidos. Este programa nos proporciona las representaciones gráficas de los sonidos registrados, la identificación de las frecuencias de los parciales, y la síntesis de sonidos por medio de una lista de parciales.

El programa Wavanal nos permite la determinación completa del carácter armónico de una campana usando las instalaciones disponibles de cualquier PC. También permite comprobar como va cambiando la afinación de una campana y proporciona el sonido resultante.

Los requisitos mínimos para el uso del programa son:

Windows 95, 98, 2000, CPU de XP o del NT 4.0.

Suficiente CPU y RAM para la ejecución de las aplicaciones.

Tarjeta del sonido

Para la instalación del programa simplemente hay que copiar el ejecutable Wavanal.exe en cualquier directorio y ejecutarlo desde allí. Si necesitáramos recoger sonidos desde este programa necesitaríamos un único equipo adicional, como un grabador o una cámara de vídeo (para capturar el sonido de la campana) y un cable capaz de conectar el grabador o la cámara con la tarjeta de sonido. Solo se trabaja con sonido monoaural. Usando un ordenador portátil, con

una tarjeta de sonido y un micrófono, es posible capturar los archivos requeridos del sonido directo de la campana, ya que este programa es capaz de registrar los sonidos directos de un micrófono

El resto de este documento explica como trabaja el programa, como trabajar con sus resultados y como funcionan sus distintas ventanas.

2. ANÁLISIS DEL SONIDO DE LA CAMPANA

Wavanal proporciona las facilidades del análisis detallado de una campana, la investigación dentro de los cambios de amplitud en el tiempo de cada parcial, etc. Todo esto requiere la determinación de las frecuencias de los principales parciales de una campana. El procedimiento es el siguiente:

- Obtener el sonido digitalizado de la campana.
- Hacer funcionar Wavanal, y seleccionar el botón "*Analyse Bell*", que esta situado en la parte superior derecha de la pantalla.
- Utilizar el botón "*Open*" de la pantalla para seleccionar el sonido de la campana que ha sido registrado previamente.
- Wavanal procesará la campana automáticamente, y mostrará los parciales resultantes, identificando los principales.

Si Wavanal no es capaz de identificar los parciales, es probable que falte el parcial HUM o el PRIME. Para solucionar este problema se utiliza la ventana de "*View Tr, / Get Part*" que muestra la transformada de la señal, y en ella se seleccionan los parciales que no hayan sido detectados. Simplemente seleccionando los parciales con el botón "*Add Partial*", éstos se agregaran a la lista y pulsando en "*View / Edit partials*" el programa los mostrará.

Para comprobar que el parcial NOMINAL se ha identificado correctamente, se utiliza el programa Wavanal para crear un tono con la mitad de la frecuencia de éste parcial, que equivale a la frecuencia del parcial PRIME. Si este tono suena

con la misma tonalidad que la campana, los resultados son correctos. Para llevar esto a cabo, el Wavanal proporciona un segundo programa llamado Bell Pitcher que seleccionando la frecuencia fundamental crea un tono puro y facilita la comparación con el sonido original de la campana para escucharlo simultáneamente y así saber si concuerda la tonalidad.

Wavanal muestra la nota correspondiente a cada frecuencia, por ejemplo F(2)+22 que corresponda a una frecuencia de 707,5 Hz. Las notas están basadas en A (1) = 440Hz o A (1) = 435Hz. El número entre paréntesis indica la octava, y el siguiente número dentro del rango (-50,+50), indica el número de centésimas que se separan de la nota exacta.

Seguidamente se explica la forma de utilizar cada ventana del programa.

3. EL PROGRAMA WAVANAL

Esta sección del documento explica como trabaja el programa WAVANAL, y la teoría que hay detrás de su operación.

3.1 ALMACENAR DATOS E INSTALACIONES BÁSICAS

WAVANAL puede almacenar y procesar cuatro tipos de información sobre un mismo sonido de campana:

- Su forma de onda, equivalente a un archivo .wav.
- Su transformada, con la amplitud del sonido en un rango de frecuencias.
- Las frecuencias de los parciales y los intervalos entre ellos.
- Y la información sobre la forma en que varía la amplitud de cada parcial en un cierto intervalo de tiempo.

El sonido se almacena como una serie de valores muestreados con el valor de la amplitud de la forma de onda en cada instante. La transformada es una lista de

frecuencias y de valores, creada a partir de una serie de cálculos aritméticos (Transformada de Fourier) sobre los datos de la forma de onda. Se asume que el sonido de la campana esta compuesto de un sistema de parciales. Habrán cuatro parámetros por cada parcial que describirán como varía se amplitud en el tiempo.

El programa de Wavanal proporciona las instalaciones para leer independientemente cada formato de datos de un archivo de disco, para escribirlo al archivo, para verlo y para corregir datos, además de para realizar transformaciones entre varios formatos. Los archivos de sonido se leen y se escriben en formato .wav. Las transformadas (FT) y los parciales se escriben al disco en la extensión .CSV para permitir su transformación posterior, visualizar gráficos, etc. utilizando una hoja Excel. Las listas de los parciales y su información asociada se guardan usando la extensión .PAR. Y por último, la información detallada de cómo varía la amplitud en el tiempo de cada parcial se almacena con la extensión .DEC.

3.2 COMPENSACIÓN POR LA VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL GRABADOR

Las variaciones en la velocidad del grabador o en la lectura del registrador o (posiblemente) los errores en el índice de la numeración del PC, pueden dar lugar a la determinación incorrecta de las frecuencias. Si existen tales variaciones, el archivo de la forma de onda se podrá estirar o contraer, y así cada frecuencia será aumentada o disminuida por el mismo factor. Wavanal proporciona los medios para adaptar dicho factor.

3.3 CAMBIAR DE FORMATO

El diagrama de la figura A2.1 muestra las posibles transformaciones entre los cuatro formatos.

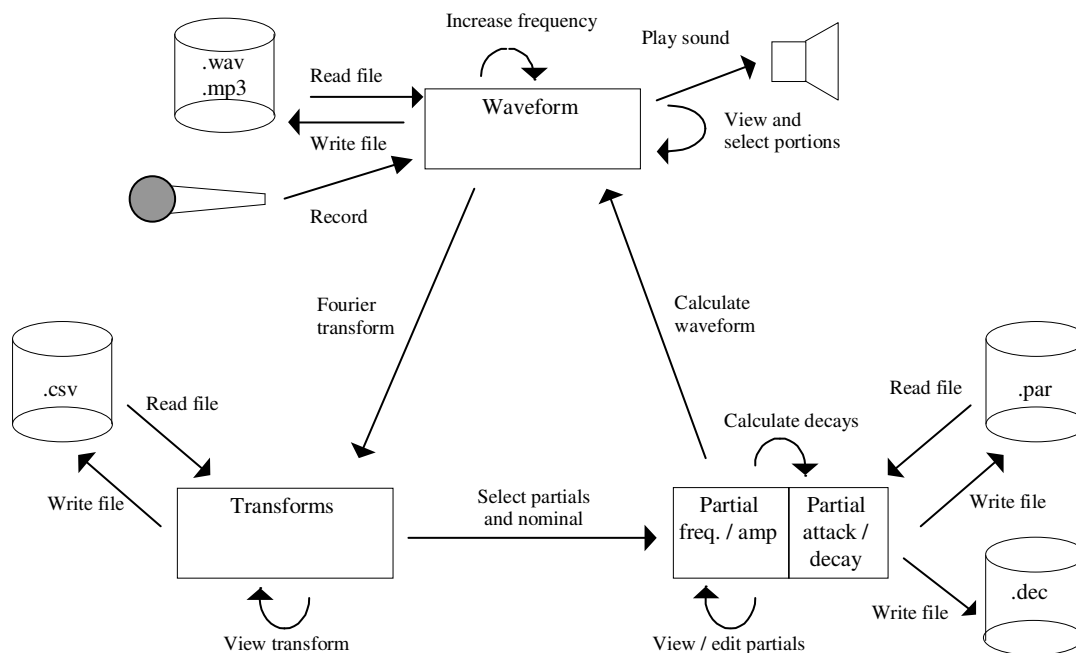


Fig. A2.1 – Diagrama con las cuatro posibles transformaciones entre los cuatro formatos.

3.3.1 PASAR DE FORMA DE ONDA A TRANSFORMADA EN FRECUENCIA

Esta transformación es llevada a cabo a través de la Transformada de Fourier. El programa permite la selección de una porción de la forma de onda, la banda de frecuencias a examinar, y el intervalo de frecuencia entre cada transformada. Wavanal por defecto esta configurado con una serie de valores. Una vez que la transformada haya sido calculada, Wavanal facilita ver la representación gráfica y la selección de los parciales (sus frecuencias).

La precisión con la que se determinan las frecuencias de los parciales puede estar determinada por la longitud de la muestra de sonido. Se necesitan muestras de una duración considerable para tener una buena precisión su detección.

El programa utiliza la Transformada de Fourier sin considerar la fase, es decir, Wavanal genera la amplitud del sonido para cada frecuencia en un rango predeterminado. La longitud de la transformada esta determinada por el intervalo

de frecuencia elegido. Si se selecciona una sección corta de la forma de onda, la parte restante de la transformada se rellena con ceros. Si se selecciona una sección demasiado larga, los datos adicionales del final se ignoran.

3.3.2 PASAR DE TRANSFORMADA EN FRECUENCIA A PARCIALES

La representación de la transformada en pantalla presenta opciones para extraer los parciales automáticamente, y que además el usuario pueda seleccionar y deseleccionar frecuencias individuales identificadas como parciales. Wavanal almacena hasta 25 parciales. Si se selecciona un vigésimo sexto parcial, el parcial con la amplitud más baja se substituye. Los cinco parciales de Simpson son automáticamente identificados entre los parciales seleccionados.

La información de los parciales extraída con la representación gráfica de la transformada consiste en la frecuencia del parcial y su amplitud. Wavanal también puede realizar una serie de transformadas en secciones cortas de la forma de onda para determinar cómo varía la amplitud de cada parcial en un cierto intervalo de tiempo.

La ventana nos muestra las frecuencias de los parciales, amplitudes, tiempos de ataque y el índice del decaimiento para ser visto y corregido. Esta pantalla también permite la entrada de una frecuencia base desde la cual pueden ser calculados los intervalos en centésimas para todos los parciales, y de la identificación de los parciales de Simpson.

3.3.3 PASAR DE PARCIALES A FORMA DE ONDA

La última transformación que admite el Wavanal es la de transformar parciales a forma de onda. Asumiendo el uso del formato de parciales mencionado en el apartado 3.1, se realiza un sistema de cálculos para reconstruir la forma de onda desde el sistema de parciales diseñado en Wavanal. Esta forma de onda se sobrescribe en cualquier forma de onda cargada en disco. El programa permite la

entrada de la frecuencia de muestreo y la longitud de la muestra antes del cálculo, y crea una muestra de 16 bits monoaural. Una vez que se haya creado la forma de onda, puede ser guardada o ser utilizada por Wavanal para transformar eb frecuencia como si fuera un archivo .wav.

Esta facilidad permite que los resultados del análisis sean comparados acústicamente con la señal original, además de volver a evaluar los cambios que se produzcan en las características de los parciales.

4. DESCRIPCIÓN DE LAS PANTALLAS

Esta sección cubre todas las áreas de Wavanal necesitadas para el análisis de la tonalidad, incluyendo la identificación automática y el nombramiento de los parciales principales y la facilidad del análisis directo "*Analyse Direct*". El programa es más extenso ya que posee funciones avanzadas sobre la investigación en los cambios de la amplitud de cada parcial en un espacio de tiempo, y su síntesis, pero este tema no se abarca en este proyecto.

4.1 ANÁLISIS DE LA TONALIDAD

4.1.1 VENTANA PRINCIPAL

La ventana principal aparece cuando se ejecuta el programa. Proporciona la entrada y visualización los parámetros y el control de varias funciones. Hay cuatro áreas en la ventana principal, correspondiendo a los tres tipos de datos que utiliza el programa, más una sección sobre el uso de sí mismo.

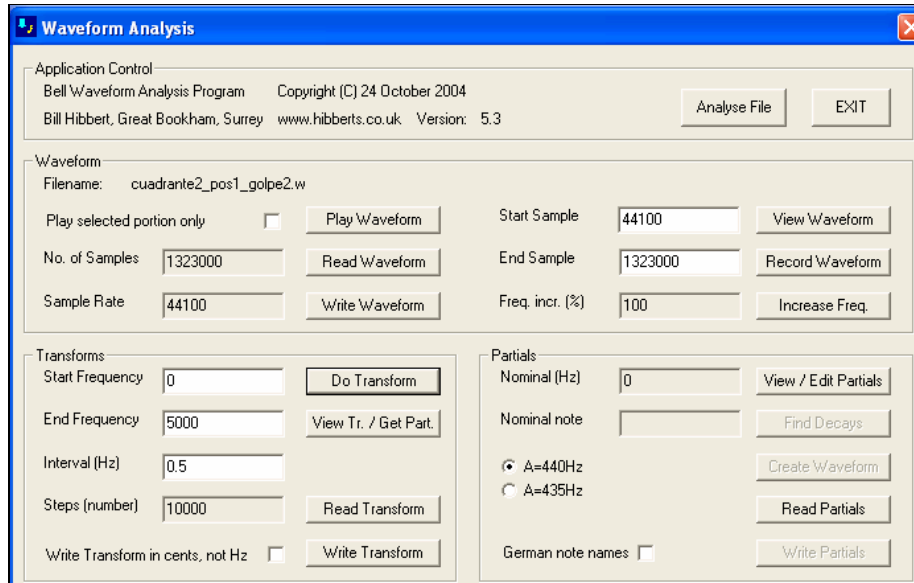


Fig. A2.2 – Ventana principal del Wavanal.

BOTONES

Los botones que están en color gris claro están deshabilitados debido a que requieren datos para realizar sus funciones que no se han cargado ni creado.

Cada uno de los tres tipos de datos puede ser leído o escrito al disco usando los botones “*Read*” y “*Write*”. Al pulsar estos botones se despliega la caja de diálogo estándar permitiendo que el usuario hojee el disco, seleccione archivos, e incorpore nombres de fichero. Si un archivo no puede ser leído o escrito, aparecen mensajes de error. El “*Write transform in cents, not Hz*”, permite escribir el archivo de la señal transformada en frecuencia al disco en un formato especial que produce gráficos de la intensidad de la transformada con sus frecuencias y amplitudes normalizadas.

El botón “*Analyse File*” proporciona la detección automática de los parciales y el nombramiento de los parciales. El éxito del proceso automático depende de la calidad de la grabación. Si faltan parciales o se necesita más información habrá que utilizar las siguientes pantallas.

Los botones “*View Waveform*”, “*Record Waveform*”, “*View Transform / Get Partials*”, “*View / Edit Partials*”, “*Find Decays*” y “*Create Waveform*” llaman a ventanas descritas más adelante. El botón “*Play Waveform*” reproduce la forma de onda con la que se está trabajando. Si se selecciona la opción “*Play selected portion only*” sólo se trabajará con la porción de la forma de onda definida por “*Start sample*” y “*End sample*”. El botón “*Do Transform*” empieza el proceso de transformación a frecuencia (FT) usando los parámetros de la forma de onda y de las secciones de la ventana principal. Pulsando el botón “*Increase Freq*” aparece una pantalla que proporciona la corrección del factor con el cual la forma de onda ha sido estirada o contraída para compensar las variaciones de la velocidad del grabador. Y por último el botón “*Exit*” muestra al usuario como abandonar el programa.

CAMPOS DE DATOS

Los datos se pueden incorporar directamente por el usuario en los campos con fondo blanco. Los campos con fondo gris se derivan o se calculan de otros datos.

El campo “*Filename*” muestra el nombre del archivo de sonido cargado actualmente e indica si se ha modificado la forma de onda. El “*No. of Samples*” muestra la longitud de la forma de onda que se ha cargado. “*Sample Rate*” muestra el índice de muestreo de la onda en muestras por segundo. “*Start Sample*” y “*End Sample*” muestran el comienzo y el final de la muestra para poder seleccionar una porción de la forma de onda. Wavanal intenta fijar el comienzo de la muestra en el instante del golpeo, pero el usuario puede incorporar valores directamente en estos campos, o utilizar la ventana de “*View Waveform*” para hacer la selección. “*Freq. Incr.*” muestra el porcentaje por el cual la forma de onda ha sido estirada o contraída si se ha utilizado antes la función “*Freq. Incr.*”.

Los campos “*Start Frequency*”, “*End Frequency*” e “*Interval (Hz)*” se utilizan para fijar los parámetros del cálculo de la transformada de Fourier. Todos los

valores están en Hertzios (es decir, en ciclos por segundo). El campo “*Steps (number)*” se calcula a partir de los otros tres anteriores si se han incorporado los datos correctamente.

El campo “*Nominal (Hz)*” indica la frecuencia nominal de la campana. Esta frecuencia se identifica automáticamente cuando los parciales son seleccionados desde la opción “*View Transforms / Get Partial*”, y se puede cambiar manualmente en la opción “*View / Edit Partial*”. También se indica el nombre de la nota nominal.

Los nombres de las notas se calculan de una base de $A=440\text{Hz}$ (LA_3), o de $A=435\text{Hz}$, según se seleccione usando los botones. Si se selecciona la opción “*German note names*” entonces la nota Bb (SI bemol) se llamará B y la nota B será la H. Los valores por defecto, son $A=440$ y “*German note names*” deshabilitado.

4.1.2 DETALLES DE LA FORMA DE ONDA

La ventana que se muestra en la figura A2.3 aparece cuando se abre un archivo de sonido desde la pantalla principal. La pantalla muestra la información técnica de la cabecera del fichero. Al pulsar el botón “*OK*” volvemos a la ventana principal. Si la cabecera del fichero no es la de un fichero .wav o .mp3 válido, se mostrará un mensaje de error.

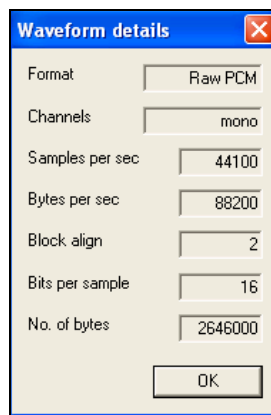


Fig. A2.3 – Ventana que muestra los detalles del archivo de sonido

Wavanal lee cualquier formato de sonido siempre que los codecs estén instalados. Para leer archivos MP3 se necesita instalar un codec MP3. Los archivos mono y estéreos son legibles, siempre que tengan una resolución de 8 o 16 bits. El número de muestras se estima desde la cabecera del fichero, pero para los archivos comprimidos puede variar el número de muestras.

4.1.3 VER LA FORMA DE ONDA

Esta pantalla aparece cuando pulsamos el botón “*View Waveform*”. Permite ver la forma de onda y seleccionar una porción para procesar.

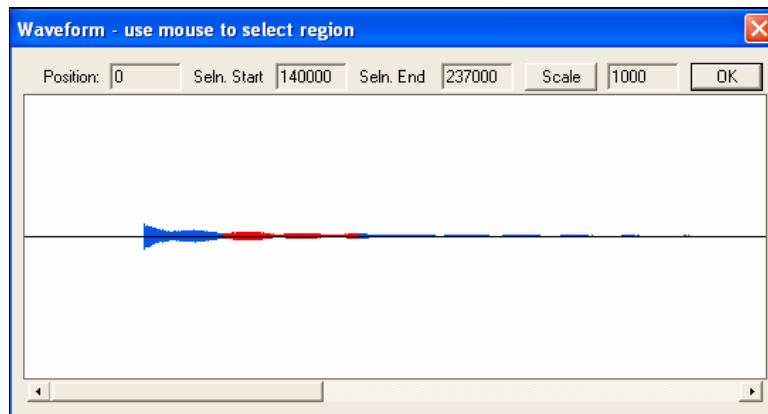


Fig. A2.4 – Ventana que muestra la forma de onda del fichero de sonido

El campo de la izquierda “*Position*” muestra el punto de comienzo. Los campos “*Selection Start*” y “*Selection End*” muestran el principio y el final de la parte seleccionada. Las unidades de los tres campos están en muestras. La porción seleccionada de la forma de onda aparece en color rojo y las porciones no seleccionadas en azul. Pulsando “*Scale*” repetidamente se re-escala el gráfico.

La barra deslizante del gráfico permite ver toda la señal. Pulsando y manteniendo el ratón dentro del gráfico se selecciona una porción de la forma de onda.

Con el botón “*OK*” volvemos a la ventana principal.

4.1.4 VER LA TRANSFORMADA DE FOURIER Y SELECCIONAR PARCIALES

Esta pantalla permite ver los resultados de aplicar la transformada de Fourier a la señal, y trabajar con sus parciales.

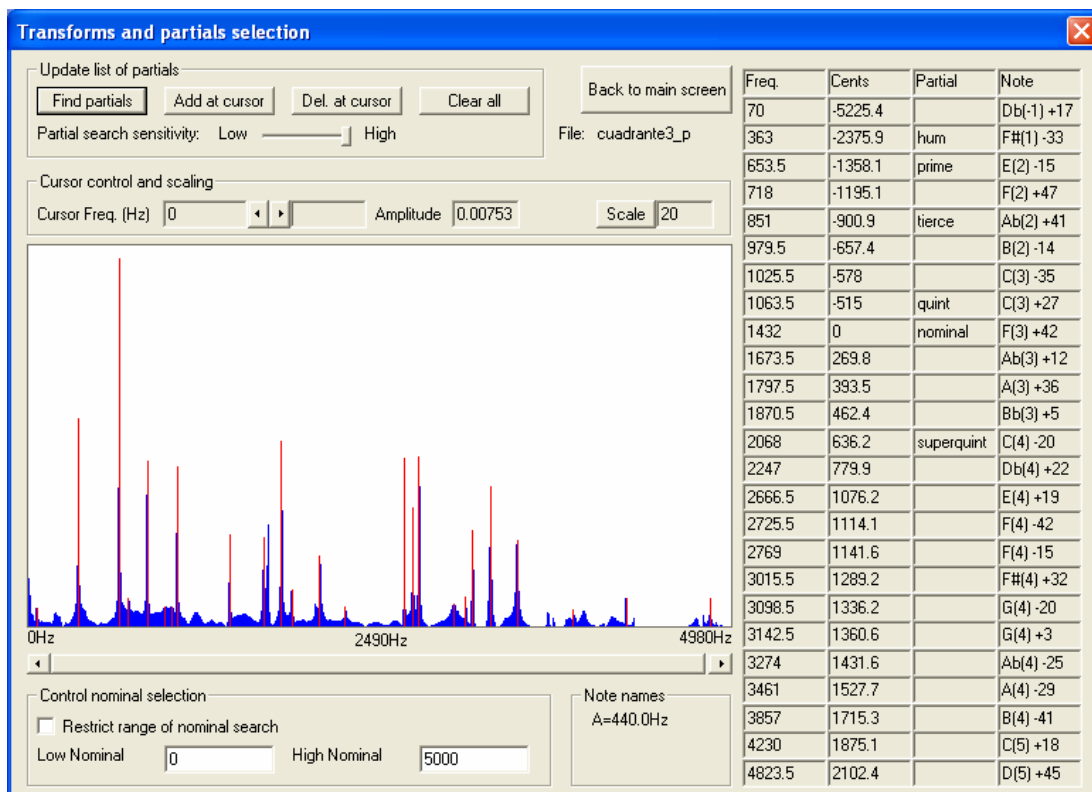


Fig. A2.5 – Ventana que muestra la transformada de Fourier y los parciales

El gráfico muestra la amplitud de la transformada en eje Y y la frecuencia en el eje X. Un cursor de color verde que está inicialmente en el lado izquierdo de la pantalla, se puede mover pulsando en el gráfico, o usando las flechas que se ven a la derecha del campo “Cursor Freq. (Hz)”. El campo “Cursor Freq. (Hz)” y el “Amplitude” indican la frecuencia y la amplitud de la posición del cursor. También aparece la nota que corresponde a dicha posición.

El boton “Scale” y la barra deslizante del fondo del gráfico trabajan de la misma forma que la explicada en la ventana anterior.

La información que se muestra en la ventana de la figura A.26 es de dos tipos. Las columnas *Freq (Hz)*, *Tail Amp*, *Cents y Partial*, contienen los datos que se derivan del transformara frecuencia. Las columnas *Splash Amp*, *Attack y Decay*, permiten incorporar información adicional sobre el perfil del tiempo del parcial, permitiendo la simulación exacta de los sonidos de la campana. La última columna indica las notas correspondientes a cada frecuencia.

Los parciales están ordenados por frecuencia. Para suprimir un parcial se fija su frecuencia a cero y si se quieren agregar más parciales se pueden añadir al final. Los valores de las centésimas se calculan a partir de la frecuencia nominal. Al pulsar "*Recalc*" se vuelven a calcular todos los parámetros con los últimos datos añadidos.

La frecuencia nominal se puede incorporar directamente en el campo de la parte superior de la pantalla, puesto que el botón "*Recalc*" calculará de nuevo los datos.

El botón del "*Clear*" suprime todos los parciales de la lista. EL botón "*OK*" vuelve a la ventana principal.

Los parámetros de *Splash Amp*, *Attack y Decay* se utilizan para crear una forma de onda. (Estos parámetros entran en las funciones avanzadas del programa, que no se estudiarán en este proyecto).

ANEXO III

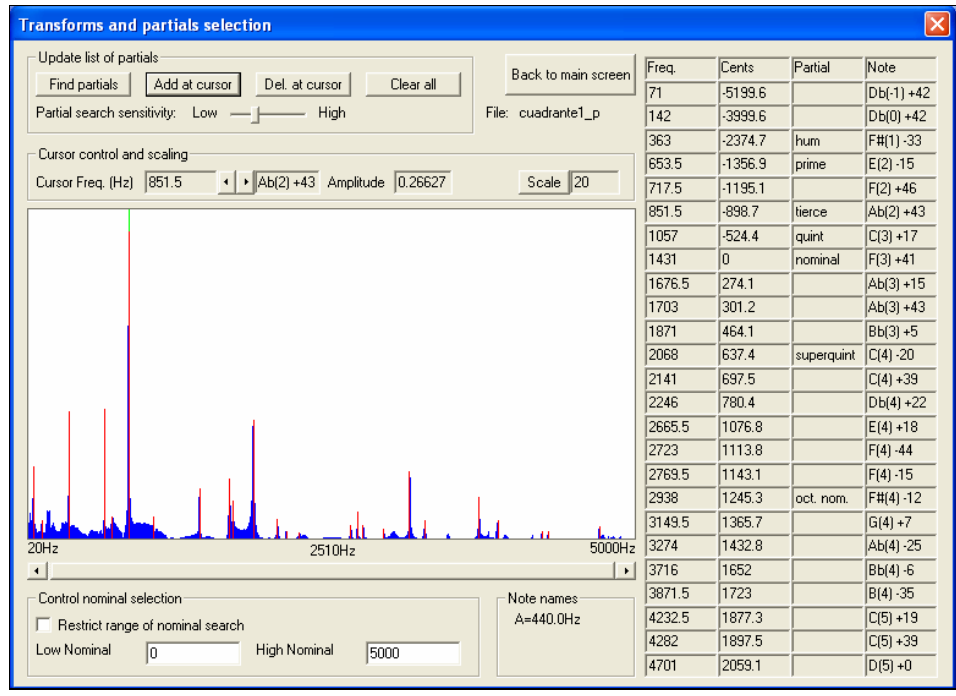
RESULTADOS WAVANAL

Este anexo muestra los resultados obtenidos a partir del software Wavanal. Los resultados se muestran en gráficos tal y como se explico en el capítulo 3.3.

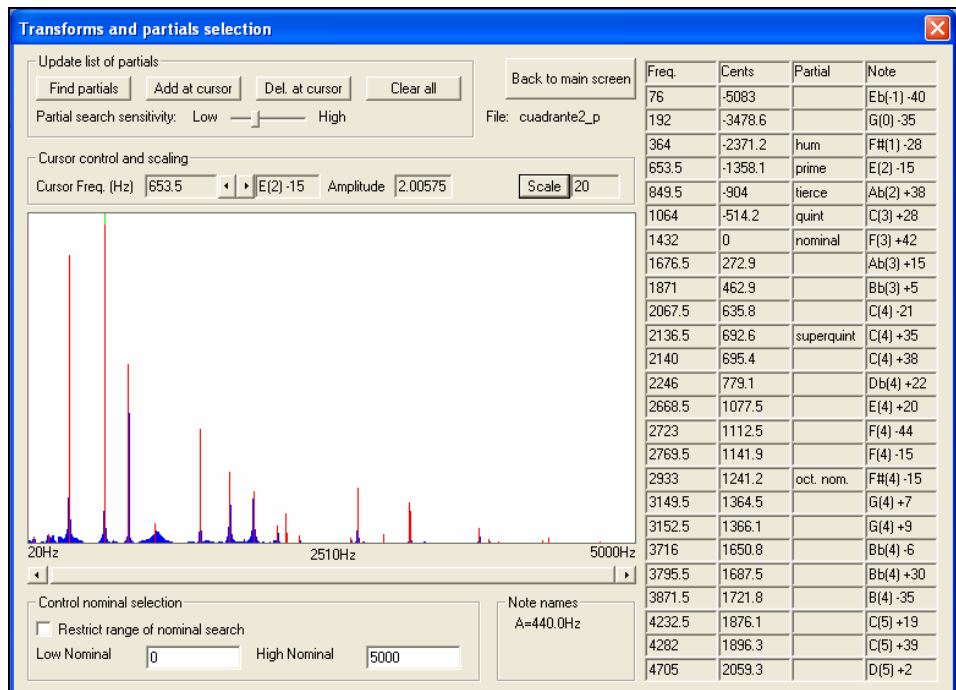
Para cada posición de golpeo se presentan cuatro gráficos, uno por cuadrante. Estos resultados son obtenidos a partir de una grabación de la excitación de la campana por posición, que representa a las tres señales con las que se hizo el promediado que nosotros estudiamos en el capítulo 3.2, aunque el estudio se haya realizado para todas las señales de audio capturadas.

A continuación se muestran las figuras ordenadas por posiciones de golpeo y cuadrantes (ver figura 3.19).

POSICIÓN 1

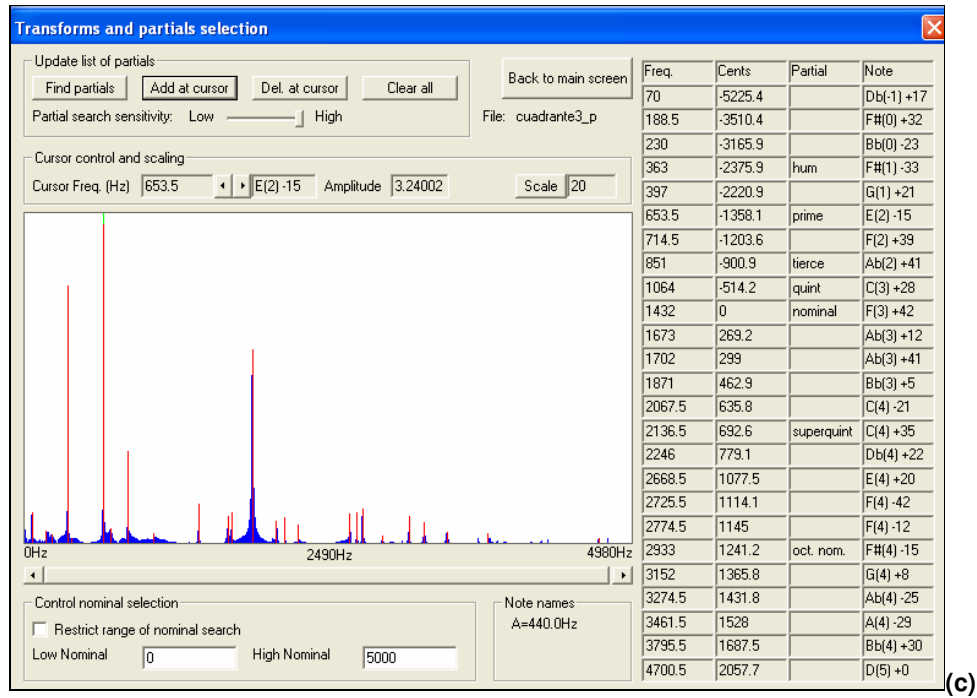


(a)

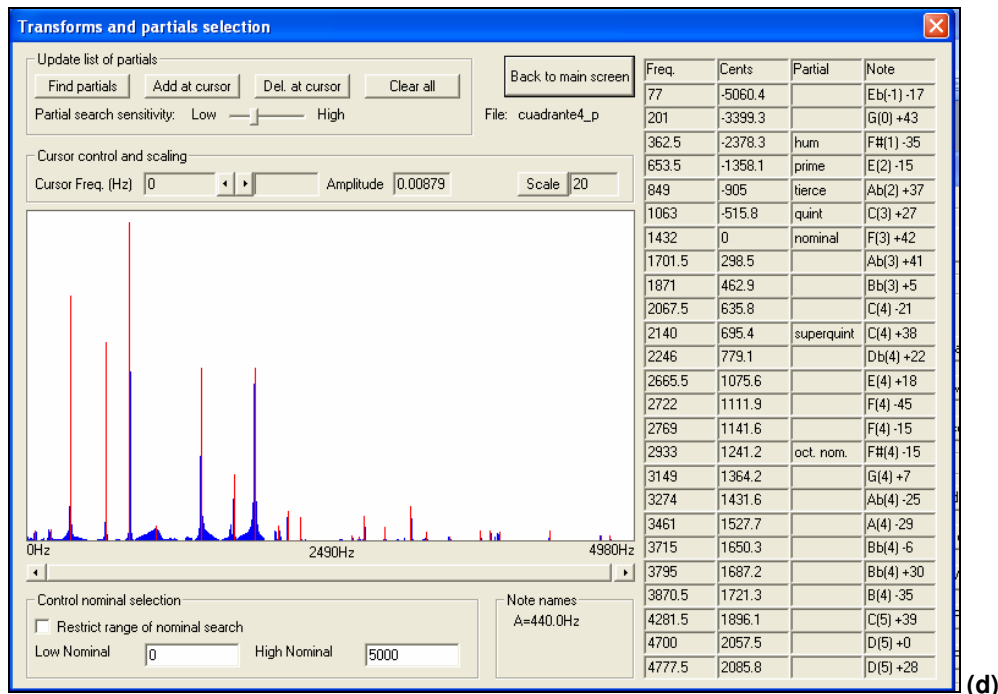


(b)

ANEXO III – RESULTADOS DEL WAVANAL POR GOLPE DE MARTILLO



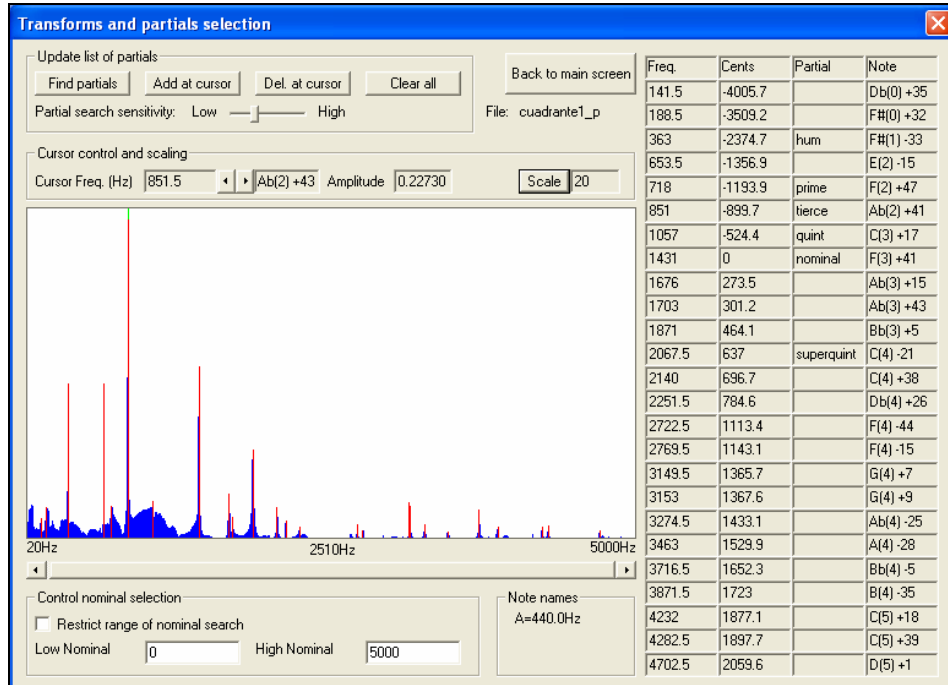
(c)



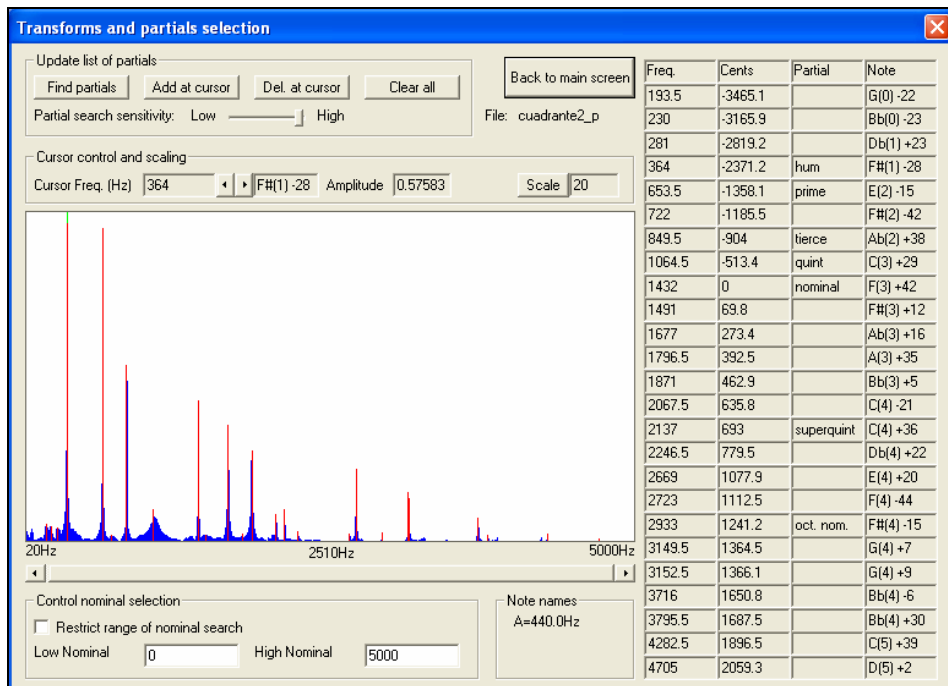
(d)

Fig. A3.1– POSICIÓN 1: Resultados del programa WAVANAL de la excitación con martillo. (a) 1º cuadrante (b) 2º cuadrante, (c) 3º cuadrante y (d) 4º cuadrante.

POSICIÓN 2



(a)



(b)

ANEXO III – RESULTADOS DEL WAVANAL POR GOLPE DE MARTILLO

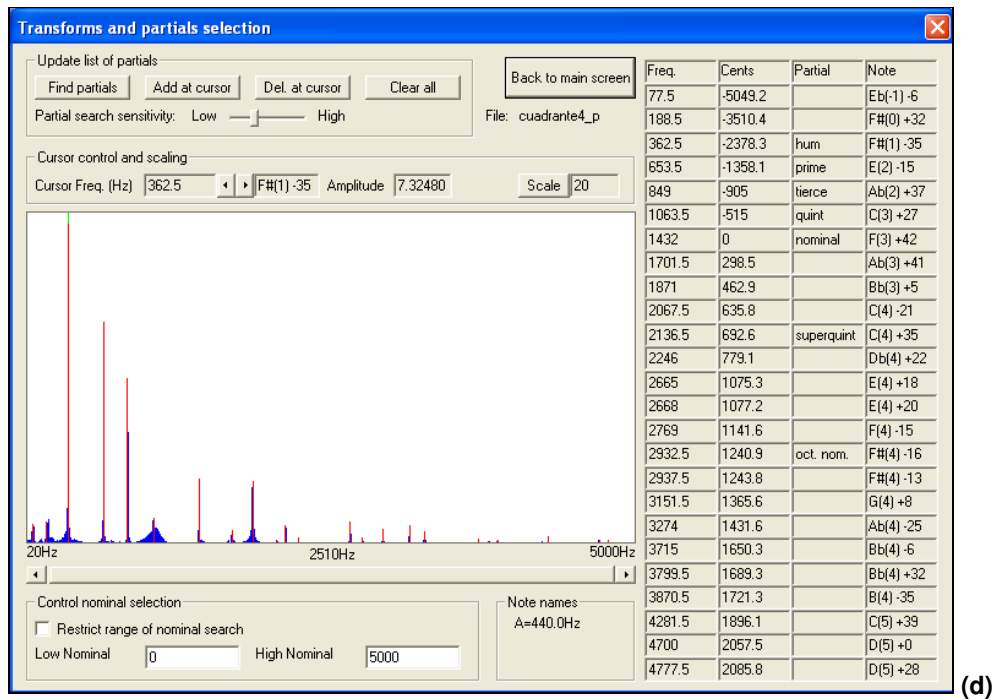
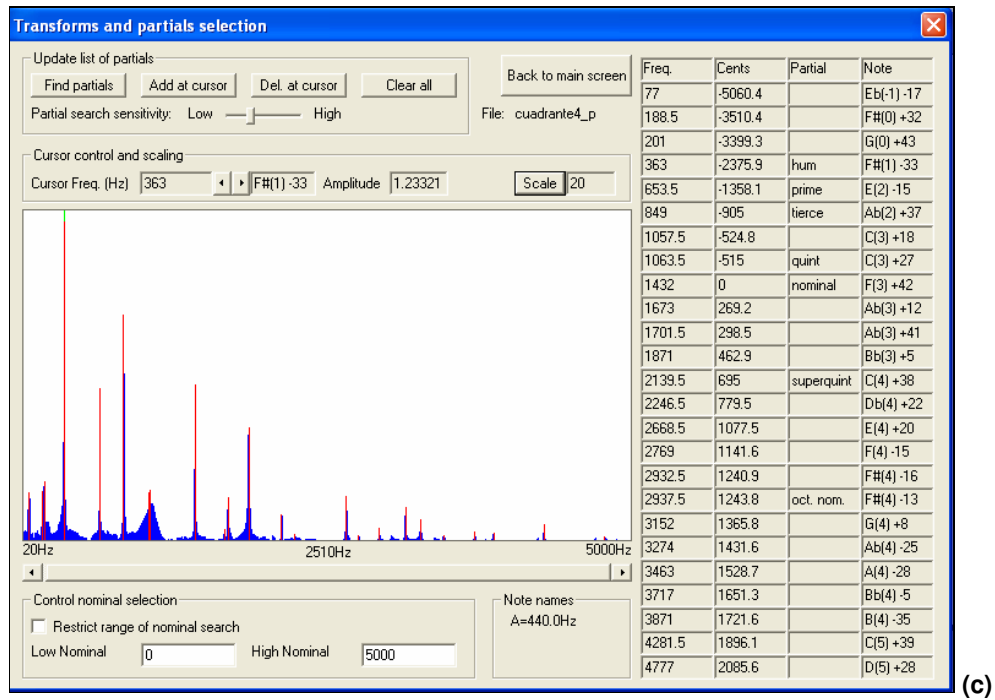
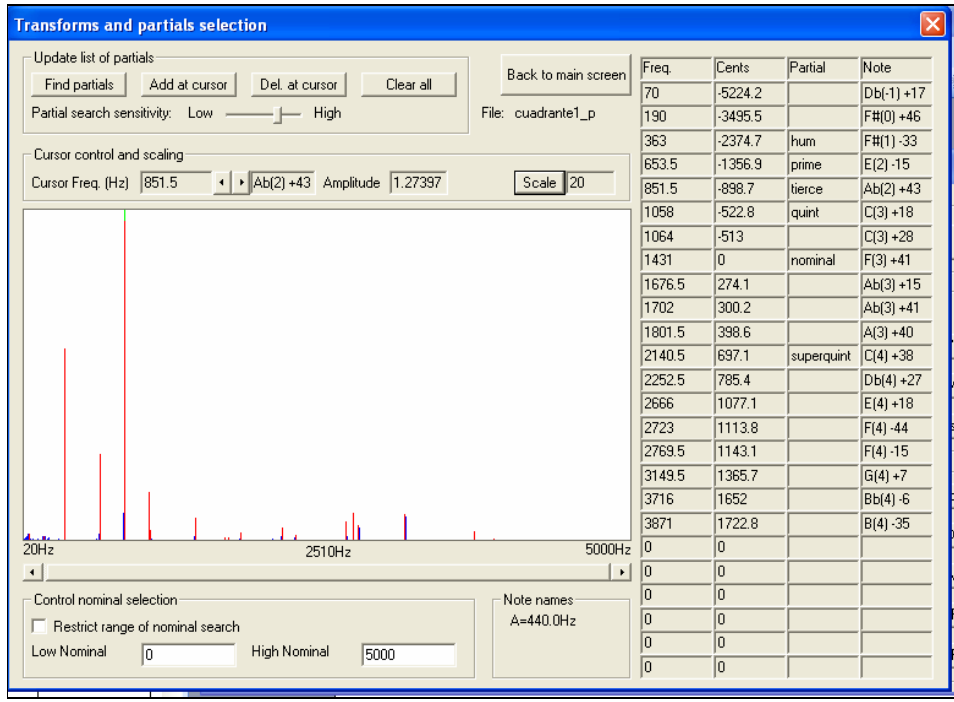
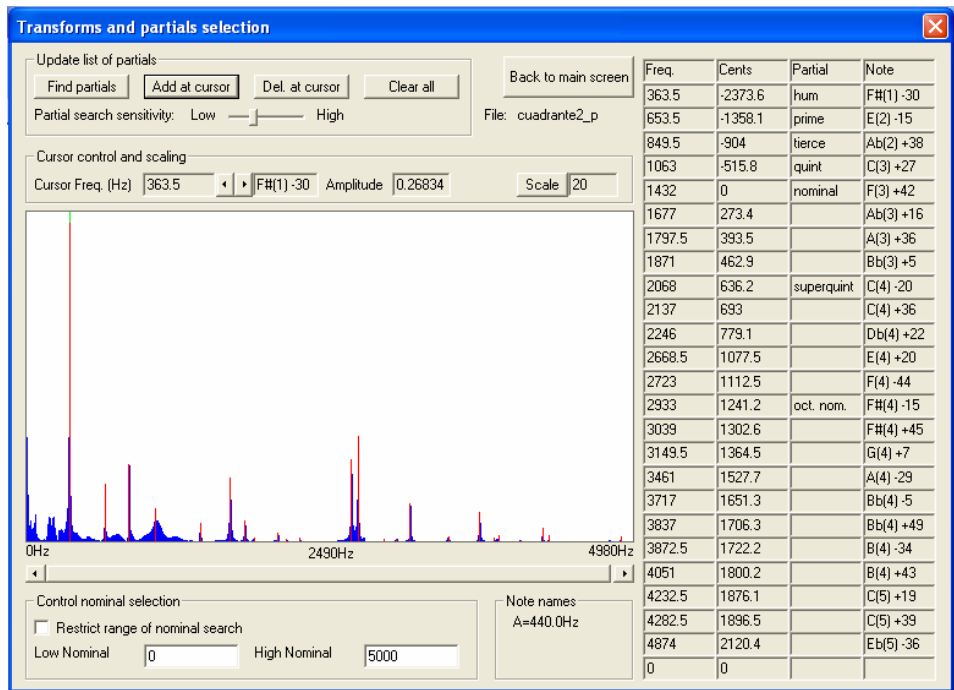


Fig. A3.2– POSICIÓN 2: Resultados del programa WAVANAL de la excitación con martillo. (a) 1º cuadrante (b) 2º cuadrante, (c) 3º cuadrante y (d) 4º cuadrante.

POSICIÓN 3

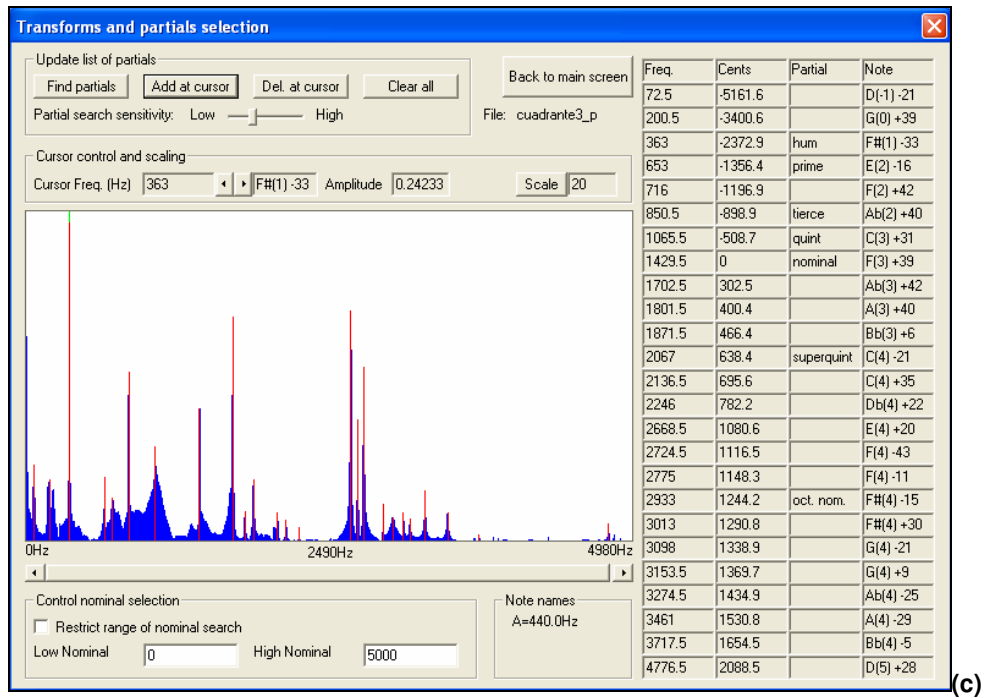


(a)

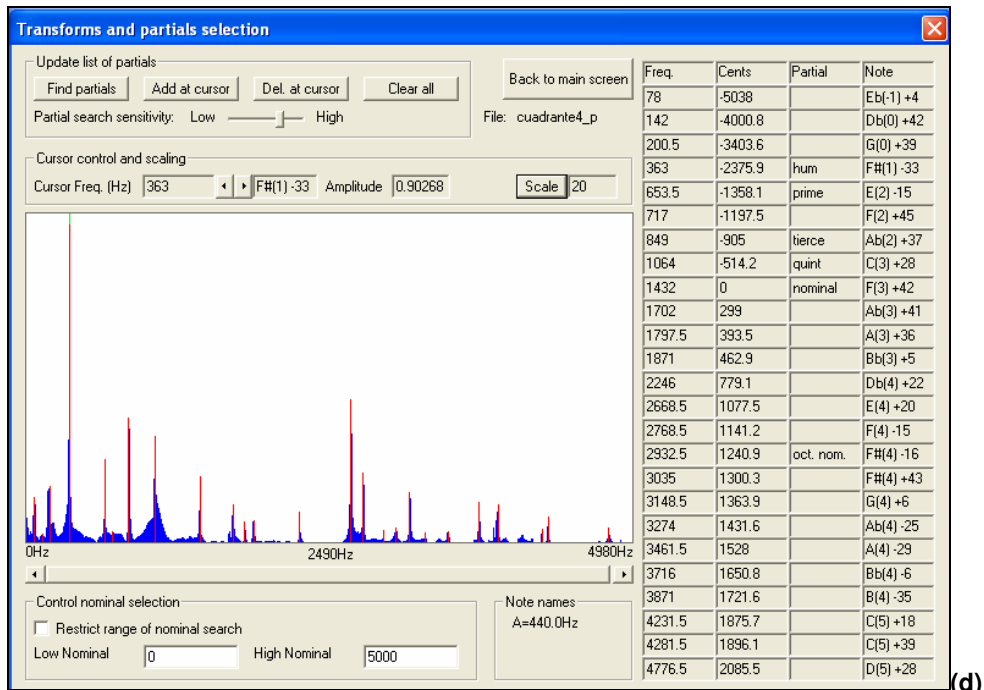


(b)

ANEXO III – RESULTADOS DEL WAVANAL POR GOLPE DE MARTILLO



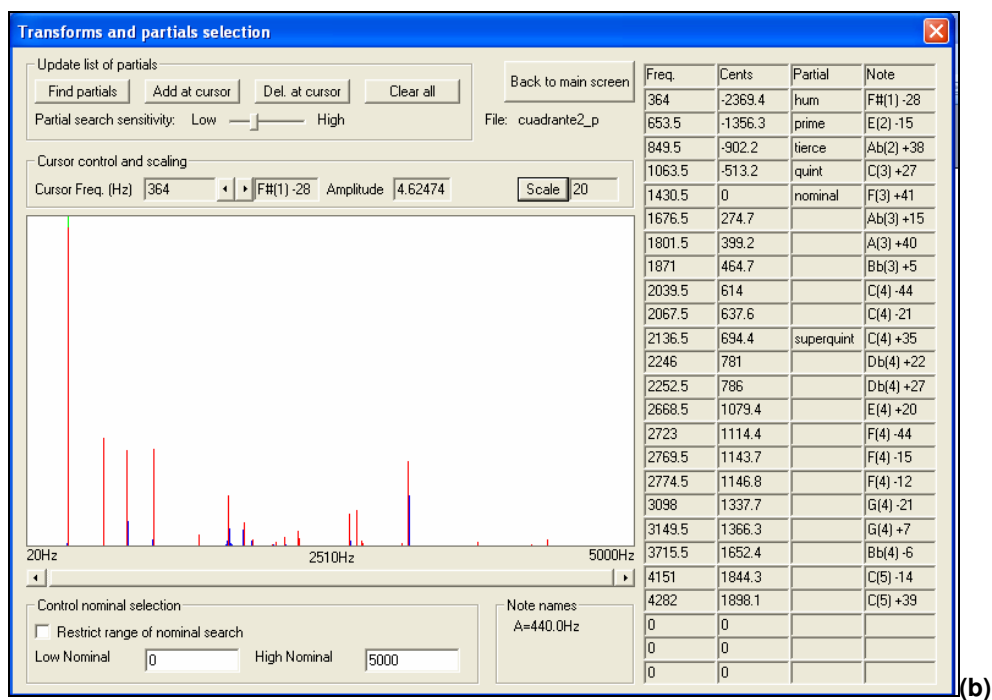
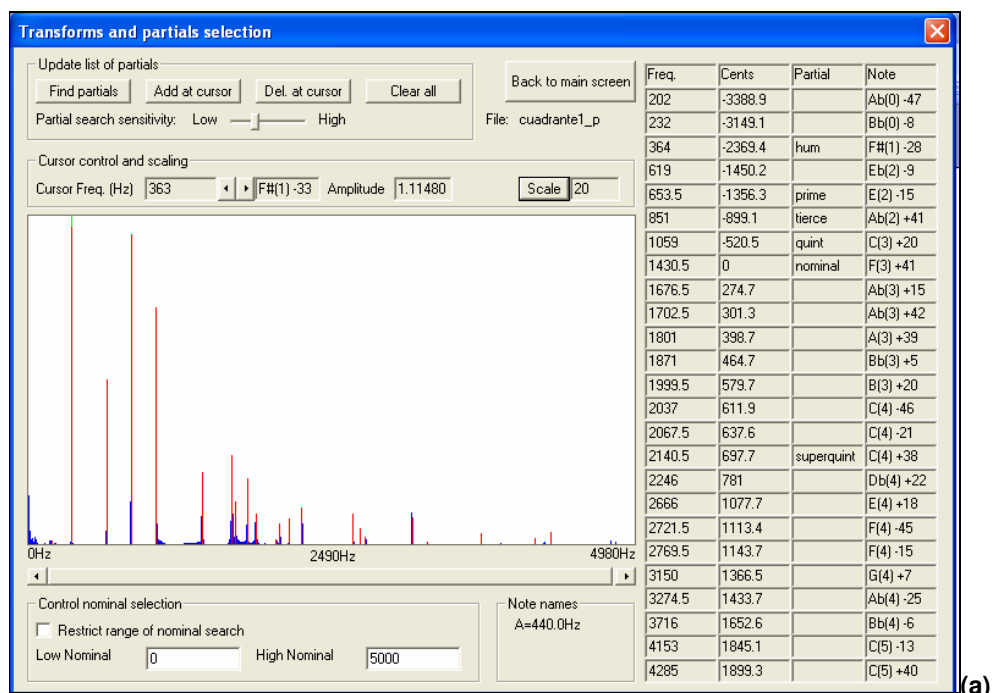
(c)



(d)

Fig. A3.3– POSICIÓN 3: Resultados del programa WAVANAL de la excitación con martillo. (a) 1º cuadrante (b) 2º cuadrante, (c) 3º cuadrante y (d) 4º cuadrante.

POSICIÓN 4



ANEXO III – RESULTADOS DEL WAVANAL POR GOLPE DE MARTILLO

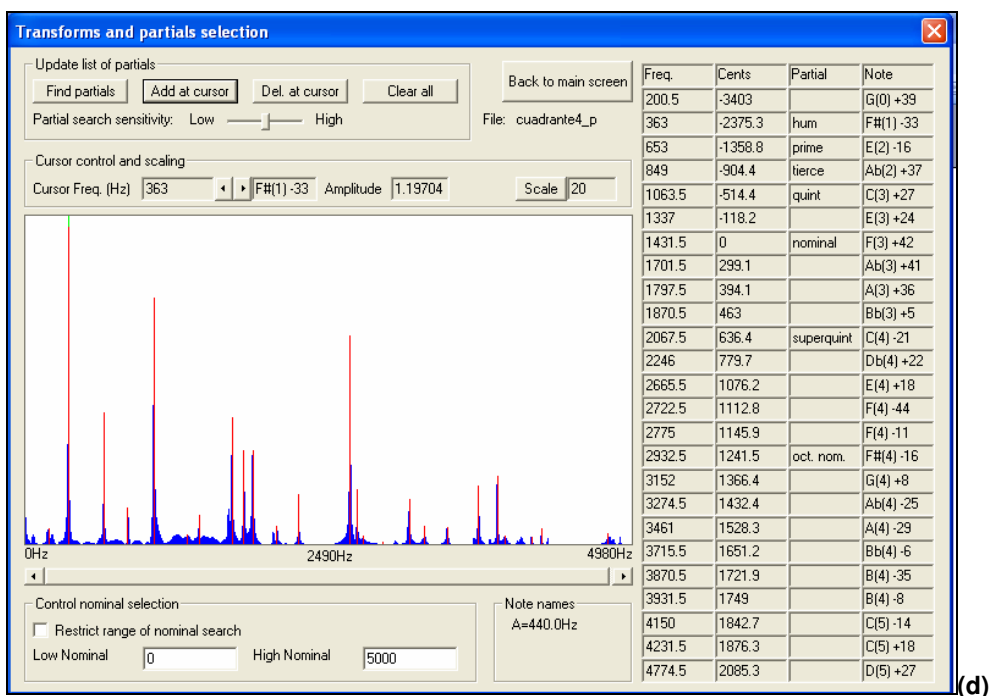
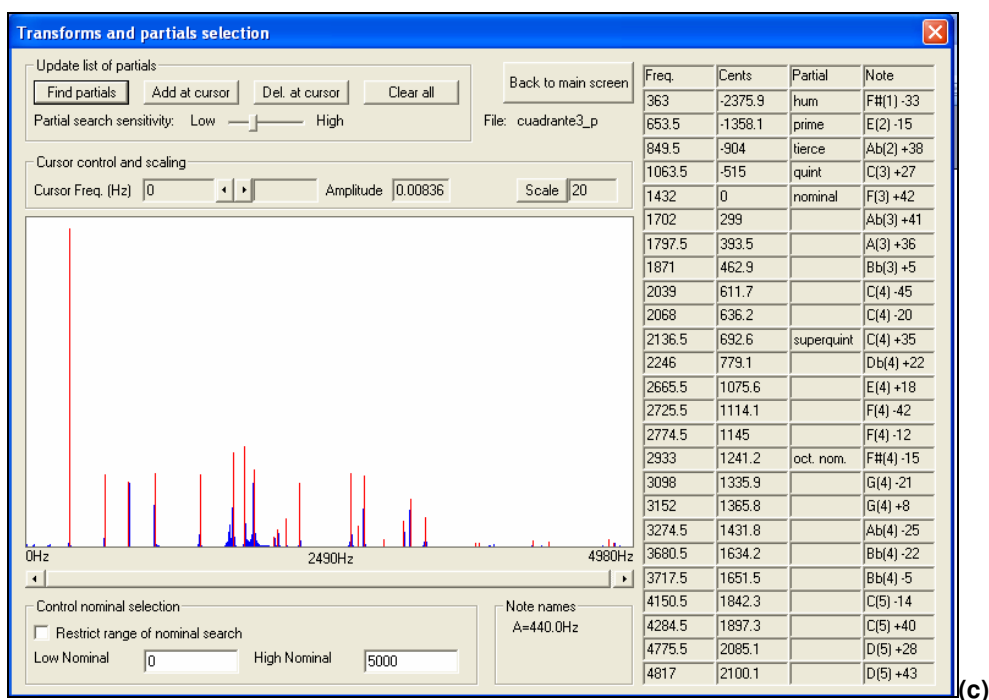
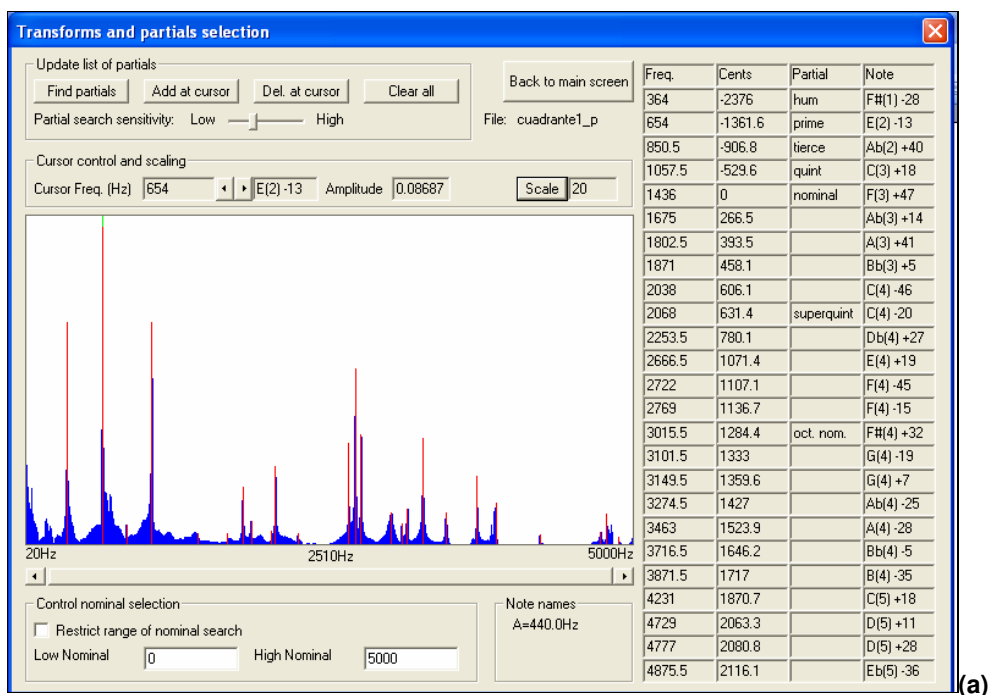
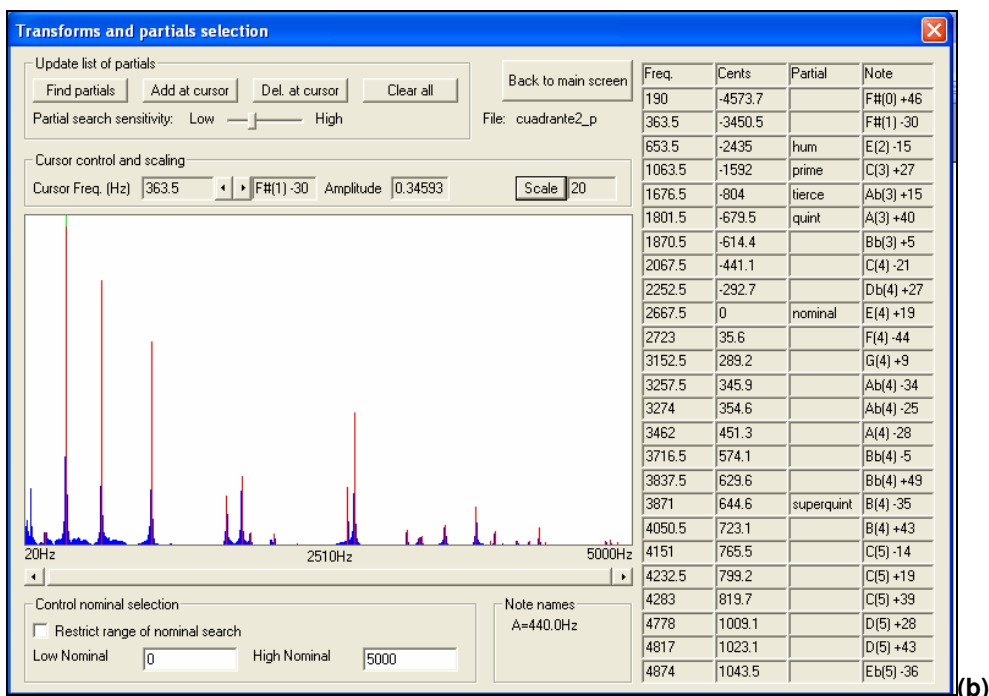


Fig. A3.4– POSICIÓN 4: Resultados del programa WAVANAL de la excitación con martillo. (a) 1º cuadrante (b) 2º cuadrante, (c) 3º cuadrante y (d) 4º cuadrante.

POSICIÓN 5



(a)



(b)

ANEXO III – RESULTADOS DEL WAVANAL POR GOLPE DE MARTILLO

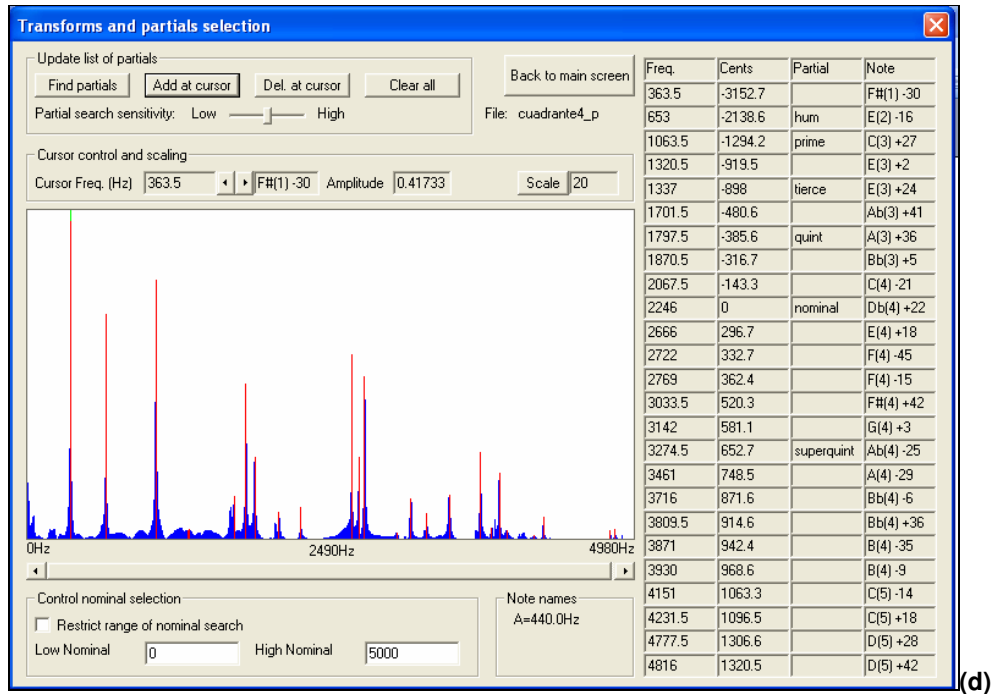
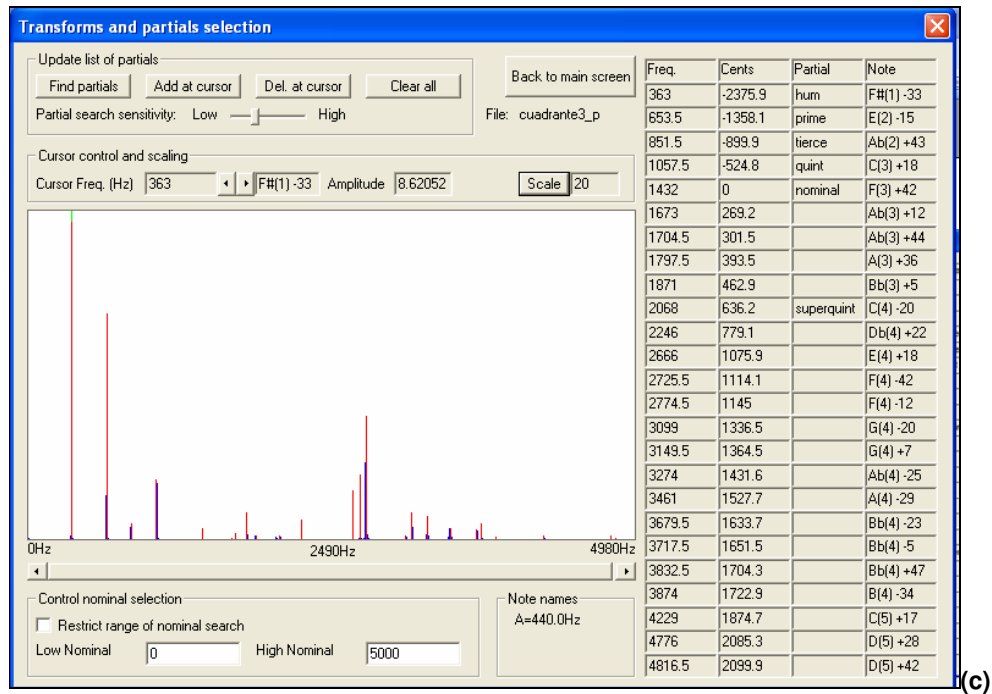
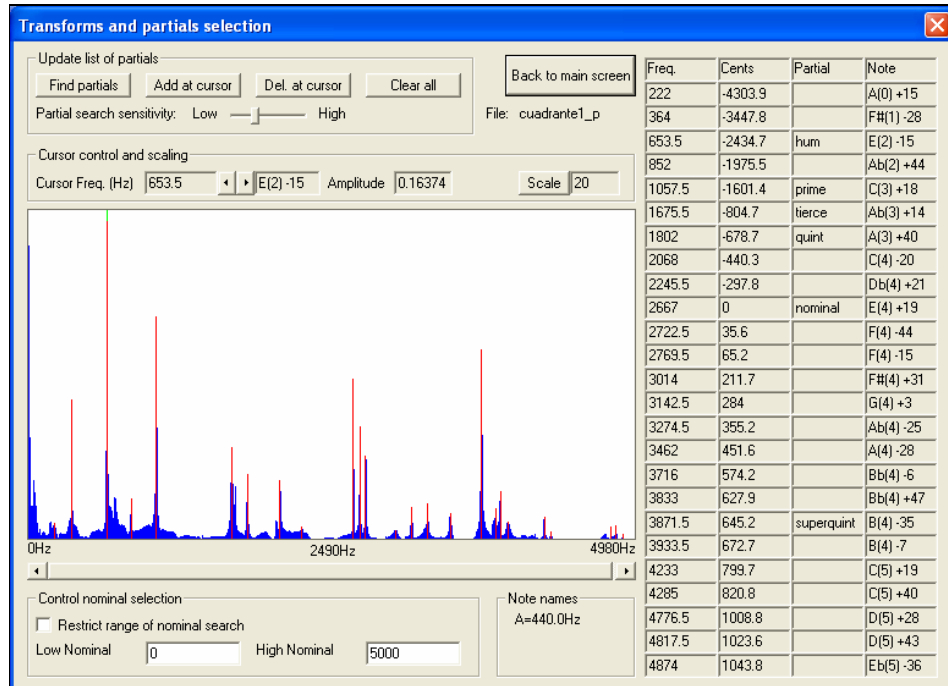
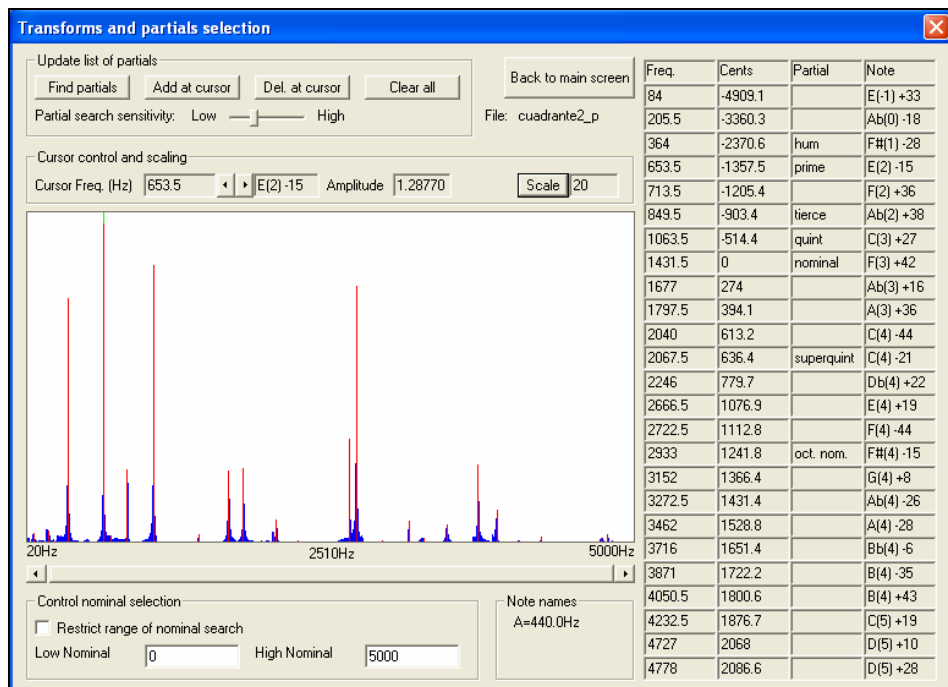


Fig. A3.5– POSICIÓN 5: Resultados del programa WAVANAL de la excitación con martillo. (a) 1º cuadrante (b) 2º cuadrante, (c) 3º cuadrante y (d) 4º cuadrante

POSICIÓN 6

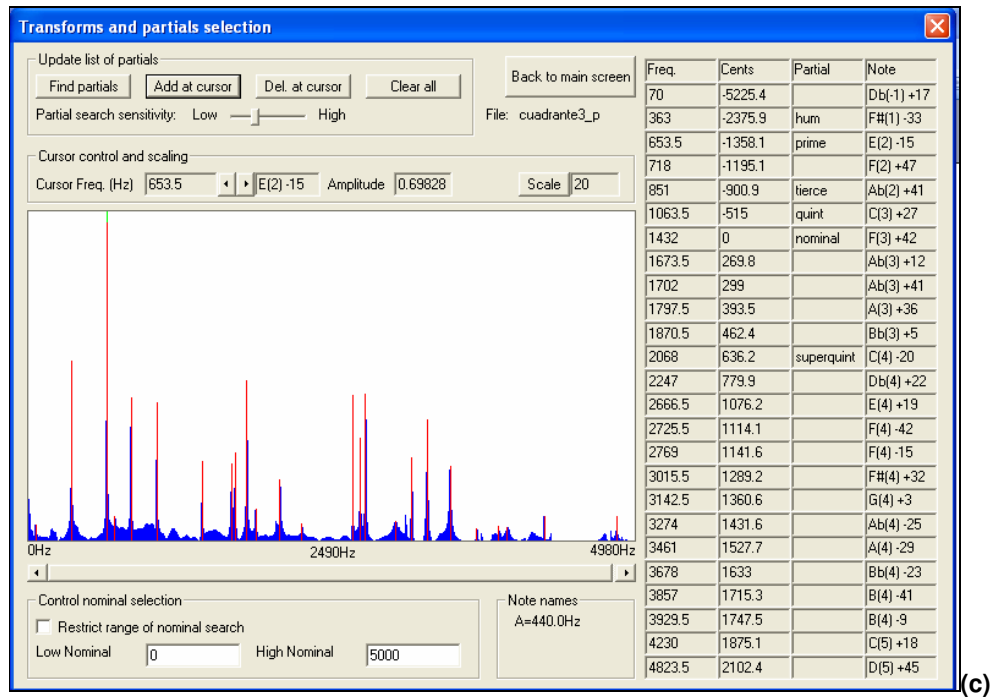


(a)

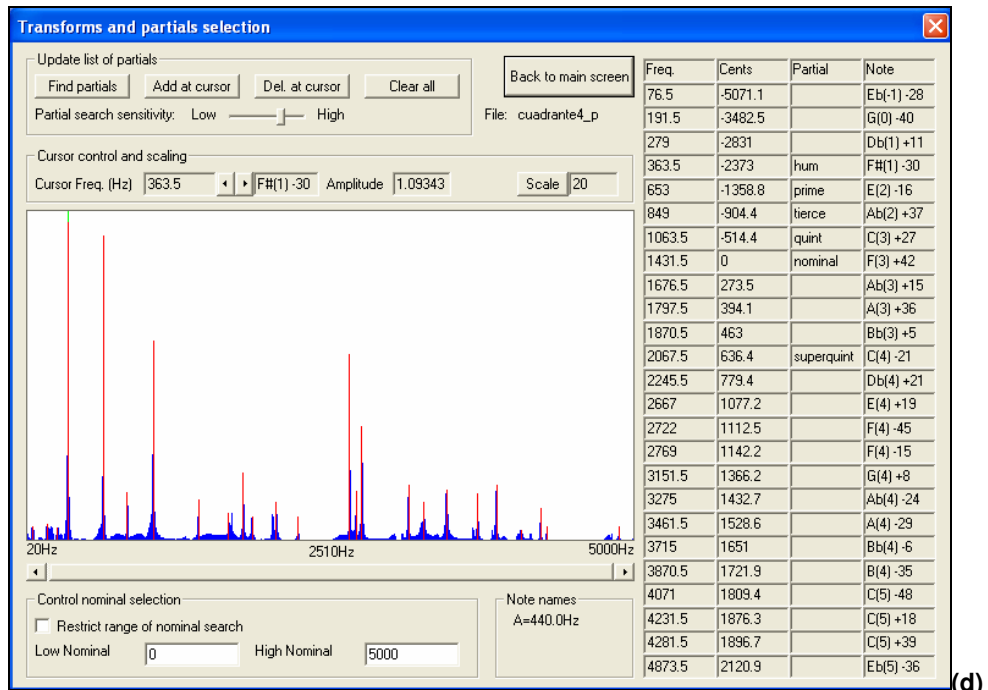


(b)

ANEXO III – RESULTADOS DEL WAVANAL POR GOLPE DE MARTILLO



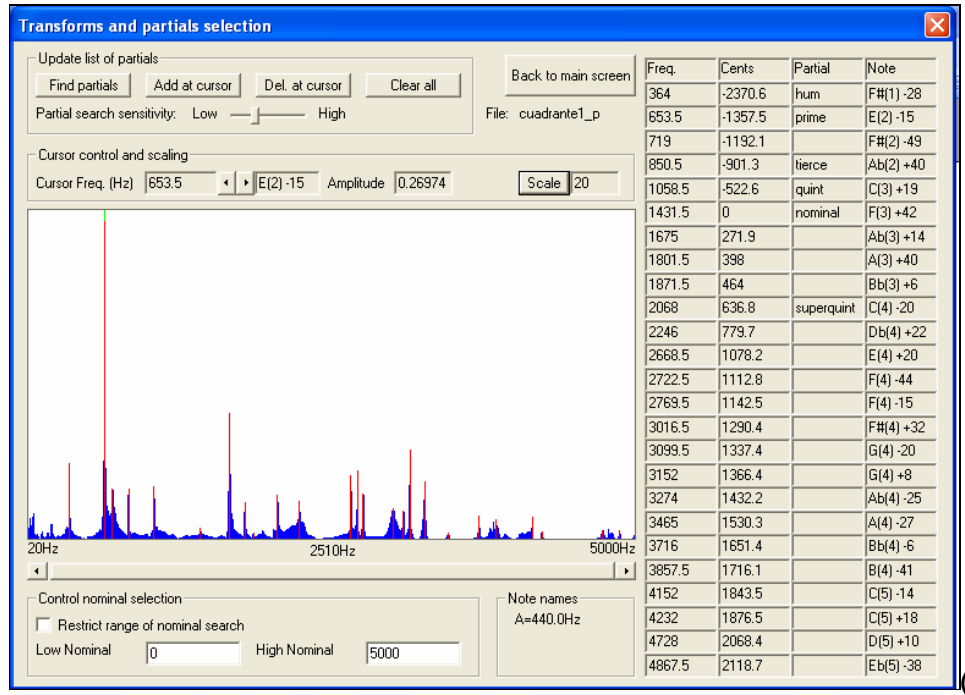
(c)



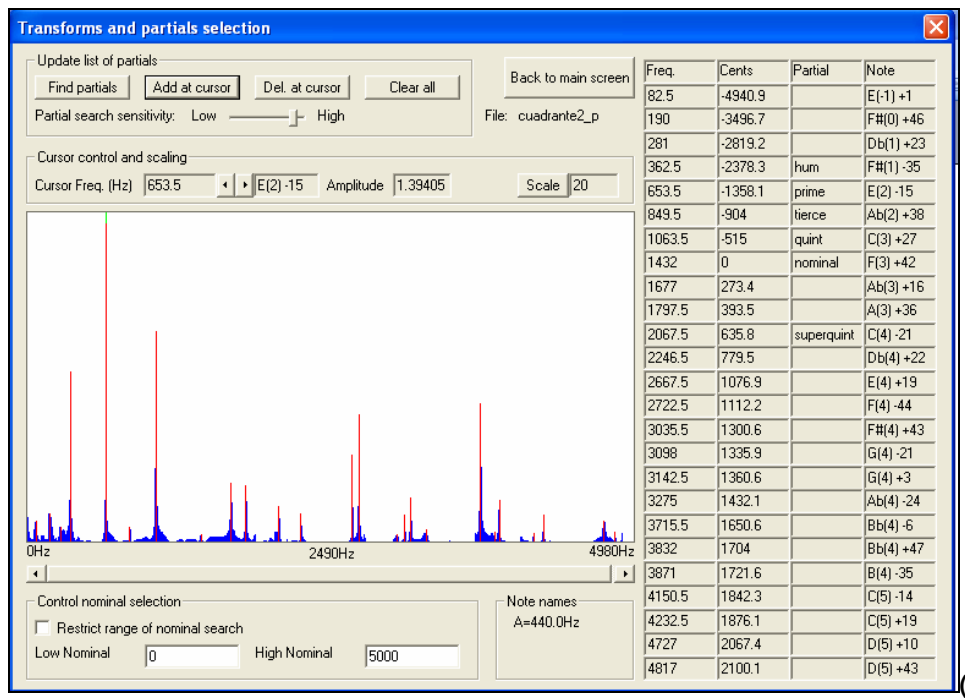
(d)

Fig. A3.6– POSICIÓN 6: Resultados del programa WAVANAL de la excitación con martillo. (a) 1º cuadrante (b) 2º cuadrante, (c) 3º cuadrante y (d) 4º cuadrante

POSICIÓN 7

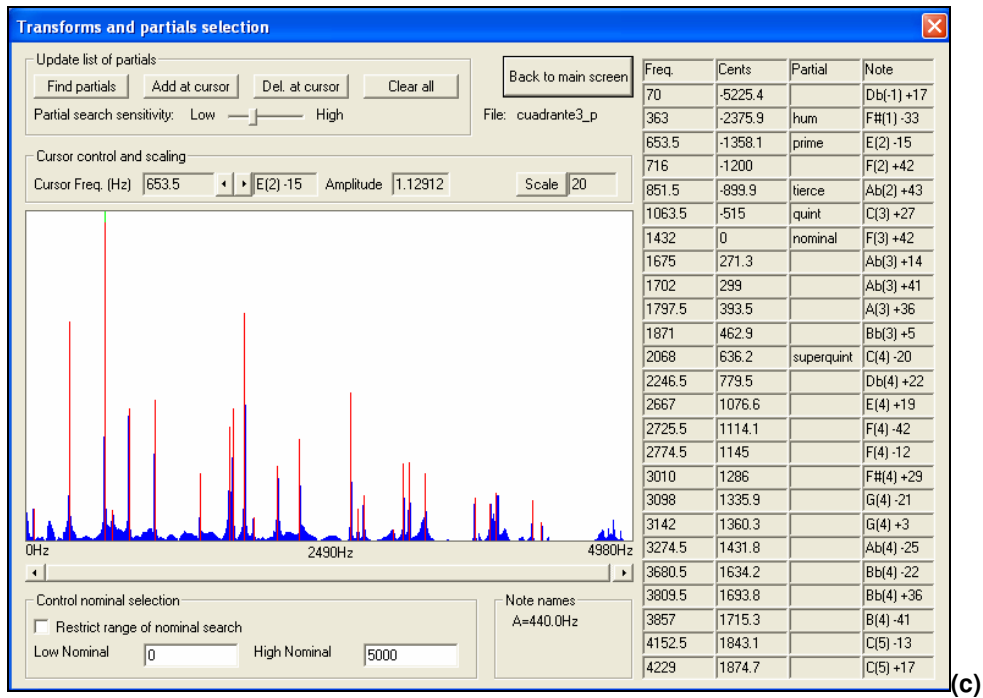


(a)

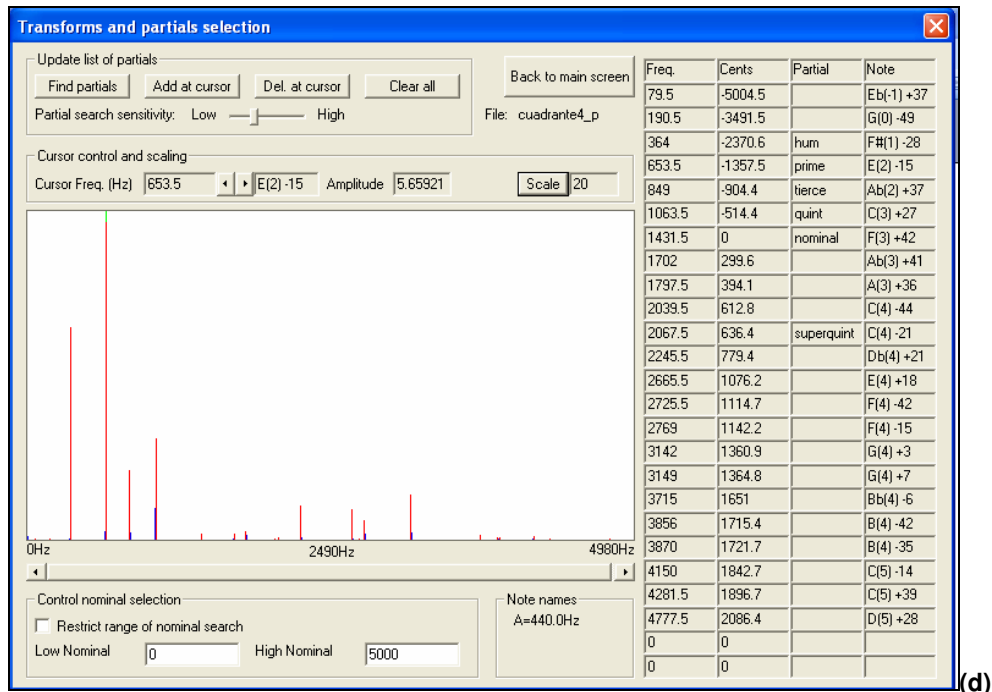


(b)

ANEXO III – RESULTADOS DEL WAVANAL POR GOLPE DE MARTILLO



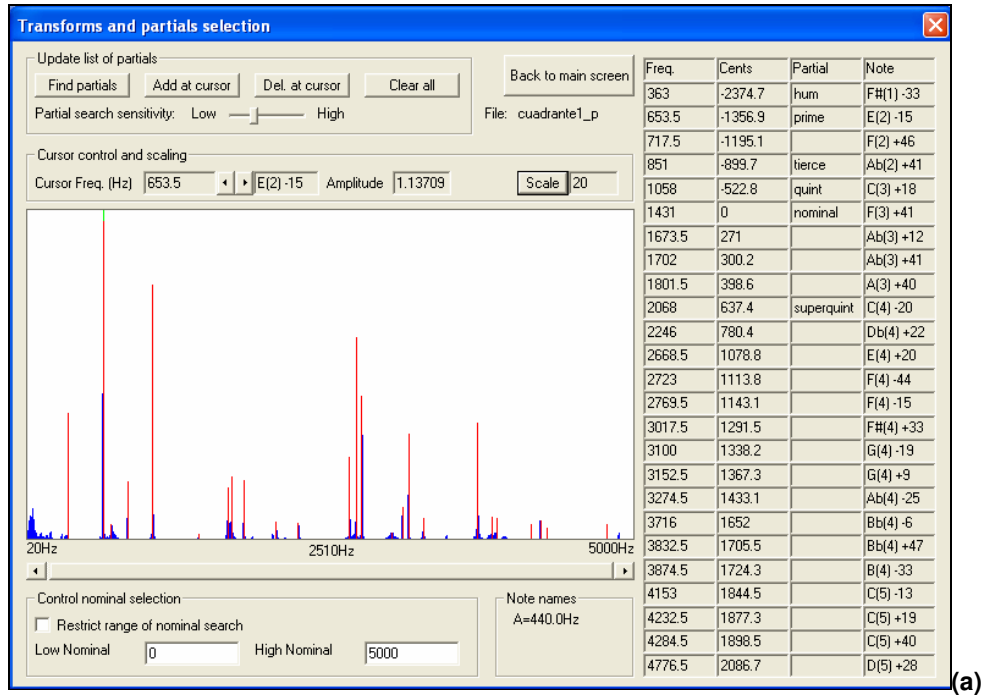
(c)



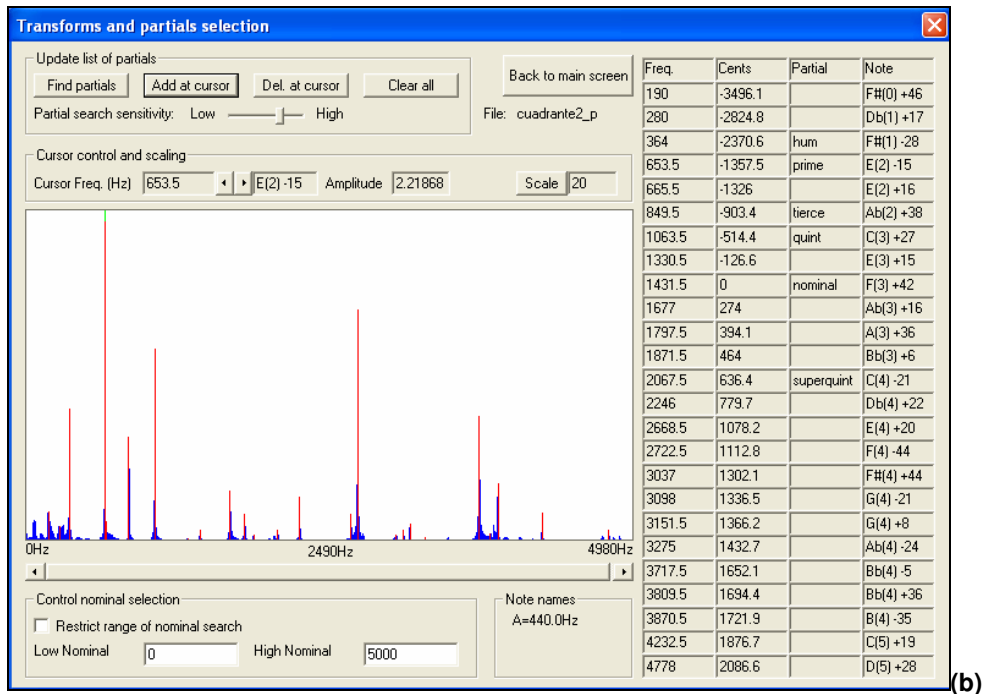
(d)

Fig. A3.7– POSICIÓN 7: Resultados del programa WAVANAL de la excitación con martillo. (a) 1º cuadrante (b) 2º cuadrante, (c) 3º cuadrante y (d) 4º cuadrante

POSICIÓN 8



(a)



(b)

ANEXO III – RESULTADOS DEL WAVANAL POR GOLPE DE MARTILLO

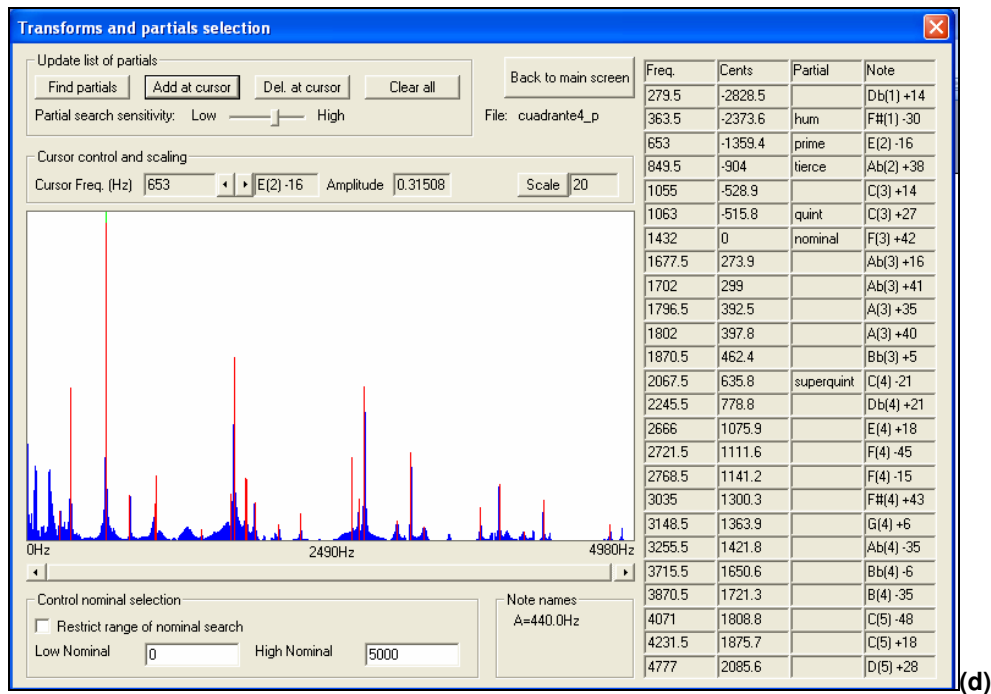
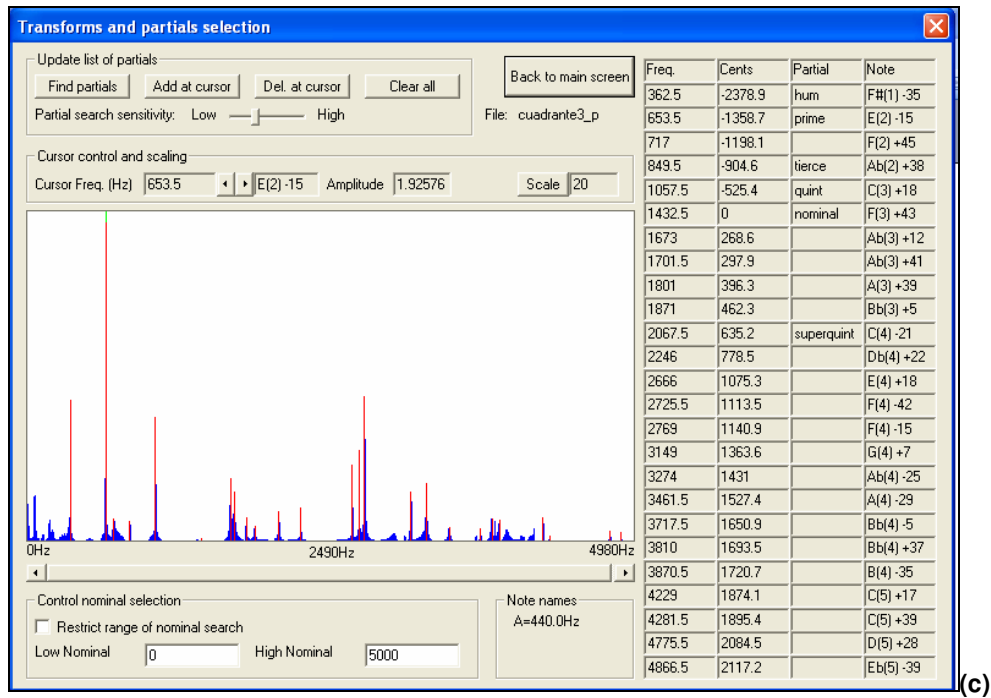
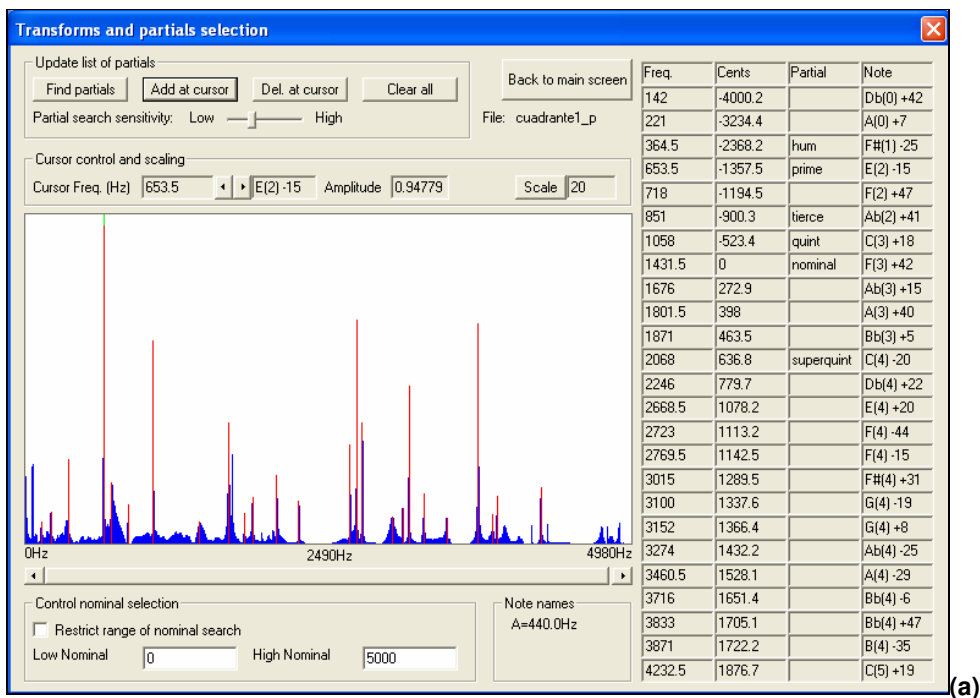
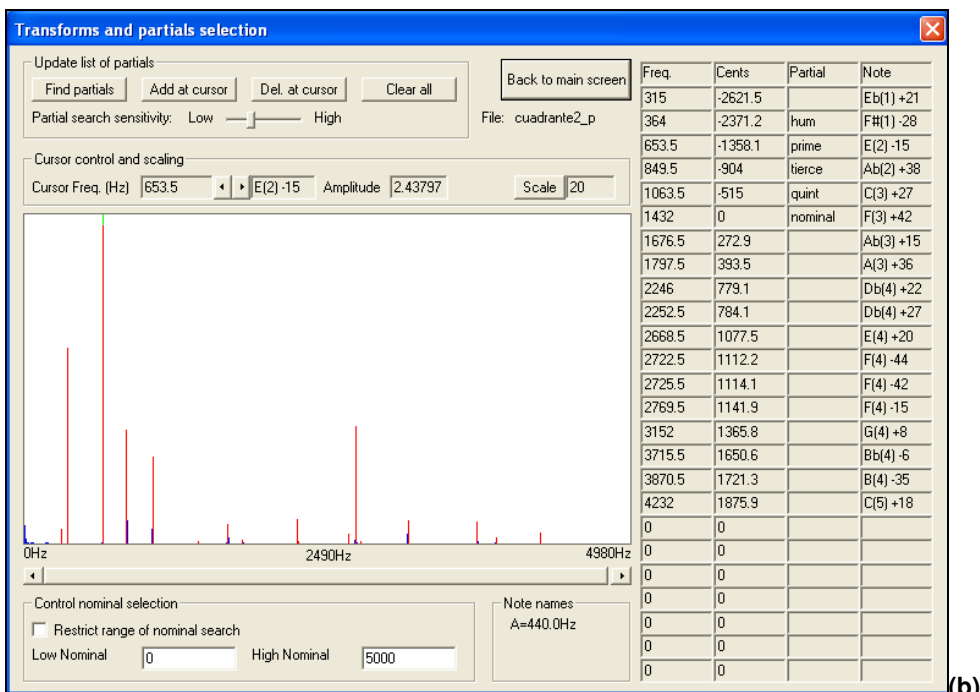


Fig. A3.8– POSICIÓN 8: Resultados del programa WAVANAL de la excitación con martillo. (a) 1º cuadrante (b) 2º cuadrante, (c) 3º cuadrante y (d) 4º cuadrante

POSICIÓN 9



(a)



(b)

ANEXO III – RESULTADOS DEL WAVANAL POR GOLPE DE MARTILLO

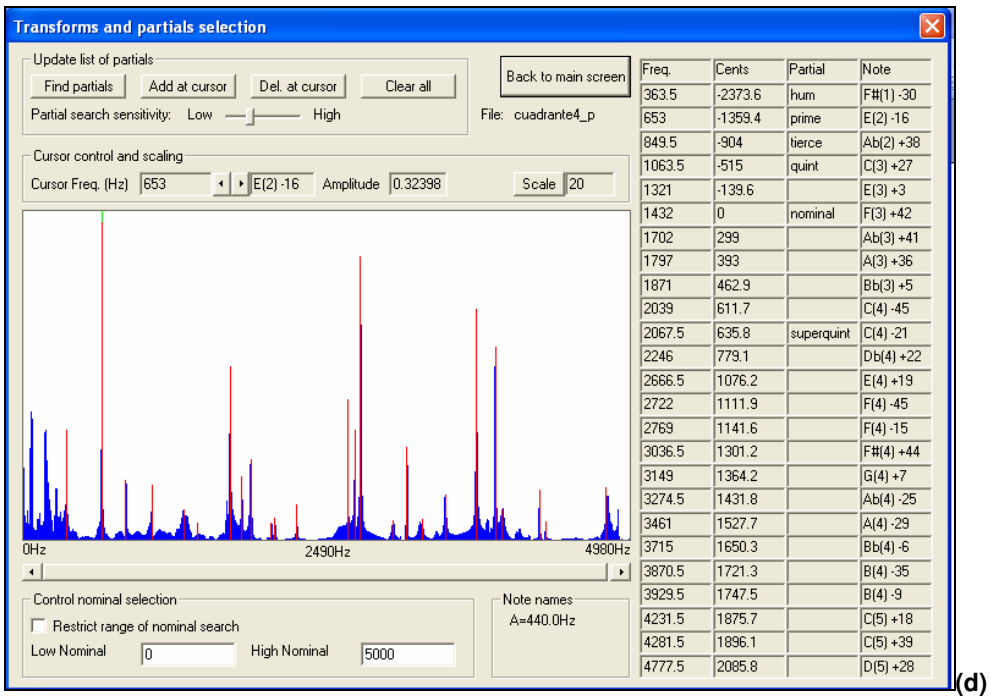
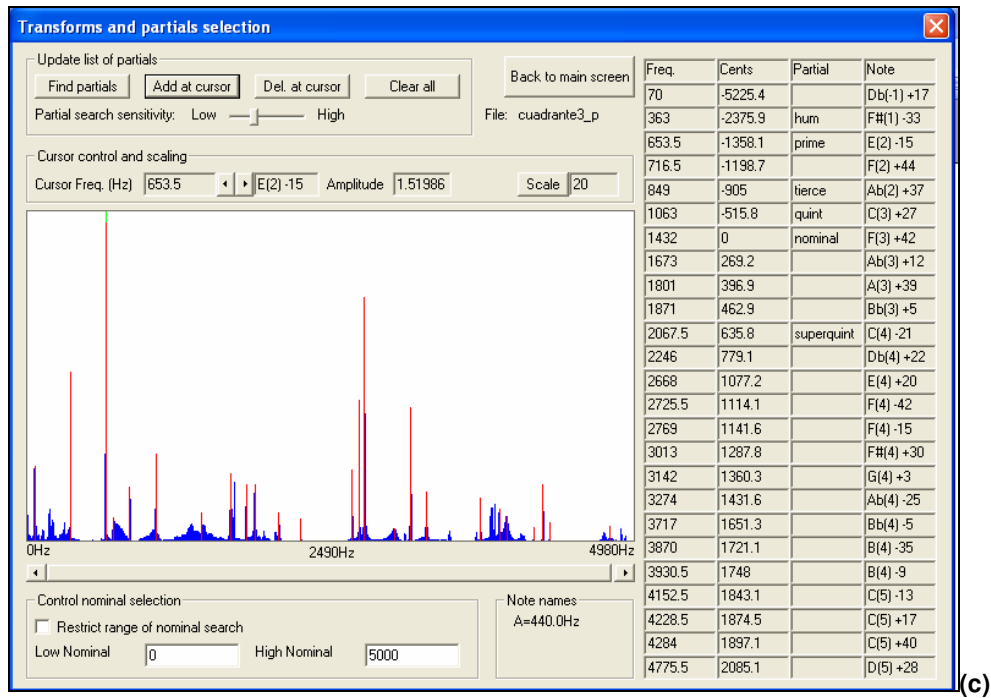
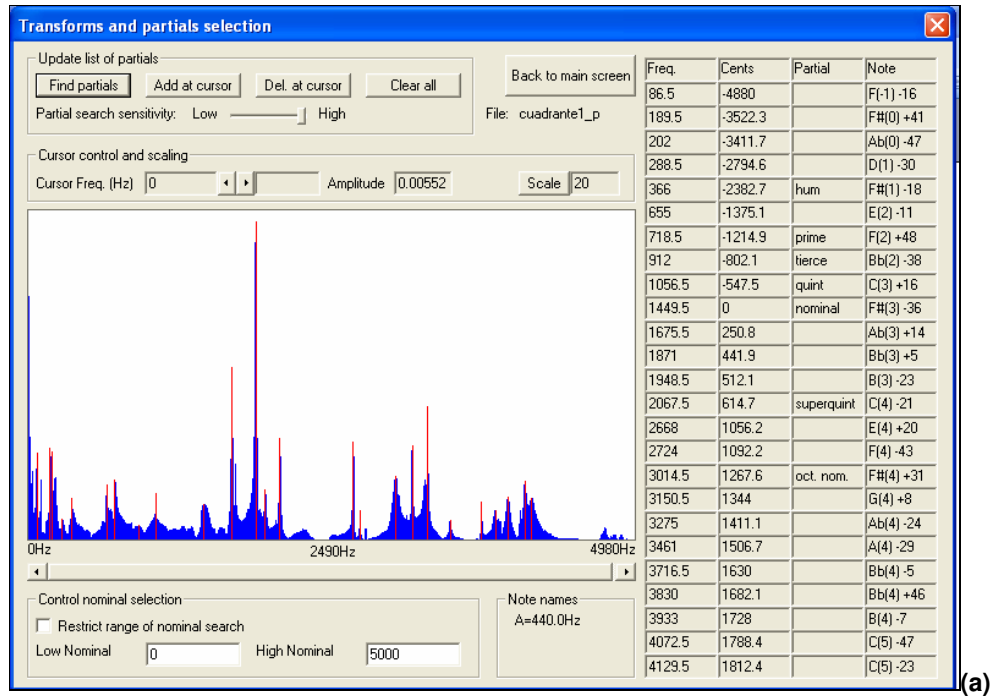
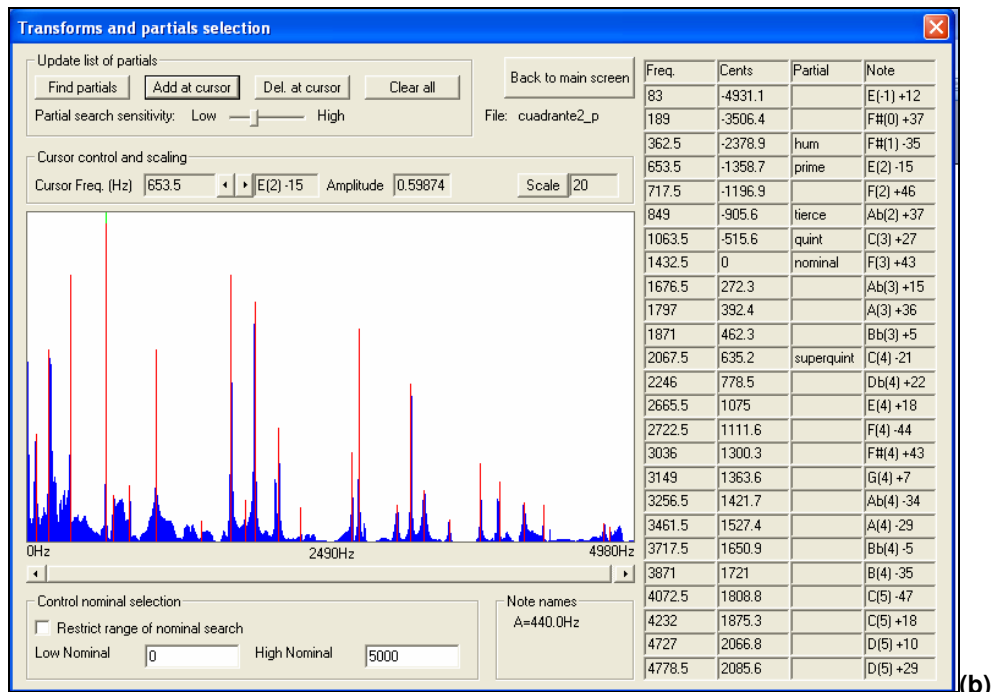


Fig. A3.9– POSICIÓN 9: Resultados del programa WAVANAL de la excitación con martillo. (a) 1º cuadrante (b) 2º cuadrante, (c) 3º cuadrante y (d) 4º cuadrante

POSICIÓN 10

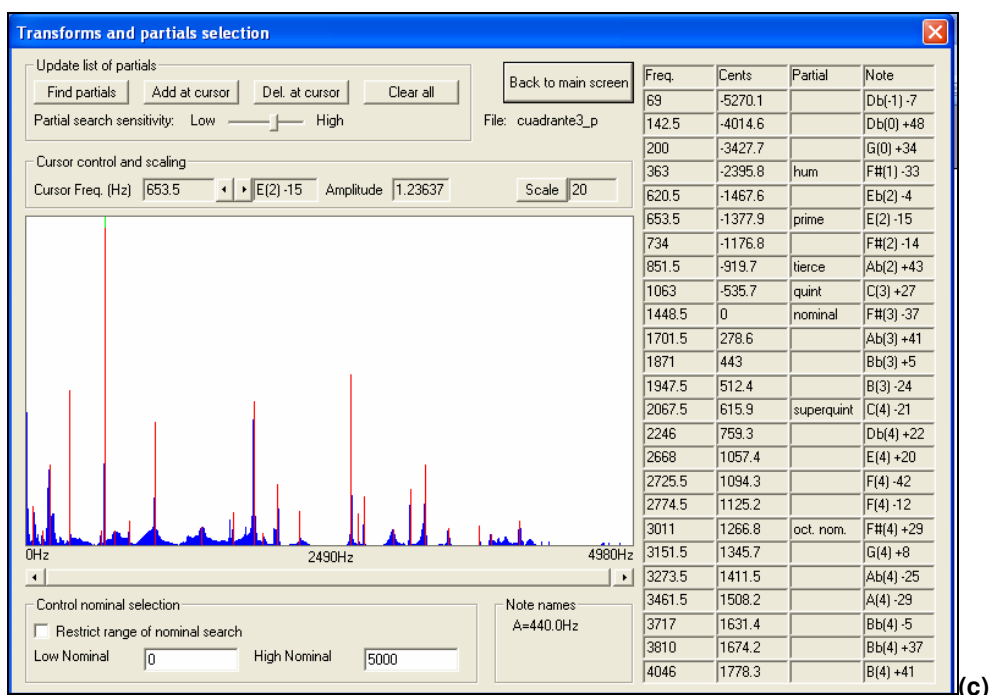


(a)

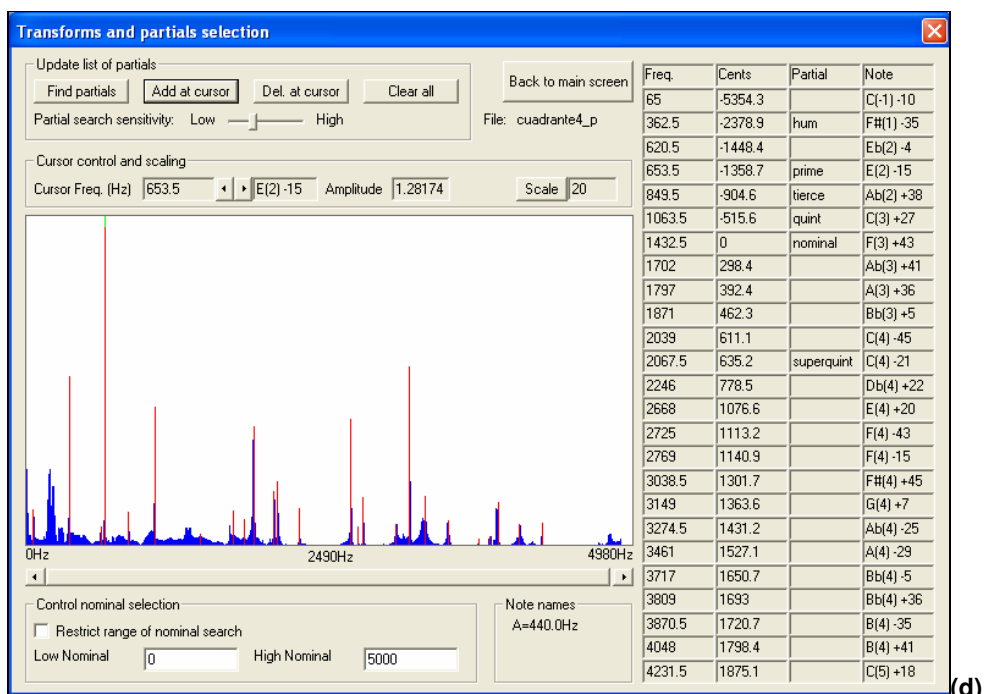


(b)

ANEXO III – RESULTADOS DEL WAVANAL POR GOLPE DE MARTILLO



(c)



(d)

Fig. A3.10– POSICIÓN 10: Resultados del programa WAVANAL de la excitación con martillo. (a) 1º cuadrante (b) 2º cuadrante, (c) 3º cuadrante y (d) 4º cuadrante

BIBLIOGRAFÍA

1. A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer, "*Discrete – Time Signal Processing*". Prentice Hall
2. Benade, Arthur H. "*Fundamentals of musical acoustics*". Dover Publications, New York (1990).
3. Brüel & Kjaer, *Measuring vibration*.
4. Canon A.B. Simpson "On Bell Tones", artículo publicado por The Pall Mall Magazine, Vol. VII, Sep-Dec 1895, pp. 183-194. (Del libro ACOUSTIC OF BELL)
5. Canon A.B. Simpson "*On Bell Tones, II*", artículo publicado por The Pall Mall Magazine, Vol. X, Sep-Dec 1896, pp. 150 - 155. (Del libro ACOUSTIC OF BELL).
6. E. W. Van Heuven. "*Acoustical Measurements on Church Bells and Carillons*", (1949).
7. Enciclopedia Microsoft Encarta 2005.
8. Federico Miyara, "CONTROL DE RUIDO" (1999)
9. Goretta Ngao, "*Ringing the bells*".
10. Grützmacher, M.W. Kallenbach y E. Neyesen, "*Acoustical Investigation on Church Bell*". Traducido por Acoustic 16: 34-45 (1965/66). (Del libro ACOUSTIC OF BELL).
11. J.G. Proakis, D.G. Manolakis, "*Tratamiento digital de señales*". Prentice Hall.
12. J.ORS. "*Ultrasonidos: Ensayos no destructivos de materiales metálicos*". Universidad Politécnica de Madrid
13. Jones, A.T. "*The vibration of bells*". Phys. Rev.31: 1092-1102 (1928)
14. Jones, A.T. "*The Strike Note of Bells*". Acoust. Soc. Am/ 1:373-381 (1930)
15. Lehr A. "*Partial groups in the bell sound*". Journal of the Acoustical Society of America 1986;79:2000–11.
16. R. Perrin, T Charnley. "*Group Theory and The Bell, Journal of Sound and Vibration*" (1973).
17. Thomas D. Rossing, "*Acoustics of bells*". Northern Illinois University.

18. Zölzer Udo, "*Digital audio signal processing*". Jonh Willey & Sons, Chichester (1999)

Páginas Web

- <http://www.hibberts.co.uk>
- <http://www.btinternet.com>
- <http://www.arrakis.es/~ppriego/fourier/fourier.htm>
- <http://home.comcast.net/~t129wojce647/music/scales/4.html>
- <http://www.campaners.com>
- <http://www.keltek.org>
- <http://www.russianbells.com>
- <http://www.msu.edu/~carillon/batmbook/chapter4.htm>
- www.norsonic.ch/dateien/prospekte/hw/symphonie_e.pdf,
- www.01db.com
- <http://www.sonymediasoftware.com/products/soundforgefamily.asp>