

**ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SONIDOS CARDIACOS DE UNA
BALLENA JOROBADA ADULTA EN SU ENTORNO NATURAL**

Autores:

**MARIBEL ANAYA VEJAR
NANCY ELIZABETH RUBIANO AREVALO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
MARZO DE 2005**

**ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SONIDOS CARDIACOS DE UNA
BALLENA JOROBADA ADULTA EN SU ENTORNO NATURAL**

Autores:

**MARIBEL ANAYA VEJAR
NANCY ELIZABETH RUBIANO AREVALO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIEROS
ELECTRÓNICOS**

Director:

PhD. ARTURO PLATA UIS

Codirector:

Dr. JORGE REYNOLDS POMBO SCVS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
MARZO DE 2005**

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	4
JUSTIFICACIÓN	5
1.GENERALIDADES DE ELECTROCARDIOGRAFÍA Y FONOCARDIOGRAFÍA	6
1.1 ELECTROFISIOLOGIA CARDIACA	7
1.1.1 Células no marcapasos	8
1.1.2 Células Marcapasos	10
1.2 PROPAGACION DE LA EXCITACIÓN CARDIACA	11
1.3 NOMENCLATURA DEL ELECTROCARDIOGRAMA	13
1.3.1 Onda P – Onda T auricular (Ta)	13
1.3.2 Intervalo PR	14
1.3.3 Complejo QRS	15
1.3.4 Onda Q	16
1.3.5 Punto J	16
1.3.6 Segmento ST	16
1.3.7 Onda T	17
1.3.8 Intervalo QT	17
1.3.9 Onda U	17
1.4 DERIVACIONES	18
2. FONOCARDIOGRAFÍA HUMANA	21
2.1 EL CORAZÓN CONSIDERADO COMO UNA BOMBA	21
2.2 EL CICLO CARDIACO	23
2.3 RUIDOS CARDIACOS NORMALES	30
2.3.1 Primer Sonido Cardiac	31
2.3.2 Segundo Sonido Cardiac	32
2.3.3 Tercer Sonido Cardiac	33
2.3.4 Cuarto Sonido Cardiac	33
3. SEÑALES Y ESPACIOS FUNCIONALES	34
3.1 SEÑALES CONTINUAS Y SEÑALES DISCRETAS	34

3.2	ESPACIO FUNCIONALES	35
3.2.1	Transformada de Fourier	36
3.2.2	Transformada de Fourier de Tiempo Corto	39
3.2.3	Transformada Wavelet	42
3.3.	ANÁLISIS MULTIRESOLUCIÓN Y ALGORITMO DWT RÁPIDO	52
3.4.	WAVELET DAUBECHIES dbN	56
4.	FILTRADO DE LOS CANTOS DE LA BALLENA	62
4.1	INFORMACIÓN GENERAL DE LOS CANTOS	62
4.2	APLICACIÓN DE LA WT EN EL PROCESO DE FILTRADO	69
4.2.1	Descomposición Multinivel	70
4.2.2	Umbralización	73
4.2.3	Reconstrucción	74
5.	OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS POSIBLES SONIDOS	77
	CARDIACOS DE LA BALLENA JOROBADA	
5.1	ENVOLVENTE DE ENERGÍA TEMPORAL	80
5.2	CARACTERIZACIÓN DE LOS SONIDOS A Y B	84
5.2.1	Caracterización en Tiempo	84
5.2.2	Caracterización en Frecuencia	85
5.3	CLASIFICACIÓN DE LOS POSIBLES SONIDOS CARDIACOS DE	86
	LA BALLENA	
6.	CONCLUSIONES OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	92
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
	ANEXOS	104

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. LAS BALLENAS	104
A.1 EVOLUCIÓN	105
A.2 FISILOGIA	106
ANEXO B. LA EXPEDICION AL CORAZON DE LA YUBARTA	113
B.1 LOS SUBMARINOS	113
B.2 LA BOYA “ EL OIDO DEL MAR”	115
B.3 CRUCEROS AL CORAZON DE LAS BALLENAS	116
ANEXO C. FONOCARDIOGRAFIA EN BALLENAS	121
C.1 ESTADO DEL ARTE	121
C.1.1 Realización de grabaciones	122
C.1.2 Evaluación de las grabaciones	123
C.1.3 Análisis de la Información	123
C.1.4 Análisis de Fourier	124
C.1.5 Análisis Tridimensional	124
C.1.6. Alcance de los resultados	124
ANEXO D. EL SONAR	130
D.1 TIPOS DE SONAR	130
D.2 FUNCIONAMIENTO	131
D.2.1 EL SONAR PASIVO	131
D.2.2 EL SONAR ACTIVO	132
D.3 EL ANALISIS DE LOS ECOS	133
D.4 ANALISIS DE BANDA ANCHA	134

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Sistema específico de conducción del corazón	6
Figura 2. Diagrama correspondencia de la activación del corazón y el ECG	7
Figura 3. Potencial de Acción	9
Figura 4. Relación entre PA y ECG. El potencial de acción cardiaco (a) Superficie del electrocardiograma (b) Potencial de acción mostrando la despolarización y la repolarización y los sitios e acción de los canales iónicos (c) Dirección de las corrientes iónicas durante la activación de los canales (3)	12
Figura 5. Trazado electrocardiográfico normal ondas, intervalos y segmentos que representan la actividad eléctrica del corazón.	13
Figura 6. Derivaciones en un ECG normal	19
Figura 7. Fonocardiograma Normal Humano	21
Figura 8. Anatomía Cardíaca General	22
Figura 9. Acontecimientos que se producen en la sístole	24
Figura 10. Acontecimientos que se producen en la contracción isovolumétrica	26
Figura 11. Acontecimientos que se producen en la Eyección Rápida	27
Figura 12. Acontecimientos que se producen en la Eyección Reducida	28
Figura 13. Acontecimientos que se producen en la Relajación Isovolumétrica	29
Figura 14. Acontecimientos que se producen en el Llenado Ventricular Rápido	30
Figura 15. Sonidos Cardíacos Normales	31
Figura 16. Señal Estacionaria	37
Figura 17. FT de la señal estacionaria de la figura 16	37
Figura 18. Señal Chirp, no estacionaria	38
Figura 19. STFT de una señal no estacionaria, señal Chirp	39
Figura 20. Short Time Fourier Transform	39
Figura 21. Calculo de STFT para valores de ventana de: a) 256, b) 64	40

Figura 22. Algunas wavelets madre de las más usadas en la práctica	43
Figura 23. Operaciones básicas de escalado y traslación	45
Figura 24. Funcionamiento de la CWT	47
Figura 25. Señal electrocardiográfica cuya CWT se desea calcular	48
Figura 26. Representación tridimensional del valor de los coeficientes calculados aplicando la CWT a la señal de la figura 25.	48
Figura 27. Filtrado o descomposición de una señal	51
Figura 28. Esquema con una señal real, aplicando el downsampling	51
Figura 29. Algoritmo piramidal.	54
Figura 30. Descomposición Wavelet usando la notación de operadores	55
Figura 31. Daubechies Wavelet db4	60
Figura 32. Daubechies Wavelets db8	61
Figura 33. Latido de la pista	65
Figura 34. Espectro del Latido de la pista 1	65
Figura 35. Espectrograma Latido Pista 1	66
Figura 36. Espectrograma del Latido Filtrado	67
Figura 37. Espectrograma de la Pista 2	67
Figura 38. Espectrograma Pista2 Filtrada	68
Figura 39. Wavelet db12	70
Figura 40. Wavelet db12 y su frecuencia centro	72
Figura 41. Hard and Soft Thersholding	73
Figura 42. Pista 2 original y Filtrada	74
Figura 43. Frecuencia centro db6	78
Figura 44. Porción de EDET de la RP2	80
Figura 45. Forma estándar de las envolventes características	81
Figura 46. Porcentajes de sonidos A y B encontrados	82
Figura 47. Forma de onda y EDET de una de las mezclas encontradas	82
Figura 48. Evento cardiaco del cetáceo obtenido de estudios previos	84
Figura 49. Grafica de sonidos A y B pertenecientes a la Ballena	84
Figura 50. Distribución de Frecuencia del Sonido A	85
Figura 51. Distribución de Frecuencia Sonido B	86
Figura 52. Tipo 1 de la señal cardiaca representativa (ECG) de la ballena	87

Jorobada	
Figura 53. Tipo 2 de la señal cardiaca representativa (ECG) de la ballena	88
Jorobada	
Figura 54. Tipo 3 de la señal cardiaca representativa (ECG) de la ballena	88
Jorobada	
Figura 55. Grafico de valores de correlación entre el complejo tipo 1y sonidos B	90
Figura 56. . Grafico de valores de correlación entre el complejo tipo 2 y sonidos A	91
Figura 57. Salto de Ballena Jorobada	104
Figura 58. Mesonikit	105
Figura 59. Rodocetus	106
Figura 60. Morfología de una ballena	108
Figura 61. Krill	109
Figura 62. Ballena yubarta alimentándose	110
Figura 63. Imagen apareamiento, y Ballena con cria en superficie e inmersión	110
Figura 64. Tamaño del corazón de la ballena jorobada	112
Figura 65. Submarino ARC PIJAO	113
Figura 66. Distribución interior de un submarino oceánico de construcción alemana, perteneciente a la Armada Nacional, donde se puede observar la ubicación de los hidrófonos del sonar pasivo y los grupos de baterías.	114
Figura 67. La Boya “ El oído del mar, componentes básicos	116
Figura 68. Presentación conceptual de la detección acústica de los cantos de las ballenas con el sonar pasivo del submarino: Investigación Submarina en el corazón de la ballena	121
Figura 69. Interfaz entre el sonar pasivo del submarino y los equipos de grabación del “Grupo de Seguimiento”	122
Figura 70. Diagrama de instrumento virtual denominado “ HOJA VI”.	124
Figura 71. Patrón fonocardiografico de la secuencia denominada en el estudio como “uno”	112

LISTA DE TABLAS

	Pág
Tabla 1. Transformaciones Básicas aplicadas al cálculo de la WT	46
Tabla 2. Valor de Frecuencia para cada nivel de descomposición	70
Tabla 3. Psuedo-Frecuencias para db6	77
Tabla 4. Energía de cada pista reconstruida	78
Tabla 5. Valores de ventana de correlación para cada tipo de complejo	89
Tabla 6. Características de los submarinos	115
Tabla 7. Criterios para el tipo de sonar	131

TITULO: ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SONIDOS CARDIACOS DE UNA BALLENA JOROBADA ADULTA EN SU ENTORNO NATURAL¹.

AUTORAS: Maribel Anaya Vejar, Nancy Elizabeth Rubiano Arévalo².

PALABRAS CLAVES: Fonocardiografía PCG, Ballena Jorobada, Tratamiento de señales, Transformada Wavelet (WT), Correlación Cruzada (CC). Envolvente de Energía Temporal (EDET).

RESUMEN: Realizar el procesamiento, análisis y caracterización de los cantos de la ballena Jorobada en su entorno natural, para la obtención del patrón fonocardiográfico mediante el uso de la WT.

En el desarrollo de un trabajo conjunto con el grupo de investigación SCVS, dirigido por el Dr. Jorge Reynolds Pombo, se plantea un estudio sobre la conducta y características del funcionamiento del corazón de la ballena, por un medio no invasivo, realizando la captación de los cantos de la ballena, mediante sonar pasivo de un submarino de la Armada Nacional de Colombia; presumiendo que bajo estos cantos se encuentran los sonidos o ruidos cardiacos del corazón del cetáceo.

Se presenta un material donde inicialmente se plantea una problemática en el procesamiento de señal y sonido, además las graficas que ilustran su proceso y los resultados obtenidos. El mayor aporte realizado en este trabajo es la aplicación de la WT, mediante el desarrollo de algoritmos que identifican los sonidos cardiacos presentes en la señal, además de la utilización de otras herramientas como la EDET y CC. Se desarrolla un interfaz grafica que permite visualizar y escuchar tanto los sonidos originales como los resultados obtenidos. En el ultimo capitulo se presenta tanto la clasificación obtenida de los sonidos cardiacos mediante el uso de la EDET y la CC entre el ECG³ y el PCG del cetáceo obtenido en este trabajo, mediante este proceso se determina: el primer ruido cardiaco corresponde al sonido A y el segundo ruido cardiaco es el sonido B, que sirve como aporte complementario a las investigaciones realizadas por el SCVS⁴ y el anterior proyecto de ECG. Es este proyecto de gran importancia para motivar las diferentes investigaciones que pueden realizarse a cerca del estudio del corazón de una especie animal tan antigua que se presupone no presentar arritmias cardiacas.

¹ Trabajo de Grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Escuela de Física, Ph.D, Arturo Plata. Grupo Seguimiento Corazón Vía Satélite (SCVS), Ph.D, Jorge Reynolds Pombo.

³ INTERFAZ GRÁFICA PARA LA OBTENCIÓN DE PATRONES ECG E HIPÓTESIS DEL VECTOR DE DESPOLARIZACIÓN DEL CORAZÓN DE UNA BALLENA JOROBADA ADULTA MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE IMAGEN Y SEÑAL EN UN ENTORNO COMPARATIVO CON EL SER HUMANO, Ricardo Ayala Mantilla, Andrea del Pilar Rosas Herreño.

⁴ Grupo de Investigación Seguimiento al Corazón Vía Satélite

TITLE: ANALYSIS AND CHARACTERIZATION OF THE HEART SOUNDS OF A MATURE HUNCHBACK WHALE IN HER NATURAL ENVIRONMENT. ⁵.

AUTHORS: Maribel Anaya Vejar, Nancy Elizabeth Rubiano Arévalo⁶.

KEYWORDS: Phonocardiography PCG, Hunchback Whale, Signals Treatment, Wavelet Transform (WT), Crossed Correlation (CC). Encircling of Time Energy (EDET).

SUMMARY: To carry out the processing, analysis and characterization of the singing of Hunchback whales in their natural environment, in order to obtain the phonocardiographic pattern by means of the use of the WT.

In the development of a combined work with the investigation group SCVS, directed by Dr. Jorge Reynolds Pombo, a study on the behaviour and characteristic of operation of the whale's heart is planned, using non- invasive means, carrying out the capture of the singing of the whale, by means of a passive sonar of one of National Armada of Colombia's submarine; it is presumed that underlying this singing there are the heart's sounds or noises of the cetacean.

A material is presented where initially signals and sound processing are considered, also the graphs that illustrate its process and the obtained results. The biggest contribution made in this work is the application of the WT, by means of the development of algorithms that identify the existing cardiac sounds in the signal, besides the use of other tools like the EDET and CC. A graphic interface that allows visualizing and listening both the original sounds and the obtained results is developed. In the final chapter it is presented both the obtained classification of the heart sounds by means of the use of the EDET and the use of DC, among the ECG⁷ and the PCG of the cetacean obtained in this work; by means of this process it is determined: that the first heart noise corresponds to the sound A and the second heart noise is the sound B that serves as a complementary contribution to the researches carried out by the SCVS⁸ and the previous ECG project. This project has great importance to motivate the different researches that could be carried out about the study of the heart of such an old animal species that it is supposed not to present heart arrhythmias.

⁵ Final Project

⁶ Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Escuela de Física, Ph.D, Arturo Plata. Grupo Seguimiento Corazón Vía Satélite (SCVS), Ph.D, Jorge Reynolds Pombo.

⁷ INTERFAZ GRÁFICA PARA LA OBTENCIÓN DE PATRONES ECG E HIPÓTESIS DEL VECTOR DE DESPOLARIZACIÓN DEL CORAZÓN DE UNA BALLENA JOROBADA ADULTA MEDIANTE EL TRATAMIENTO DE IMAGEN Y SEÑAL EN UN ENTORNO COMPARATIVO CON EL SER HUMANO, Ricardo Ayala Mantilla, Andrea del Pilar Rosas Herreño.

⁸ Grupo de Investigación Seguimiento al Corazón Vía Satélite

INTRODUCCIÓN

Desde ya hace mucho tiempo el hombre ha sentido gran fascinación y asombro por el mundo oceánico y sus grandes maravillas, creando una curiosidad insaciable sólo cubierta a través de la exploración e investigación. La historia de la humanidad y la de la tierra sitúa sus orígenes en el mar, por lo cual ha sido una necesidad imperante el estudio y la observación de este para comprender mejor al hombre y a la naturaleza en general, en este afán por entender mejor el funcionamiento de cada cosa, el hombre se ha embarcado en la gran tarea de analizar y comparar los diferentes organismos de las especies y de los seres que las conforman para determinar analogías y diferencias.

Buscando todas aquellas respuestas para comprender mejor su entorno, el hombre ha optado por trabajar de forma interdisciplinaria lo cual le brinda una mayor comprensión de los fenómenos que le inquietan; es así como en la escuela de ingeniería eléctrica y electrónica se han realizado diferentes trabajos donde no solo participa el área de electrónica sino también otras como por ejemplo Metalúrgica, Mecánica, Petróleos y diversas ramas de la salud en las que se han realizado aplicaciones que estimulan el desarrollo de la línea de Bioingeniería abarcando desde proyectos en automatización de procesos a nivel industrial hasta la elaboración de diversos equipos con fines comerciales y académicos, haciendo énfasis tanto en hardware como en software.

En este caso el presente proyecto se enlaza con la línea de bioingeniería, teniendo como punto de partida los conceptos de anatomía y fisiología humana además de ciertas bases de cardiología adquiridos con anterioridad, con el fin de encontrar respuestas al interrogante planteado por el Dr. Jorge Reynolds respecto al comportamiento mecánico del corazón de la ballena jorobada; es así como “ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LOS SONIDOS CARDIACOS DE UNA BALLENA JOROBADA ADULTA EN SU ENTORNO NATURAL”

siendo un trabajo de grado se convierte en un avance para los estudios del grupo de investigación Seguimiento al Corazón Vía Satélite (SCVS) en la búsqueda del patrón fonocardiográfico de la ballena, al contribuir con el proceso de caracterización de posibles sonidos cardiacos inmersos en los cantos de esta fascinante especie animal en su ambiente natural, partiendo del hecho que su corazón guarda semejanza con el de otras especies de mamíferos como por ejemplo el hombre.

De igual forma, el proyecto constituye un aporte significativo al desarrollo y fortalecimiento del Grupo de Investigación en Control, Electrónica, Modelado y Simulación (CEMOS) de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander en la línea de Bioingeniería, siendo otro aporte al estudio del corazón de las ballenas, temática planteada en el grupo con una serie de proyectos.

Se adopta como meta presentar de forma concreta los conceptos más relevantes en fisiología, cardiología, procesamiento de señales y transformada Wavelet, con los cuales se pretende alcanzar los objetivos de este trabajo y plantear posibles respuestas a los interrogantes propuestos. Este primer vistazo dará al lector una visión general del trabajo.

Como primera instancia se describen los objetivos y la justificación para este trabajo. Se pasa luego a la fundamentación de cardiología que se presenta en el primer capítulo, describiendo de forma sencilla el origen de la actividad eléctrica del corazón y la interpretación del registro de esta, continuando con el origen de la actividad mecánica del corazón (fonocardiograma y electrocardiograma) y la interpretación de su registro.

En el segundo capítulo se hace una breve descripción de las señales y sus clasificación, llegando luego a los espacios funcionales donde se mencionan tres herramientas para el procesamiento de señales, como lo son la Transformada de Fourier, la Transformada de Tiempo Corto de Fourier (STFT)

y la Transformada Wavelet (WT) mostrando las ventajas y desventajas entre estas. Se ahonda en el funcionamiento de la WT y el análisis multiresolución que con ella se puede realizar, buscando adquirir mayor conocimiento de esta técnica.

Son presentadas las características de las señales originales, que para este caso son los cantos de las ballenas, en el tercer capítulo, donde también se describe paso a paso el proceso de filtrado en el que se utiliza el análisis multiresolución de la transformada Wavelet, esto con el fin de eliminar los cantos del cetáceo al máximo y poder obtener los posibles sonidos de su corazón.

Por último en el cuarto capítulo se detalla el proceso de obtención, caracterización y clasificación de los sonidos cardiacos de la ballena jorobada, explicando que la obtención y caracterización de estos se lleva a cabo usando el método de la Envolvente de Energía Temporal; para finalizar se plantea la clasificación de los sonidos encontrados pertenecientes al cetáceo, suponiendo un primer y segundo ruido cardiaco al igual que en los humanos, haciendo uso de las señales de electrocardiografía (ECG) analizadas en un trabajo anterior a este.

OBJETIVOS

Objetivo General

Procesar las señales fonocardiográficas de la ballena jorobada haciendo el filtrado correspondiente y la caracterización de la misma.

Implementar un entorno gráfico para desplegar los resultados obtenidos del análisis que se realice al fonocardiograma.

Objetivos Específicos

- Filtrar las diferentes pistas a trabajar, con el fin de eliminar aquellas frecuencias relacionadas con los cantos de las ballenas y diversos sonidos que se pueden encontrar bajo el mar como el causado por el oleaje e incluso otros animales.
- Implementar algoritmos que permitan identificar y relacionar los posibles sonidos cardiacos encontrados en las diferentes señales a trabajar.
- Analizar y caracterizar los posibles sonidos cardiacos de la ballena jorobada en tiempo y frecuencia utilizando la Transformada *Wavelet*.
- Realizar un análisis de relación entre los sonidos cardiacos de la ballena y su electrocardiograma con el fin de encontrar patrones comunes entre estos.

JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de este trabajo es de gran importancia para los estudios posteriores de investigación que se realizarán a partir de este por el grupo de seguimiento de corazón vía satélite dirigido por el Dr. Jorge Reynolds, teniendo en cuenta el conocimiento que dentro de todos los cetáceos la ballena jorobada es la que produce mayor variedad de sonidos, estos abarcan desde las muy bajas frecuencias hasta las muy altas.

Las especulaciones que se tienen permiten asumir en principio que dentro de las grabaciones que se hicieron de sus cantos podían estar registrados los sonidos producidos por el funcionamiento del corazón. Por tal motivo se pensó en la posibilidad de aislar estos sonidos mediante un trabajo de procesamiento digital de señales, para obtener sus sonidos cardiacos y así permitir estudiar las características del funcionamiento del corazón de estos grandes mamíferos.

En este primer trabajo se intenta dar uno de los primeros pasos para el estudio posterior en el cual se pretende encontrar las causas por las cuales las ballenas no presentan patologías cardiacas, mediante una comparación con los estudios electrocardiográficos y fonocardiográficos de los sonidos cardiacos humanos y de la ballena.

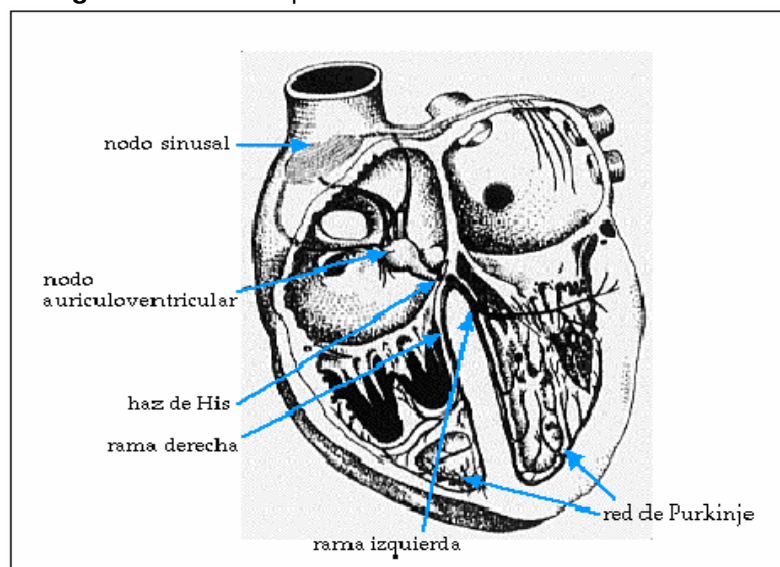
Este estudio preliminar logrará extraer de forma limpia los sonidos característicos del corazón del mamífero, permitiendo determinar datos característicos de la misma señal como son frecuencias, intensidades del sonido, amplitud de la señal, y una relación fonocardiograma - electrocardiograma de la señal cardiaca de la ballena, entre otros análisis que se podrán hacer a futuro en otros trabajos realizados como siguiente paso a este proyecto a desarrollar.

1. GENERALIDADES DE ELECTROCARDIOGRAFÍA Y FONOCARDIOGRAFÍA

Los primeros trabajos realizados para un registro exacto de electrocardiograma fueron hechos en el siglo XIX, por el científico EINTHOVEN, usando un voltímetro mejorado el cual llamo galvanómetro de cuerda o alambre, dando así el primer gran paso hacia los estudios fundamentales del funcionamiento eléctrico del corazón.[1]

El impulso eléctrico en el corazón, se inicia en el nodo sinusal, luego se propaga a través de las vías de conducción interauriculares hacia ambas aurículas y hacia el nodo auriculoventricular (AV). Allí se produce una disminución de la velocidad de conducción de la corriente eléctrica. Esta corriente continúa por el haz de His y sus ramas derecha e izquierda hasta pasar por la red de Purkinje a ambos ventrículos. Figura1.

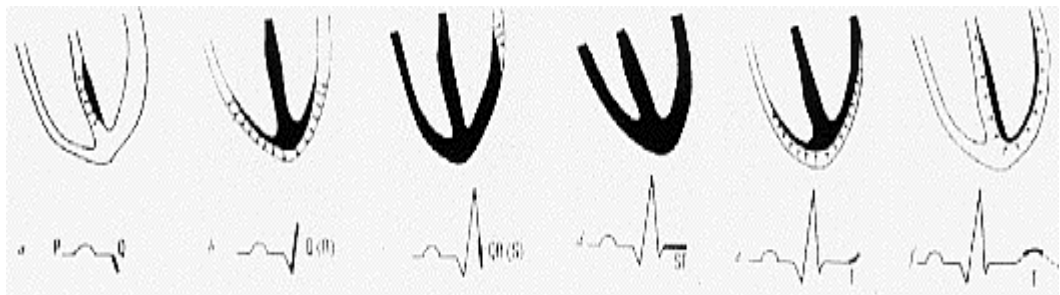
Figura 1. Sistema específico de conducción del corazón



<http://webs.comb.es/aranda/egene2.html>

La activación ventricular, inicia a nivel del tabique interventricular y se produce de izquierda a derecha, después la región anterior del tabique y la mayor parte de ambos ventrículos. Las regiones posterobasales izquierdas, el cono de la arteria pulmonar y la parte más alta del tabique interventricular son las últimas en activarse. [2] Cada una de estas zonas de activación tiene su correspondencia en el ECG. Figura 2.

Figura 2. Diagrama correspondencia de la activación del corazón y el ECG.



<http://webs.comb.es/aranda/egene2.html>

El llamado registro electrocardiográfico (ECG) se obtiene tras amplificar las señales de los potenciales de acción de las fibras del miocardio, tomadas por medio de electrodos aplicados en varias partes sobre el cuerpo, se logra obtener entonces el registro de esta variación de tensión eléctrica emitida por los tejidos especializados del corazón hasta la piel.

1.1 ELECTROFISIOLOGÍA CARDIACA

Para lograr tener una comprensión sobre el funcionamiento eléctrico del corazón, se debe tener en cuenta un análisis de su actividad intracelular, en la cual se realiza un proceso de polarización y despolarización eléctrica, que se relaciona directamente con el fenómeno mecánico; del músculo cardiaco, los cuales son la contracción auricular o sístole auricular que va seguida de la

contracción de los ventrículos o sístole ventricular y durante la siguiente fase llamada diástole las cuatro cámaras del corazón están relajadas. Las células en general tienen un comportamiento eléctrico, ya que al colocarla en contacto con un galvanómetro, se encuentra en estado de reposo una carga eléctrica, que se produce por un medio interno de carga negativa y uno externo de carga positiva [3].

Una célula cualquiera puede ser convertida en una célula especializada al ser afectada por algún mecanismo eléctrico, químico o mecánico que cambia su estado de reposo, por lo cual cambiaría a célula marcapasos(nodo sinusal (SA), nodo auriculoventricular (AV), haz de his, Sistema de Purkinje) , este cambio llevara tanto a estas células marcapasos como a las no marcapasos (musculares, miocitos, cardiacas) a despolarizarse, este proceso es el que se conoce como potencial de acción (PA), este PA en las células cardíacas individuales esta caracterizado por una rápida despolarización, una meseta y un proceso de repolarización lento.

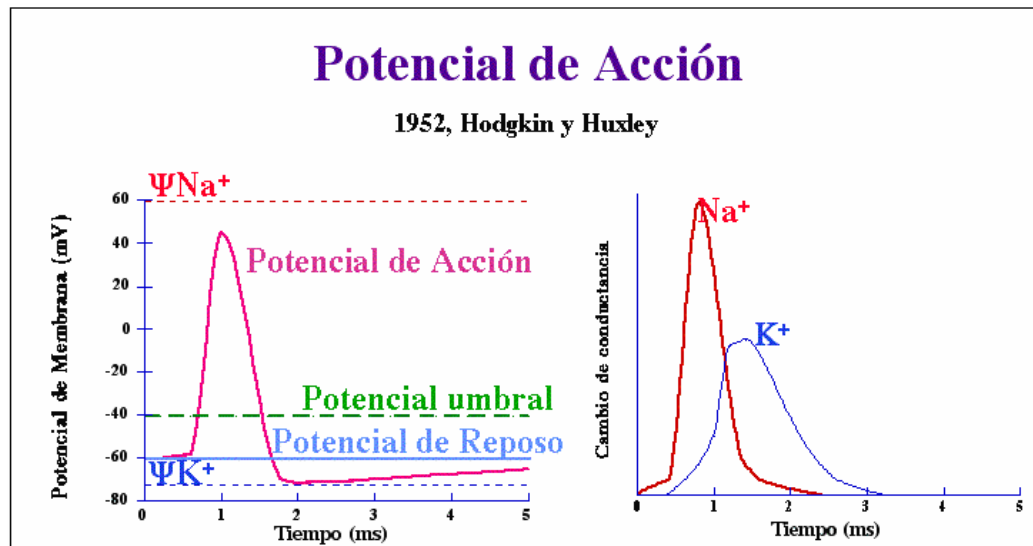
1.1.1 Células no marcapasos

Las células miocárdicas no marcapasos hacen parte de la masa muscular en aurículas, ventrículos las cuales pueden ser activadas; en su fase de reposo el potencial intracelular que presentan es de -90 milivoltios (mV), que se presenta por la diferencia iónica entre el interior y el exterior celular, imperando el potasio (K^+) intracelularmente y sodio(Na^+) y cloro(Cl^-) extracelular; la diferencia de potencial eléctrico presente al final se conoce como potencial de reposo transmembrana, caracterizado por una rápida despolarización, una meseta y un proceso de repolarización lento.

En la fase de reposo aumenta la permeabilidad al paso del ion K^+ de la membrana celular, al tiempo que ofrece resistencia al paso del ion Na^+ , por ello

es necesario que se presente la acción de la bomba dependiente de ATP (conocida como $\text{Na}^+\text{K}^+\text{ATPasa}$) la cual introduce dos iones K^+ y extrae tres iones Na^+ en la célula. Figura 3.

Figura 3. Potencial de Acción



<http://wwwbioq.unizar.es/Biofvirtual/Tema-PM/PM.gif>

Se piensa que la célula se halla despolarizada cuando los iones de sodio no atraviesan la membrana celular. En esta fase cero (fase de despolarización) es cuando se aplica el estímulo eléctrico, químico o mecánico suficiente para bajar el potencial de la membrana a su nivel de disparo (-70mV), los canales iónicos de Na^+ , son dependientes del voltaje y al abrirse ocasionan una entrada rápida de este ion. Este cambio implica una alteración de la polaridad en la membrana, lográndose entonces un voltaje de +20mV al final de la fase, donde se cierran los canales de Na^+ , y la respuesta presente en aquel momento es la salida de iones K^+ y el ingreso de Cl^- , luego el potencial en la membrana baja hasta 0mV.

En la siguiente fase de meseta, se presenta el equilibrio en la conductancia del Na^+ y K^+ , que permite la entrada del Ca^{++} y el Cl^- . La fase tres o repolarización rápida, es originada por la activación del canal K^+ , cambiando el potencial de la membrana a negativo. En la fase final de potencial de reposo o fase cuatro, la célula se encuentra en equilibrio eléctrico, pero en desequilibrio químico pues hay abundancia de Na^+ en el interior de la célula, aquí la bomba $\text{Na}^+\text{K}^+\text{ATPasa}$ realiza su importante tarea de equilibrar la célula químicamente, dejándola en sus concentraciones electrolíticas iniciales, para iniciar nuevos potenciales de acción. [4]

1.1.2 Células Marcapasos

Estas células son de potencial de membrana inestable y fácilmente excitables, el cual después de cada impulso vuelve a disminuir hasta alcanzar el nivel de disparo (prepotencial o potencial del marcapasos). [5], [4]. Esto produce el siguiente impulso eléctrico. Este prepotencial se presenta debido a la disminución continua en la permeabilidad con respecto al K^+ . La velocidad con que se cambia el potencial de la membrana hasta el nivel de disparo determina la frecuencia a la que cambia la carga en el tejido. Estos prepotenciales son destacados normalmente en los nodos SA Y AV.

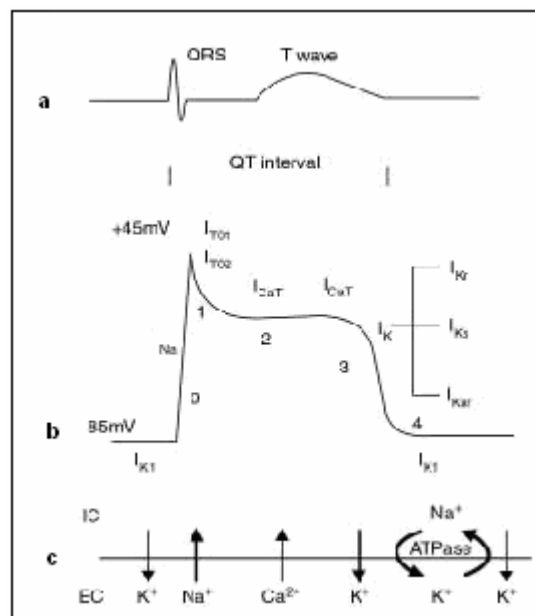
1.2 PROPAGACIÓN DE LA EXCITACIÓN CARDIACA

La despolarización que inicia en el nodo SA se irradia por medio de las aurículas, centrándose luego en el nodo AV, la despolarización auricular se completa en 0.1 seg que es el retardo del nodo AV, antes de que la excitación se propague a los ventrículos. Desde la parte superior del tabique, la onda de despolarización se propaga por las fibras de Purkinje, a todas las partes del ventrículo de 0.08 a 0.1 seg. La onda de despolarización se propaga luego

hacia abajo del tabique hasta la punta del corazón, luego regresa a lo largo de las paredes del ventrículo hasta el surco AV, propagándose por la superficie endocárdica a la epicárdica. El nodo SA es por tanto el marcapasos cardíaco y su frecuencia de descarga define la frecuencia del latido del corazón.

El registro electrocardiográfico (ECG) es el conjunto de oscilaciones en el potencial durante el ciclo cardíaco, que es la suma de estos PA de la fibras del miocardio, su registro tiene representación en una grafica de actividad eléctrica del corazón en el tiempo. [2]. La señal eléctrica registrada en un electrocardiograma de superficie es el resultado de la suma total de todos los vectores que se originan en la propagación de los diferentes frentes de onda presentados por la actividad eléctrica del miocardio y el procesamiento de la señal. Figura 4

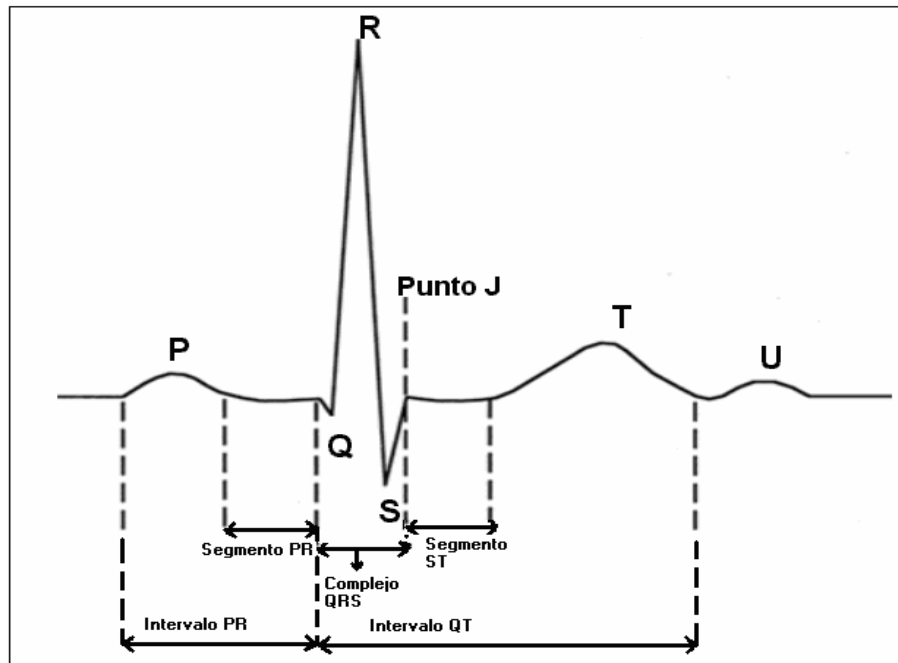
Figura 4. Relación entre PA y ECG. El potencial de acción cardiaco (a) Superficie del electrocardiograma (b) Potencial de acción mostrando la despolarización y la repolarización y los sitios e acción de los canales iónicos (c) Dirección de las corrientes iónicas durante la activación de los canales (3)



www.laboratoriosamerica.com.co/web/congreso2001/Html/ImportanciaDelECG.htm

Las partes del ECG entre las deflexiones se llaman segmentos, y las distancias entre ondas se denominan intervalos. Un periodo de ECG en una persona sana, consiste de una onda P, el complejo QRS, la onda T y la onda U; en la figura 5 se observan las divisiones que se pueden hacer en el ECG humano. [ARA],

Figura 5. Trazado electrocardiográfico normal ondas, intervalos y segmentos que representan la actividad eléctrica del corazón.



www.laboratoriosamerica.com.co/web/congreso2001/Html/ImportanciaDelECG.htm

1.3 NOMENCLATURA DEL ELECTROCARDIOGRAMA

1.3.1 Onda P – Onda T auricular (Ta) Producida por la "despolarización" (activación) auricular. El inicio de la despolarización auricular se presenta en la parte alta de la aurícula derecha y la última zona en despolarizarse es la parte distal de la aurícula izquierda (que ocurre a los 60 ms (0.06 seg) del inicio de la activación auricular, por lo que la "duración" aproximada de la onda P es de 0.06 seg).

La onda P es generalmente mejor visualizada en DI - DII - V1. Es simétrica en DI, DII y puede ser positiva (+), negativa (-) o bifásica (siendo normal, siempre que la deflexión negativa no sea mas de 0.04 seg, ni tenga menos de 1 mm) en V1; su amplitud es menor a 2.5mm en todas las edades. La duración normal de la onda P es de 0.1seg pero oscila entre 0.08 – 0.11seg dependiendo de la edad. El eje de la onda P (se calcula como el eje de QRS) en condiciones normales (situs sólitus con ritmo sinusal) estará entre 0° y + 90° , por lo tanto será (+) en DI y (+) en aVF, si este eje se encuentra entre 0° y - 90° ((+) en DI y (-) en aVF), indica que la activación auricular va de abajo hacia arriba; si por el contrario se encuentra entre +90° y -90° (en DI) indica que la activación auricular comienza en el lado izquierdo (va de izquierda a derecha).

La repolarización auricular es una "deflexión" negativa (Ta) que va en sentido opuesto a la onda P (despolarización), pero no se suele ver al estar incluida en el QRS (en ocasiones es visible si existe disociación auriculo - ventricular). Cuando la onda de repolarización auricular (Ta) se superpone al QRS dará una "depresión" del segmento PR (desde el final de la onda P al inicio del QRS) y del segmento ST (desde el final del QRS al inicio de la onda T). La depresión del ST debida a enfermedad ventricular no se asocia a depresión del segmento PR, por eso cuando se miden cambios en el segmento ST, el "segmento" PR debe de ser tomado como línea basal.

1.3.2 Intervalo PR Es el espacio medido entre el inicio de la onda P y el inicio del QRS. Es producido por el retraso del impulso que viene de las aurículas al pasar por el nodo A-V y en menor medida por el retraso que se produce al pasar el impulso por el Haz de His. Varía con la edad y con la frecuencia cardiaca (puede variar desde 0.08 seg. hasta 0.18 seg.). Este pasa de un valor medio de 0.10 seg en el recién nacido, a 0.14 seg. a los 12 años. El límite

superior normal por encima de los 5 años es de 0.20. El intervalo PR se suele medir en DII. (La onda P será (-) en aVF y (+) ó isoeleétrica en DI).

1.3.3 Complejo QRS Es producido por la despolarización (activación) ventricular. Se debe tener en cuenta la siguiente nomenclatura:

Si la primera onda es negativa se llama onda "q", si es negativa y grande se llama "QS", si es positiva se llama onda "r"; tras una onda "r" la siguiente onda negativa se llamará onda "s". Si hay detrás otra onda positiva se llamará onda "R'" y la siguiente negativa "S'". Tanto las ondas positivas (ondas R), como las negativas (ondas S) se reflejan con letras mayúsculas (R, S, R') si tienen una amplitud mayor de 5mm se, en caso contrario se marcan con letras minúsculas (r, s, r').

Para determinar el eje del QRS hay varios métodos (DI - aVF;"máxima positividad"), el más práctico es determinar el complejo "isoeletrico" que es definido como: la derivación en la cual la suma de "deflexiones" positivas y negativas es igual a cero. El eje de QRS estará perpendicular a esa derivación. Cuando todas las derivaciones son "isoeletricas" el eje de QRS se llamará "indeterminado".

La duración del QRS se mide en una derivación en la que haya onda "q" (generalmente en V5 - V6). La duración del QRS es variable, aumenta con la edad y pasa de 0,06 seg en el recién nacido a 0.08 seg a los 12 años. Valores mayores de 0,10 seg son considerados anormales. Cuando la masa ventricular aumenta, la duración del QRS aumenta.

1.3.4 Onda Q La onda Q suele estar presente en DI-DII -DIII y aVF y casi siempre en V5-V6. La amplitud de la Q en aVF, V5, V6 es menor 5 mm. En DIII

puede llegar hasta 5-8 mm. La duración de la onda Q es de 0.010 – 0.020 seg. No supera normalmente 0.30 seg.

Un patrón "qR" en precordiales derechas (V1-V2) o en aVR no es normal. La onda "q" en V1 hay que considerarla siempre patológica, mientras que la onda "q" en V6 está presente en más del 90% de los niños por encima de 1 mes de vida. Un patrón "QS" en aVR puede ser normal en cualquier edad.

Una onda R "pura" sin onda S en V1 puede estar presente normalmente hasta los 5 meses de vida. Una onda R "pura" en V6 puede estar presente en cualquier edad.

En el complejo QRS se debe tener en cuenta:

- a). El eje
- b). La duración
- c). La morfología : onda Q , onda R , onda S , patrón RSR´ , ..etc.

1.3.5 Punto J es la unión del final del QRS con el segmento ST.

1.3.6 Segmento ST Desde el final del QRS hasta el inicio de la onda T.

1.3.7 Onda T Es generada por la repolarización del miocardio ventricular. Es normalmente asimétrica, con un ascenso más gradual que el descenso generalmente tiene forma curvada pero puede tener una pequeña "giba". Esta onda puede ser (-) en DI y (+) en aVR durante los primeros días de vida; por encima de 1 mes de edad siempre es (+) en DI - DII - aVF y (-) en aVR, pudiendo ser (+), (-) ó difásica en DIII - aVL. Su amplitud generalmente no se

mide ya que es muy variable, sin embargo ondas T de bajos voltajes o planas en varias derivaciones pueden indicar una anomalía.

La repolarización es un proceso opuesto a la despolarización, pero como se realiza de epicardio a endocardio, al final el vector resultante de la onda T es paralelo al del QRS. La onda T en V1 como hemos dicho, puede ser (+) en los primeros días de la vida, después será siempre (-) hasta la adolescencia en que será (+) como en los adultos. Una onda T alta anormal es definida como la que tiene mayor a 7mm en las derivaciones "estándar" ó > 10mm en las precordiales en cualquier edad.

1.3.8 Intervalo QT Se mide desde el inicio del QRS hasta el final de la onda T. Indica la duración total de la despolarización y repolarización del miocardio ventricular.

1.3.9 Onda U En ocasiones puede ser visible detrás de la onda T. Se piensa que es producida por la repolarización ventricular de las células de Purkinje

La secuencia que se sigue en la lectura de un Electrocardiograma es la siguiente:

1. Frecuencia Cardíaca.
 2. Ritmo
 3. Eje del complejo QRS en el plano frontal.
 4. Intervalos: - intervalo PR
- duración del QRS
 - intervalo QTc

5. Hipertrofias: - Auriculares

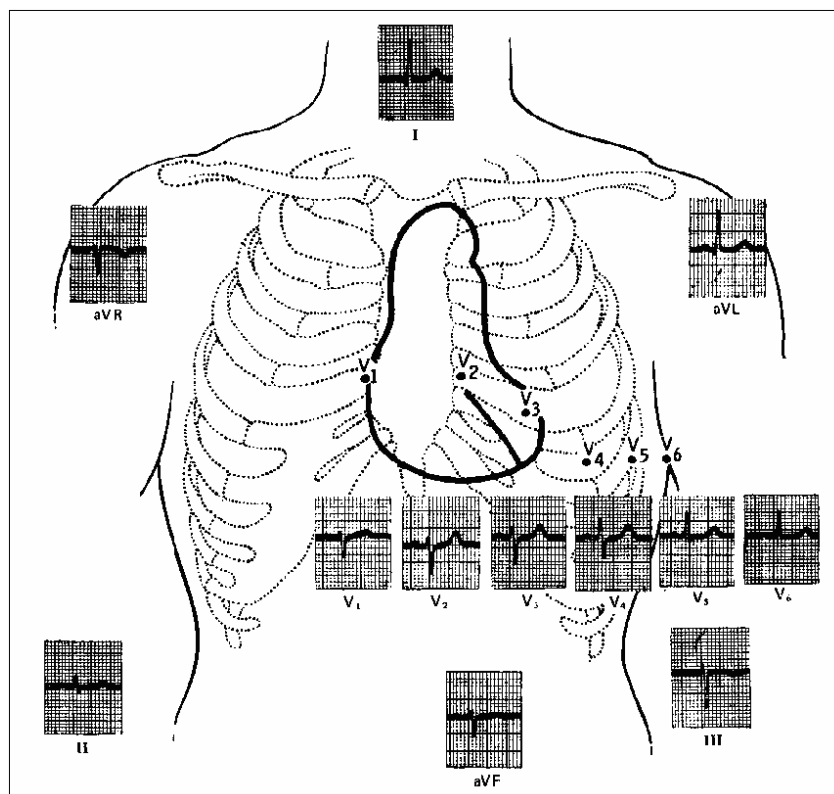
- Ventriculares

6. Repolarización (onda T) y segmento ST.

1.4 DERIVACIONES

Las derivaciones son los puntos de referencia sobre la superficie corporal humana en los cuales se toma el registro del ECG, por medio de electrodos que pueden ser invasivos o no invasivos. [3]. El ECG esta formado por doce derivaciones las cuales son, ver Figura 6.

Figura 6. Derivaciones en un ECG normal



Dr. William Ganong, Fisiología médica, decimotercera edición, 1992, pág. 498.

Un ECG normal está compuesto por doce derivaciones diferentes. Estas se dividen en tres grupos:

- I. Derivaciones bipolares de las extremidades: Registran la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos:
 - Derivación I: entre brazo izquierdo (+) y brazo derecho (-).
 - Derivación II: entre pierna izquierda (+) y brazo derecho (-)
 - Derivación III: entre pierna izquierda (+) y brazo derecho (-)

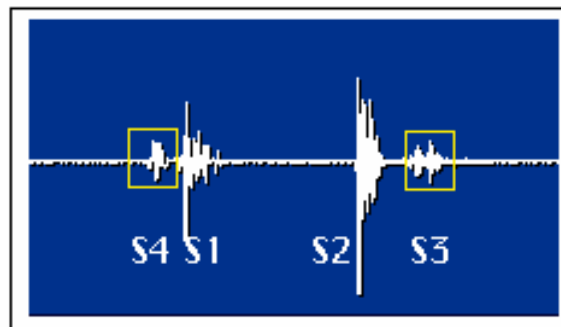
- II Derivaciones monopolares de los miembros: Registran las variaciones de potencial de un punto con respecto a otro que se considera con actividad eléctrica 0. Se denominan aVR, aVL y aVF, por:
 - a: significa aumento y se obtiene al eliminar el electrodo negativo dentro del propio aparato de registro.
 - V: Vector.
 - R (right), L (left) y F (foot): según el lugar donde se coloque el electrodo positivo, brazo derecho, brazo izquierdo o pierna izquierda.

- III. Derivaciones precordiales(de Wilson): el electrodo se coloca en:
 - V₁: 4^º espacio intercostal derecho, línea paraesternal derecha.
 - V₂: 4^º espacio intercostal izquierdo, línea paraesternal izquierda.
 - V₃: simétrico entre V₂ y V₄.
 - V₄: 5^º espacio intercostal izquierdo, línea medioclavicular.
 - V₅: 5^º espacio intercostal izquierdo, línea anterior axilar.
 - V₆: 5^º espacio intercostal izquierdo, línea axilar media.

2. FONOCARDIOGRAFÍA HUMANA

La percepción de los ruidos del cuerpo, generalmente con la ayuda de un estetoscopio, se denomina *auscultación*, esta ha sido durante mucho tiempo una herramienta excelente para la evaluación del corazón y sus válvulas; sin embargo con el desarrollo de la tecnología y técnicas de registro digital, hoy en día es posible registrar aquellos sonidos de baja frecuencia que conforman los sonidos cardiacos y que no son altamente perceptibles por el oído humano, para una mejor evaluación de los componentes mecánicos del corazón. Este registro recibe el nombre de *Fonocardiograma* como el que se aprecia en la figura 7.

Figura 7. Fonocardiograma Normal Humano

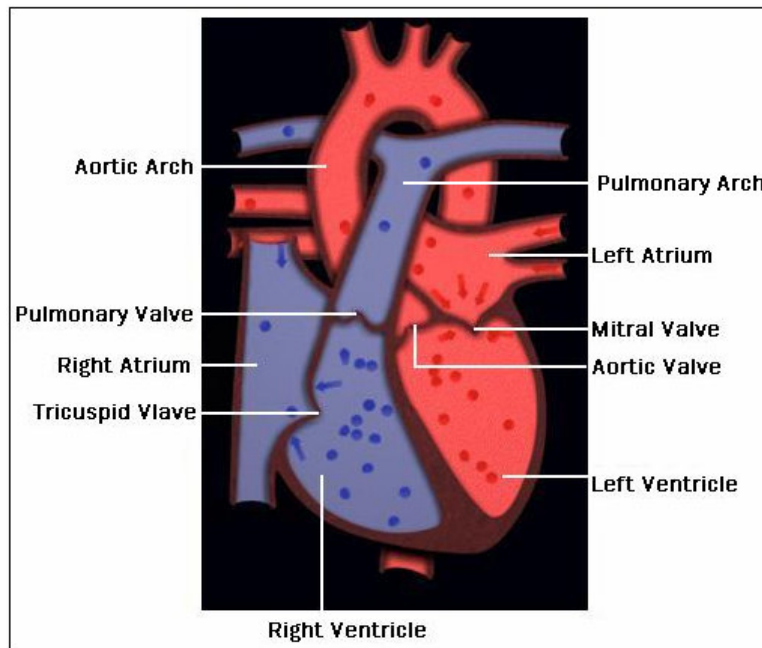


Andrómeda Interactive Ltd., the Cardiac Cycle "Heart Sound"
mediacal@andromeda.co.uk .Modulo 1-13. 1995

2.1. EL CORAZÓN CONSIDERADO COMO UNA BOMBA

El corazón normal es una fuerte bomba muscular que bombea sangre a todo el sistema circulatorio. Está formado por cuatro cámaras, dos aurículas y dos ventrículos con células musculares que se contraen mecánicamente, como se puede apreciar en la figura 8. La aurícula y ventrículo derecho bombean sangre a los pulmones, mientras que la porción izquierda bombea la sangre oxigenada a los vasos sanguíneos que la llevan al resto del cuerpo.

Figura 8. Anatomía Cardíaca General



Andrómeda Interactive Ltd., the Cardiac Cycle "Heart Sound"
mediacal@andromeda.co.uk .Modulo 1-13. 1995

El corazón tiene además cuatro válvulas que se abren y cierran para controlar la dirección del flujo de sangre cuando el corazón late. Las válvulas auriculoventriculares A-V (mitral y tricúspide), impiden el flujo retrógrado de la sangre de los ventrículos a las aurículas durante la sístole; la válvula tricúspide está localizada entre la aurícula y el ventrículo izquierdos, mientras la válvula mitral se encuentra entre la aurícula y el ventrículo derechos. Por otra parte las válvulas sigmoideas son las válvulas aórtica y pulmonar que se encuentran localizadas entre el ventrículo izquierdo y la aorta, y entre el ventrículo derecho y la arteria pulmonar respectivamente; impiden que la sangre de las arterias aorta y pulmonar regrese a los ventrículos durante la diástole. [3]

2.2. EL CICLO CARDIACO

Los hechos que ocurren desde el comienzo de un latido hasta el comienzo del siguiente se conocen como *Ciclo Cardíaco* y se refiere a la repetición de un patrón de contracción y relajación del corazón. Cada ciclo se inicia por la generación espontánea de un potencial de acción en el nodo sinusal, como se explica en el capítulo anterior. El ciclo cardíaco consta de un periodo de relajación, denominado *diástole*, durante el cual el corazón se llena de sangre, seguido por un periodo de contracción llamado *sístole*. Cuando se ausculta el corazón, no se escucha la apertura de las válvulas debido a que es un proceso relativamente lento, que no hace ruido. Sin embargo cuando se cierran las valvas, los bordes de las válvulas y los líquidos de alrededor vibran debido a las diferencias de presión que se crean lo que produce ruidos que se transmiten en todas direcciones por el tórax. [2]

El periodo de contracción o sístole tiene diferentes fases que son:

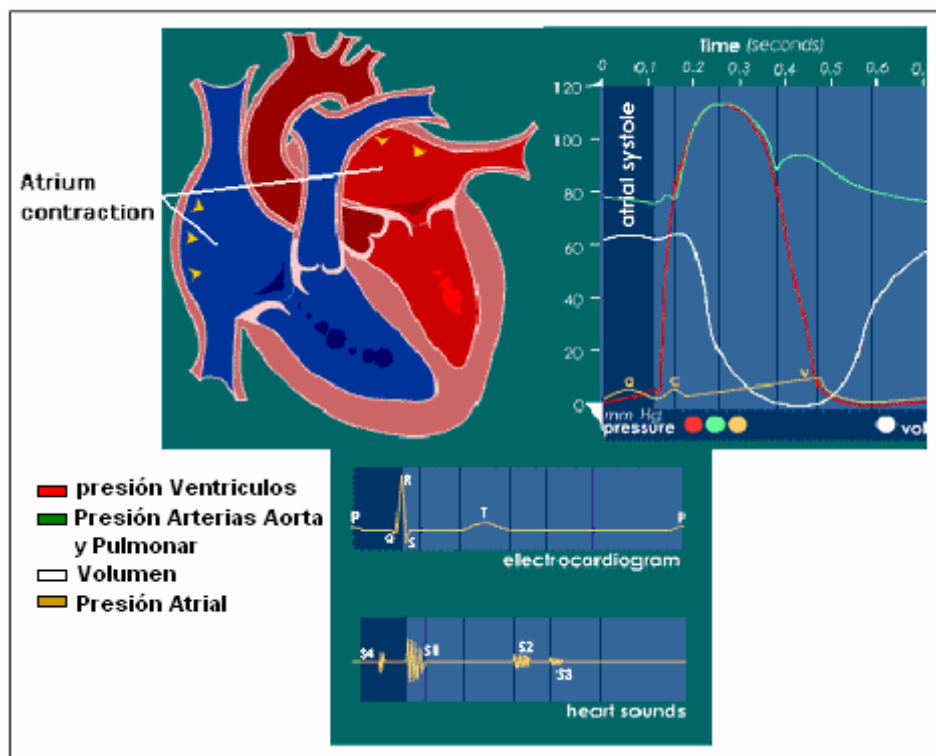
- *Sístole Auricular*: Conocida también como el final de la diástole. Antes de esta fase, la sangre ha estado fluyendo pasivamente desde las aurículas hacia el ventrículo a través de las válvulas AV. Durante esta las aurículas se contraen y alcanzan el volumen del ventrículo con sólo una pequeña cantidad de sangre. La contracción de las aurículas se completa antes que los ventrículos empiecen a contraerse. La onda "a" que se observa en la figura 9, ocurre cuando las aurículas se contraen, incrementando la presión atrial (amarillo). La sangre que llega al corazón no puede entrar a las aurículas así que fluye hacia atrás a la vena yugular, causando la primera onda discernible en el pulso yugular venoso. La presión Atrial baja cuando las aurículas dejan de contraerse.

Con respecto al ECG, un impulso que surge del nodo de Sino Auricular produce la despolarización y la contracción de las aurículas (la aurícula derecha se contrae ligeramente antes que la aurícula izquierda). La onda P es debida a esta despolarización atrial. El segmento de PR está eléctricamente callado puesto que la despolarización avanza al nodo de

Atrio Ventricular. Esta pausa breve antes que la contracción permite a los ventrículos llenarse completamente de sangre.

En esta fase hace presencia el cuarto sonido del corazón (S4) el cual es anormal y es asociado con el fin del vaciado atrial después de la contracción de las aurículas. Se observa cuando se presenta una deficiencia cardiaca congestiva hipertrófica, embolia pulmonar masiva o incompetencia del tricúspide. [6]

Figura 9. Acontecimientos que se producen en la sístole



www.medlib.med.utha.edu/kw/pharm

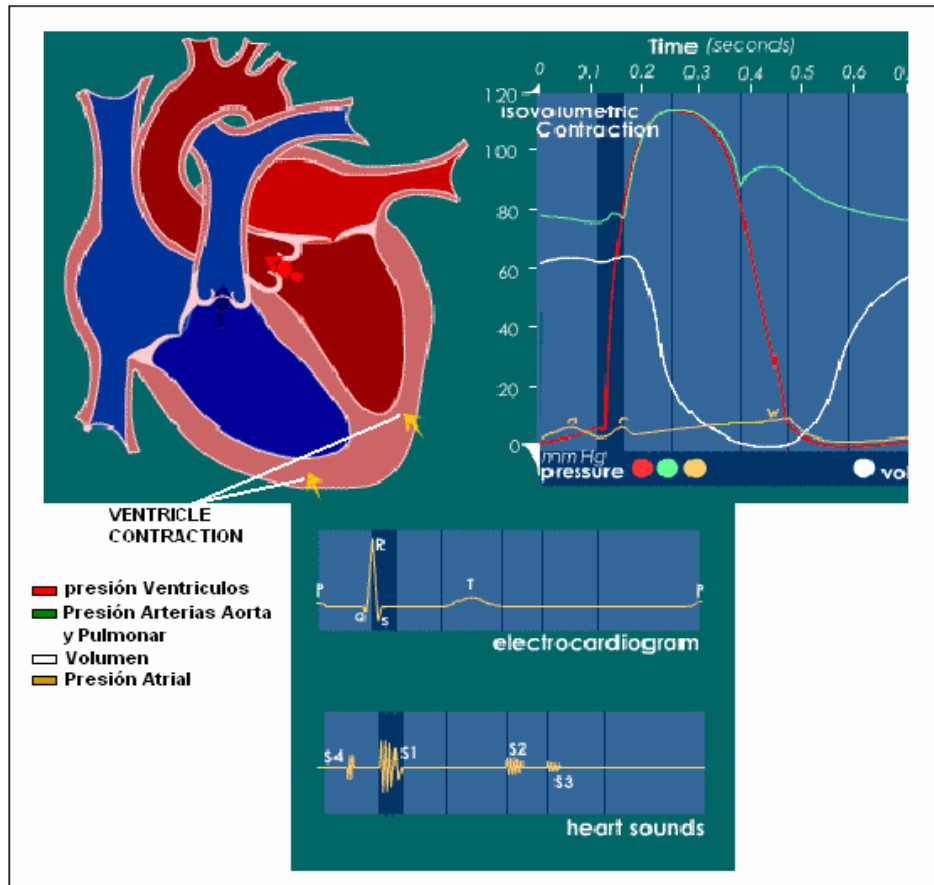
- **Contracción isovolumétrica:** Se le llama también principio de la sístole. Las válvulas atrioventriculares (AV) se cierran al principio de esta fase, como se puede observar en la figura 10. Eléctricamente, la sístole ventricular se define como el intervalo entre el complejo QRS y el fin de la onda T (el intervalo Q-T). Mecánicamente, la sístole ventricular se define como el intervalo entre el cierre de las válvulas AV, el cual ocurre cuando la presión en los ventrículos (rojo) excede la presión en las

aurículas (amarillo), y la apertura de las válvulas semilunares (las válvulas aórtica y pulmonar). Como los ventrículos se contraen isovolumetricamente, su volumen no cambia (blanco), la presión dentro de ellos aumenta, acercándose a la presión en las arterias aorta y pulmonar (verde).

En esta fase el impulso eléctrico se propaga desde el nodo AV a través del Haz de His y el sistema de Purkinje para permitir a los ventrículos contraerse desde el ápice del corazón hasta la base. El complejo de QRS es debido a la despolarización ventricular, y marca el principio de sístole ventricular, es tan grande que enmascara la señal de repolarización atrial subyacente.

En cuanto a los sonidos cardiacos, en esta fase aparece el primer sonido del corazón (S1, "lub") el cual es causado por el cierre de las válvulas AV y la turbulencia de sangre asociada. [6]

Figura 10. Acontecimientos que se producen en la contracción isovolumétrica.

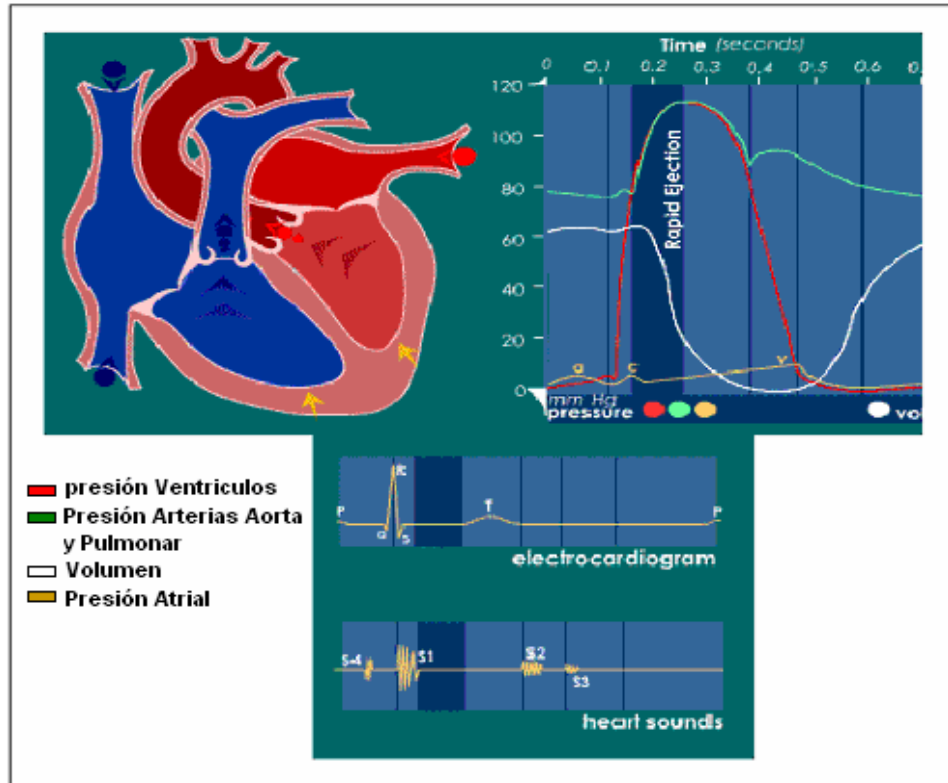


www.medlib.med.utha.edu/kw/pharm

- *Eyección Rápida*: Las válvulas (aórtica y pulmonar) se abren al principio de esta fase. Mientras los ventrículos continúan contrayéndose y su presión (rojo) excede la presión en las arterias aorta y pulmonares (verde) como se observa en la figura 11; las válvulas semilunares se abren, la sangre sale de los ventrículos, y el volumen en estos disminuye rápidamente (blanco). Como más sangre entra en las arterias, la presión allí se establece hasta que el flujo de sangre alcanza un máximo.

La onda "c" de presión atrial no es normalmente discernible en el pulso yugular venoso. La contracción ventricular derecha empuja la válvula tricúspide dentro del atrio e incrementa la presión atrial, creando una pequeña onda dentro de la vena yugular. Es normalmente simultáneo con el pulso carótido. [6]

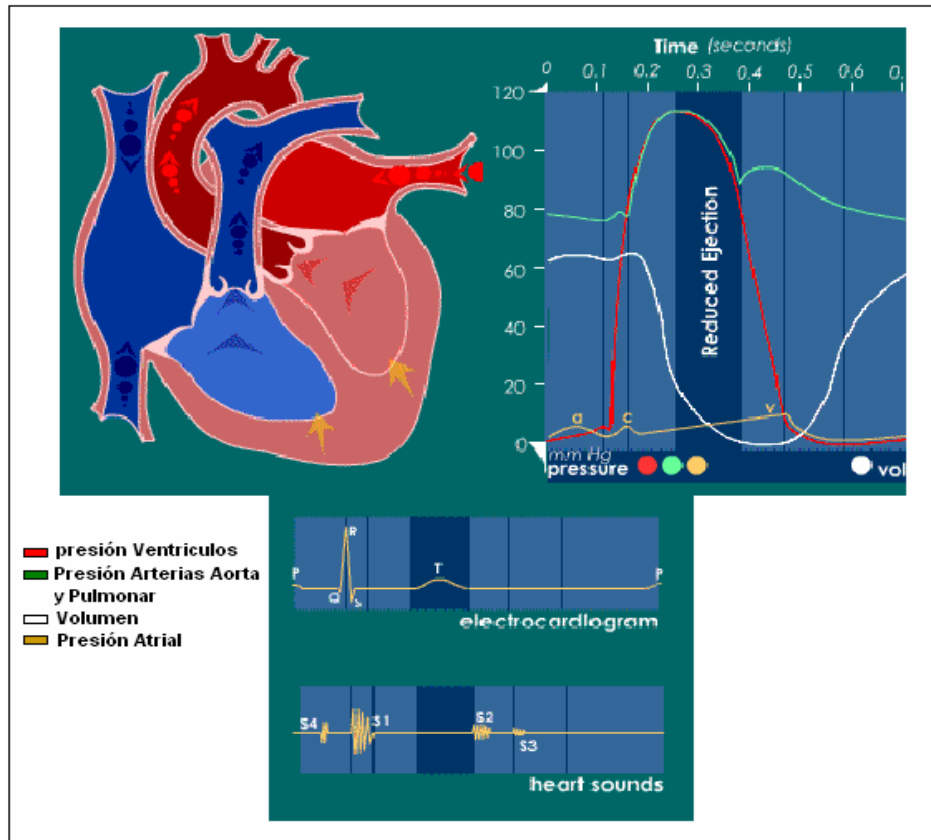
Figura 11. Acontecimientos que se producen en la Eyección Rápida



www.medlib.med.utha.edu/kw/pharm

- Eyección Reducida*: Es conocida también como el final de la sístole. Al final de esta fase las válvulas semilunares (aórtica y pulmonar) se cierran, esto se debe al retroceso de la sangre hacia los ventrículos cuando la presión en estos cae por debajo de la presión de las arterias. Lo anterior se puede observar en la figura 12, donde después del máximo en las presiones ventriculares y arteriales (rojo y verde), la sangre fluye hacia fuera de los ventrículos reducidos y el volumen en estos disminuye más despacio (blanco); esto marca el fin de sístole ventricular mecánicamente. Durante esta fase en el ECG se aprecia la onda T, que es debida a la repolarización ventricular. El fin de la onda T marca el fin de sístole ventricular eléctricamente.

Figura 12. Acontecimientos que se producen en la Eyección Reducida



www.medlib.med.utha.edu/kw/pharm

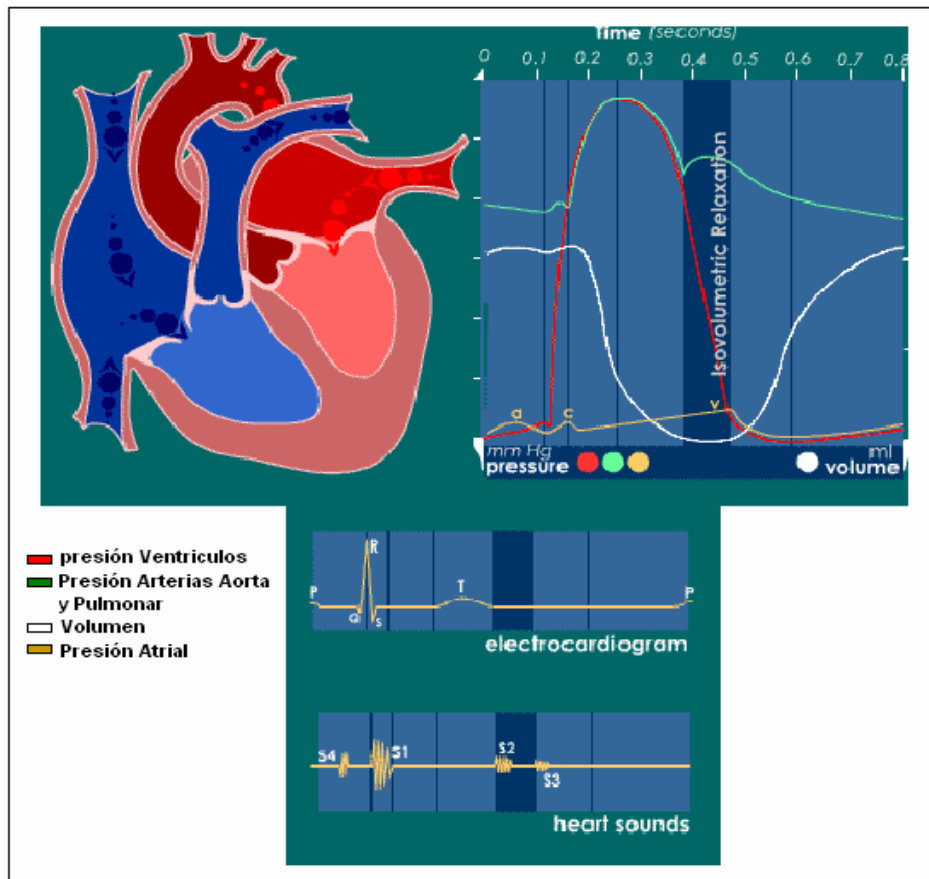
Mientras que el periodo de relajación o diástole posee las siguientes fases:

- *Relajación Isovolumétrica:* Conocida como el principio de la diástole, al inicio de esta fase las válvulas AV se encuentran cerradas. A lo largo de esta y las dos fases anteriores, el atrio en la diástole ha sido llenado con sangre por encima de las válvulas AV cerradas, causando que la presión atrial suba gradualmente (amarillo), ver figura 13.

La onda "v" que se observa en la figura 13, es debida al flujo de sangre que se devuelve después de golpear las válvulas AV que se encuentran cerradas. Esta es la segunda onda discernible del pulso yugular venoso. La presión en los ventrículos (rojo) continúa cayendo. El volumen ventricular (blanco) está en un mínimo y se encuentra listo para crecer al ser llenados los ventrículos nuevamente con sangre. En esta fase se produce el segundo sonido del corazón (S2, "dub"), el cual ocurre

cuando las válvulas semilunares (aórtica y pulmonar) se cierran. S2 es normalmente dividido debido a que la válvula aórtica cierra ligeramente más temprano que la válvula pulmonar.

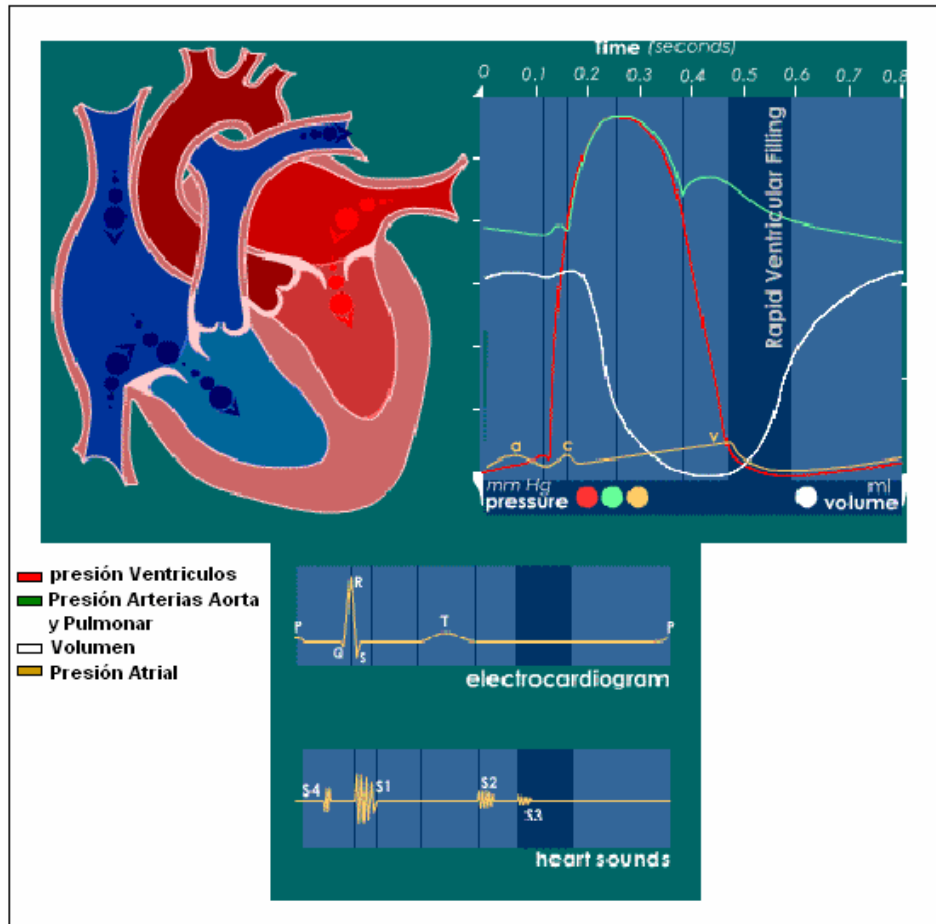
Figura 13. Acontecimientos que se producen en la Relajación Isovolumétrica



www.medlib.med.utha.edu/kw/pharm

- *Llenado Ventricular Rápido:* Una vez las válvulas de AV se abren, la sangre que se ha acumulado en las aurículas, fluye rápidamente al interior de los ventrículos. Como se aprecia en la figura 14, el volumen ventricular (blanco) aumenta rápidamente mientras la sangre fluye desde las aurículas hacia el interior de los ventrículos. En esta fase aparece el tercer sonido del corazón (S3) el cual es causado por el rápido llenado ventricular pasivo. En general este sonido es anormal, y cuando se presenta indica deficiencia cardiaca congestiva dilatada, hipertensión severa, infarto del miocardio, o por incompetencia mitral.

Figura 14. Acontecimientos que se producen en el Llenado Ventricular Rápido



www.medlib.med.utha.edu/kw/pharm

Comparando el ECG con el FCG (fonocardiograma), se puede apreciar la relación que guarda la actividad eléctrica del corazón con su actividad mecánica representada en los sonidos producidos por sus válvulas.

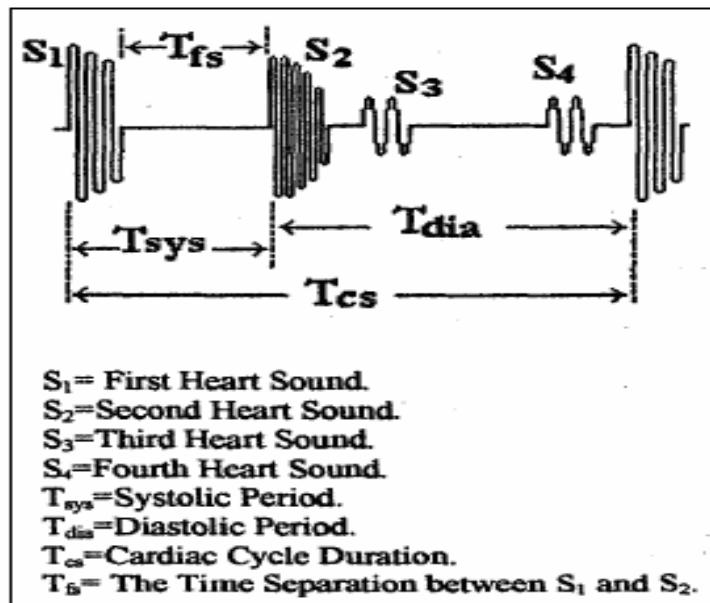
2.3. RUIDOS CARDIACOS NORMALES

Al escuchar un corazón normal se puede oír un ruido normalmente descrito como “lub, dub, lub, dub.”. El “lub” se asocia con el cierre de las válvulas auriculoventriculares (A-V) al comienzo de la sístole, y el “dub” con el cierre de las válvulas semilunares (aórtica y pulmonar) al final de la sístole. El ruido “lub” se denomina *primer sonido cardiaco* y el “dub” *segundo sonido cardiaco* como

se menciona anteriormente, ya que se considera que el ciclo normal del corazón comienza al inicio de la sístole cuando las válvulas A-V se cierran.

La primera explicación sobre la causa de los sonidos cardiacos fue que el golpeteo de las hojuelas valvulares provocaba vibraciones, pero se ha demostrado que esto contribuye poco, por el contrario la causa es la vibración de las válvulas tensas inmediatamente después del cierre junto con la vibración de la sangre adyacente, las paredes del corazón y los vasos mayores alrededor del mismo. [2]

Figura 15. Sonidos Cardiacos Normales



M. El-Hanjouri, W. Alkhalidi, N. Hamdy and O. Abdel Alim. **Heart Diseases Diagnosis using HMM.** IEEE Melecon 2002, May 7-9, 20002, Cairo, Egypt.

2.3.1. Primer Sonido Cardíaco. Este sonido se produce al iniciarse la sístole ventricular e incluye las vibraciones causadas por varios eventos como son el cierre de la válvula mitral y la válvula tricúspide, la apertura de la válvula pulmonar y la válvula aortica generalmente en ese orden, la aceleración de la sangre en la arteria pulmonar y aorta y las vibraciones de la contracción muscular de los ventrículos; estas viajan entonces a través de los tejidos

adyacentes hasta la pared torácica donde pueden oírse como un ruido con el estetoscopio. La duración del primer sonido cardiaco es aproximadamente de 150ms y sus componentes de frecuencia se encuentran en el rango de 50-140Hz. [7] [8]

2.3.2. Segundo Sonido Cardiaco. El segundo sonido del corazón es de mayor calidad que S1, ocurre al final de la sístole ventricular, es causado por el cierre de las válvulas semilunares aórtica y pulmonar lo cual fija vibraciones en la sangre, en las paredes de la aorta y del tronco pulmonar. Bajo algunas condiciones, como la inspiración es posible distinguir los sonidos de las válvulas aórtica (A2) y pulmonar (P2) que constituyen S2. En el corazón normal, la válvula aórtica cierra antes que la válvula pulmonar, por lo que A2 se oye antes que P2; esta diferencia en el cierre es debida a la diferencia en la impedancia entre las circulaciones pulmonar y aórtica. La impedancia es la resistencia a la eyección de sangre de los ventrículos, y es mayor en la aórtica que la circulación pulmonar. Entre más alta sea la impedancia, la válvula cierra más rápidamente.

Los componentes aórtico y pulmonar de S2 están a menudo separados por un tiempo de 20ms y cada uno de ellos tiene una duración aproximada de 10-30ms; normalmente este sonido cardiaco tiene componentes de frecuencias más altos que el primer sonido cardiaco (S1), debido a la presencia de menor masa sanguínea en la cámara cardiaca al final de la sístole; el rango de esos componentes de frecuencia es de 10-400Hz y la separación aproximada entre S1 y S2 es de 300-400ms. [4] [9]

2.3.3. Tercer Sonido Cardiaco. Este sonido llamado S3 ocurre durante las fases tempranas de llenado ventricular pasivo, es causado por las oscilaciones de la sangre entre la raíz de la aorta y la pared ventricular. Normalmente es difícil de descubrir en el corazón adulto normal, pero puede oírse a menudo en

las personas jóvenes, debido a la alta condescendencia (sumisión) de su músculo ventricular. [4] [10]

2.3.4. Cuarto Sonido Cardíaco. Este sonido llamado S4, puede descubrirse con ayuda del fonocardiograma durante la sístole atrial. Se piensa que es causado por el flujo de sangre que es el resultado de contracción atrial, colocando vibraciones en el músculo ventricular, y es muy ocasionalmente audible en los adultos normales. [3]

3. SEÑALES Y ESPACIOS FUNCIONALES

Las señales son representaciones de fenómenos físicos que contienen información acerca de varias cosas y aunque estas pueden representarse de múltiples maneras, en todos los casos la información en una señal está contenida en un patrón de variaciones que representa alguna forma determinada.

Las señales se representan matemáticamente como funciones con una o más variables independientes, es por esto que para poder obtener información importante de estas, es necesario realizar un procesado de la información. El procesado de la información por lo general se realiza por medios electrónicos ya que resulta más conveniente, por lo que se hace necesario hacer la conversión de estas señales a señales de tipo eléctrico tales como voltaje o corriente, lo cual se realiza por medio de transductores. En el caso particular de esta tesis todas las señales fueron adquiridas mediante hidrófonos, los cuales toman los sonidos en el agua y los transforman en magnitudes eléctricas para su procesamiento posterior.

3.1 SEÑALES CONTINUAS Y SEÑALES DISCRETAS

Las señales en general se pueden considerar como de tipo continuo o discreto. En el caso de señales continuas se tiene que la variable independiente es continua, por lo que estas señales se definen para una sucesión continua de valores de la variable independiente.

Las señales discretas solo están definidas en tiempos discretos y, en consecuencia, para estas señales la variable independiente toma solo un conjunto discreto de valores. Como se notará a lo largo de esta tesis las señales con las que se realiza el procesamiento son de tipo continuo, ya que el hidrófono genera una señal analógica de tipo continuo las cuales se transmiten a una etapa de preamplificación. [11]

3.2 ESPACIOS FUNCIONALES

Tal como se señaló con anterioridad, cuando se hace la adquisición de una señal se tiene información global acerca de esta, pero por lo general se necesita hacer un análisis más exhaustivo sobre otras informaciones inherentes a la señal, por lo cual es necesario obtener diferentes representaciones de la señal.

El proceso de transformación de una señal es básicamente una representación de la misma en otro dominio en el que se puede separar con más facilidad las características esenciales de esta, que de otra manera serían difícil de obtener. Existen varias transformadas las cuales van a depender de ciertas características de la señal, por lo general las más utilizadas son:

1. Transformada de Fourier comúnmente conocida como FT.
2. Transformada de Tiempo Corto de Fourier, denominada también como STFT.
3. Transformada Wavelet, conocida también como WT.

En los dos primeros espacios de transformación, es decir, la Transformada de Fourier (FT) y la Transformada de Tiempo Corto de Fourier (STFT) se trabaja con señales estacionarias y finitas. En la transformada wavelet se trabaja con señales de tipo no estacionario, por esto básicamente el trabajo realizado en este proyecto está elaborado con esta transformada dado que son señales biológicas.

La información que se obtendría al efectuar cualquiera de las dos primeras transformaciones no sería útil ya que se tendría el contenido frecuencial pero no se sabría el instante en que sucede. Entre tanto al hacer uso de la Transformada wavelet (WT) [13], [14], de naturaleza multiresolución, es posible trabajar con señales no estacionarias y de duración infinita, convirtiendo la señal original en una señal representada en el dominio del Tiempo-Escala; además la WT presenta la ventaja de realizar un análisis basado en funciones de soporte compacto tanto en el dominio del tiempo como en frecuencia (wavelet madre); de esta manera se consigue una buena localización temporal y frecuencial simultáneamente. Para realizar una mejor descripción técnica de esta transformada se realiza a continuación un desglose comparativo entre diferentes métodos.

3.2.1 Transformada de Fourier. Este es uno de los métodos matemáticos más usados en el procesamiento de señales basado en las diferentes representaciones de señales en series de Fourier, con la cual se puede expresar una señal periódica como la suma infinita de exponenciales complejas [11]. En las ecuaciones (1) y (2) se muestra la representación matemática de la FT directa e inversa.

Directa

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

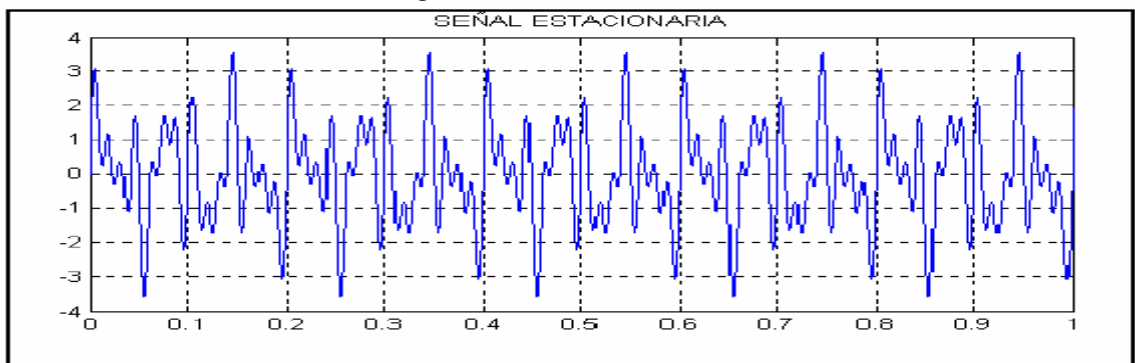
y su inversa:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} df \quad (2)$$

De donde se tiene que t es el tiempo, f la frecuencia, x es la señal en el dominio del tiempo a estudiar y X la señal en el dominio de la frecuencia.

El procesado de la información mediante la FT permite obtener una descripción de la distribución de energía de la señal con relación a la frecuencia. Si se desea lograr una caracterización más completa de la señal se debe realizar un análisis tiempo-frecuencia de esta [12]. Esto se puede observar en la figura 16, donde se muestra una señal estacionaria con componentes espectrales de frecuencia en 15, 30, 50 y 70 Hz.

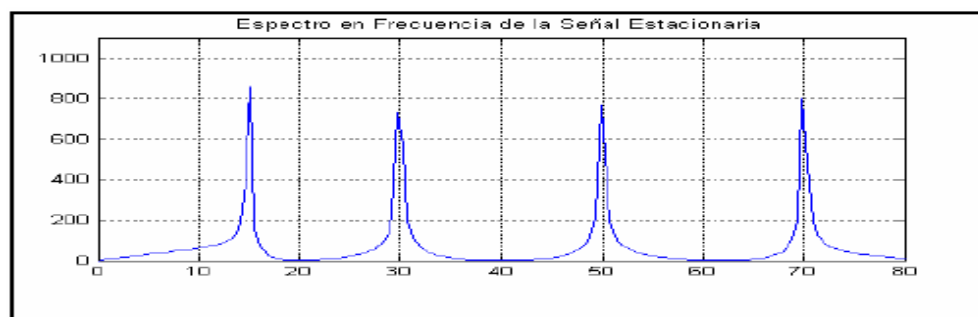
Figura 16. Señal Estacionaria



Roby Polikar. **The wavelet tutorial, fundamental concepts and overview of wavelet theory.** Second Edition

En esta señal se permite la identificación de cada una de las frecuencias de la señal, como es una señal estacionaria el estudio con FT, es suficiente. En la figura 17 se observa su FT con la cual se logra la obtención de las componentes espectrales.

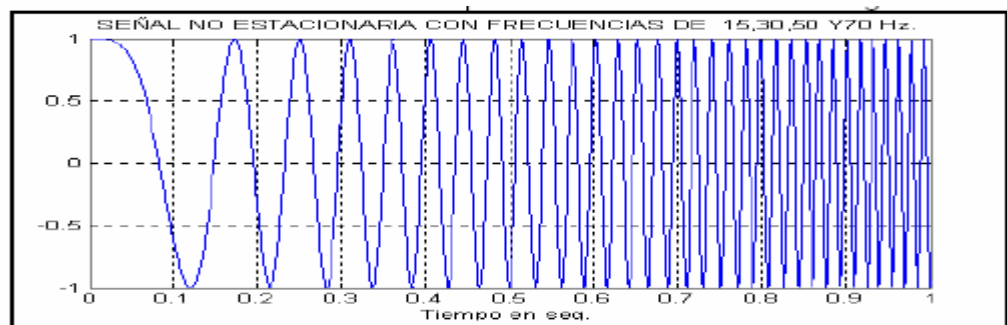
Figura 17. FT de la señal estacionaria de la figura 16



Roby Polikar. **The wavelet tutorial, fundamental concepts and overview of wavelet theory.** Second Edition

En el caso de señales no estacionarias como las que atañen a este trabajo no resulta suficientemente útil la FT, pues la información obtenida consiste en el contenido frecuencial de la señal pero no se conoce el instante en el que este se produce. En la figura 18, se puede apreciar una señal cuya frecuencia varía a lo largo del tiempo, al hallar su FT se obtendría sólo su contenido frecuencial total, pero no la variación en el tiempo.

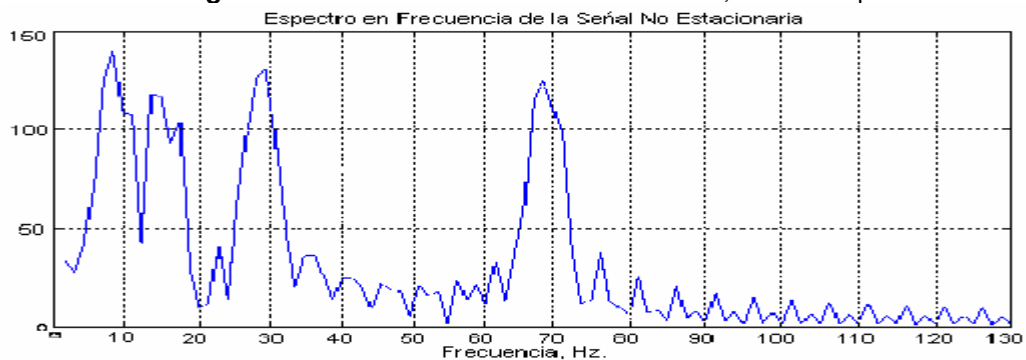
Figura 18. Señal Chirp, no estacionaria



Roby Polikar. **The wavelet tutorial, fundamental concepts and overview of wavelet theory.** Second Edition

Al aplicar la STFT (Short Time Fourier Transform.), a la señal de la figura 18 se identifica el contenido frecuencial pero no se da información acerca de su localización en el tiempo en el que aparecen estos componentes espectrales; esto se muestra en la figura 19.

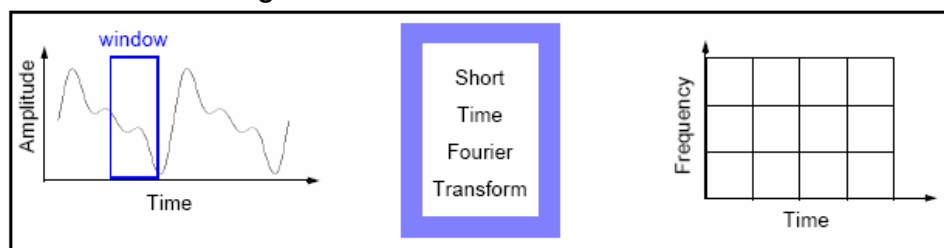
Figura19. STFT de una señal no estacionaria, señal Chirp



Roby Polikar. **The wavelet tutorial, fundamental concepts and overview of wavelet theory.** Second Edition

3.2.2 Transformada de Fourier de Tiempo Corto. En un esfuerzo por resolver el problema de resolución en tiempo de la FT, en 1946 Denis Gabor [11] adaptó la transformada utilizando un procedimiento llamado enventanado, el cual consiste en dividir una señal $x(t)$ en pequeños segmentos a través del tiempo de tal manera que se pueda asumir que cada segmento de la señal sea estacionaria y así poder calcular la FT en cada parte de la señal, como se puede apreciar en la figura 20.

Figura 20. Short Time Fourier Transform



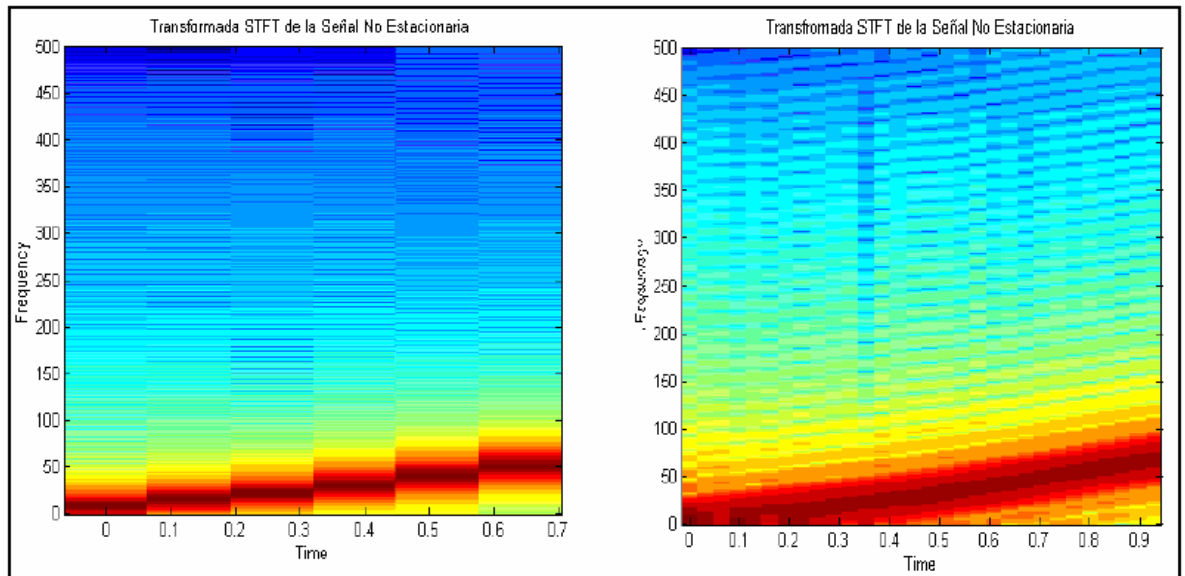
WAVELET TOOLBOX, for use with matlab. The Mathworks, Inc. 2002. Matlab pdf Documentations. www.mathworks.com

La señal es dividida al usar una función tiempo o ventana cuyo ancho es la longitud de cada segmentación de la señal, luego se ajusta la señal con la función ventana en un instante de tiempo T y se calcula la FT, después de esto se traslada la función ventana hasta que sobrepase la ventana anterior, cubriendo una nueva porción de la señal a la que volvemos a calcular la FT, este proceso se repite hasta realizar la FT de toda la señal. La expresión matemática de la STFT está en la ecuación (3)

$$STFT(l, w) = \int_t [f(t)w^*](t-l)e^{-j\omega t} dt \quad (3)$$

Para ilustrar el uso de la STFT y las ventajas sobre la FT. Se usa la señal Chirp (Figura 18) antes mencionada. Al calcular la STFT en contraposición con la FT, se obtiene el contenido de frecuencia en intervalos de tiempo, lo que hace posible identificar en tiempo la existencia de las 4 bandas de frecuencia componentes de la señal. Figura 21.

Figura 21. Calculo de STFT para valores de ventana de: a) 256, b) 64



Roby Polikar. **The wavelet tutorial, fundamental concepts and overview of wavelet theory.** Second Edition

Se aprecian varias bandas de frecuencia según el tamaño de la ventana que se elige, y corresponden a las cuatro diferentes componentes frecuenciales. Estas están localizadas en diferentes intervalos en el eje del tiempo, a diferencia de lo que se puede obtener con la FT.

El problema básico que se presenta en la STFT está relacionado con el principio de incertidumbre de Heisenberg, este principio originalmente aplicado al momento y localización de partículas en movimiento, puede ser aplicado a la información tiempo-frecuencia de la señal, cuanto mayor es la resolución en el tiempo, al ser la ventana de menor longitud, peor será la resolución en frecuencia y viceversa. Por lo que hay un compromiso tiempo-frecuencia, ya

que no es posible conocer la representación tiempo frecuencia exacta de la señal, pero si se puede conocer los intervalos de tiempo en los cuales hay ciertas bandas de frecuencia. Este principio se relaciona con la STFT ya que tiene que ver con el ancho de ventana usada, este es conocido como el soporte de la ventana. Si la función ventana es estrecha, esta es conocida como compactante soportada. La ventana es de longitud finita, por lo que cubre solo una porción de la señal, lo que causa que ya no se conozcan los componentes frecuenciales exactos que hay en la señal. Al usar una ventana de longitud infinita, se obtendría la FT, la cual da una perfecta resolución frecuencial pero no información temporal.

Es posible analizar cualquier señal usando un enfoque diferente mediante la Transformada Wavelet (WT), la cual analiza la señal a distintas frecuencias con diferentes resoluciones en contraposición de la STFT, en la que cada componente espectral no es analizada con la misma resolución.

3.2.3 Transformada Wavelet. La transformada wavelet (WT), es una herramienta matemática que ha cobrado una gran importancia gracias a sus aplicaciones en el campo de la visión artificial y de la compresión de señales. La idea fundamental del procesamiento mediante esta herramienta, no difiere conceptualmente de otros tipos de procesamiento más clásicos como los basados en la transformada de Fourier o el filtrado pasabanda y otros más recientes como la distribución de Wigner-Ville.

El objetivo de la WT es descomponer una señal en componentes denominadas *wavelet*, que forman una base del espacio de funciones, con algunas propiedades como ortogonalidad, tamaño, suavidad, duración, etc. Según su comportamiento, este método sería una ampliación de la FT, donde se

descomponen la señal a estudiar en señales sinusoidales. En el caso de las wavelet se trabaja a partir de funciones más complejas, en las cuales varía su posición y escala temporal. La transformada Wavelet fue diseñada originalmente para estudiar señales no estacionarias, esta es capaz de revelar aspectos de los datos como tendencias, puntos de quiebre, discontinuidades en las derivadas, y auto-similaridad. El análisis de wavelets puede muchas veces comprimir o eliminar ruido sin degradación apreciable.

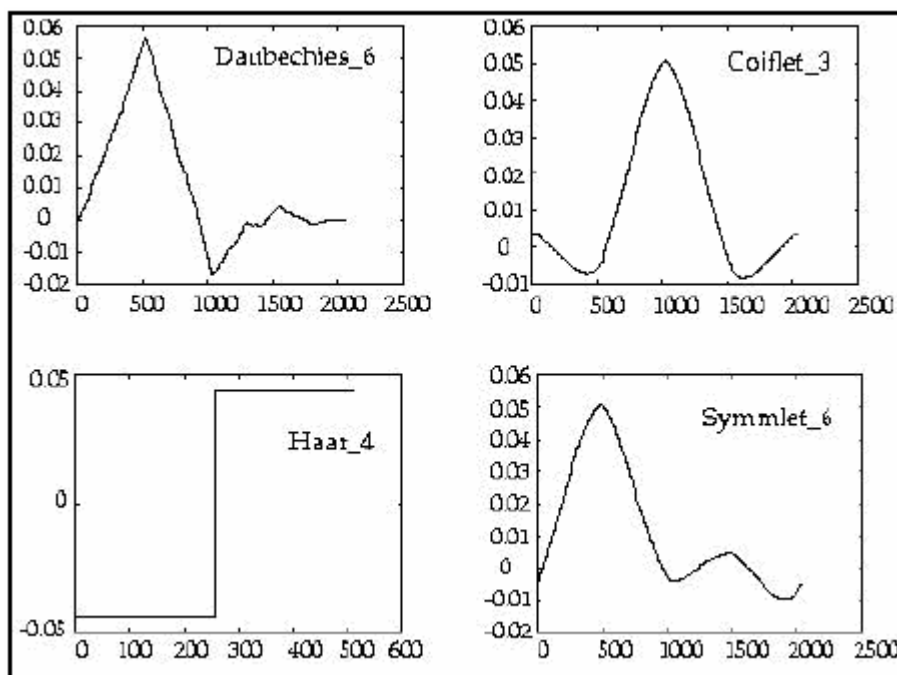
La WT ofrece buena resolución temporal y baja resolución frecuencial a altas frecuencias y por el contrario tiene buena resolución frecuencial y baja resolución temporal en bajas frecuencias. Este funcionamiento tiene sentido cuando la señal a analizar tiene componentes de alta frecuencia de corta duración y componentes de baja frecuencia de larga duración.

Hay dos diferencias principales entre la WT y la STFT:

- La TF de las señales no es calculada
- La anchura de la ventana se cambia conforme la transformada se calcula para cada componente espectral.

El termino wavelet indica que la función de enventanado es de longitud finita. El termino onda hace referencia al carácter oscilatorio de la función. Cuando se hace referencia al término 'madre', se está indicando el hecho de que las funciones usadas, con diferente zona de acción, derivan de una función principal, es decir, la *Wavelet* madre es un prototipo a partir del cual se generan el resto de funciones de enventanado. Como ejemplo se muestran en la figura 22 algunas *Wavelet* madre, definidas según un eje de tiempo continuo, donde el número indica la cantidad de momentos nulos.

Figura 22. Algunas wavelets madre de las más usadas en la práctica



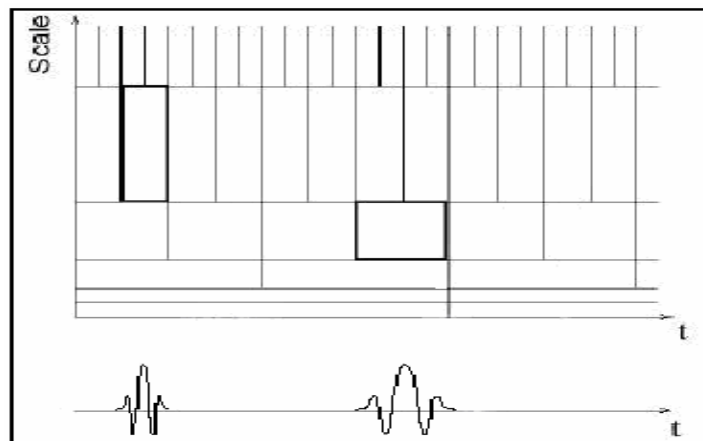
CUESTA FRAU D. estudio de Métodos para Procesamiento y Agrupación de Señales Electrocardiográficas. Universidad Politécnica de Valencia, Tesis Doctoral. Septiembre 2001

En el caso de la WT, el término traslación se usa en el mismo sentido que en el caso de la STFT, donde este término se relaciona con la posición exacta de la ventana, ya que esta se desplaza a lo largo de la señal, por tanto la traslación corresponde a la información temporal en el dominio transformado. Por el contrario, no se dispone de un parámetro de frecuencia, tal como ocurría en la STFT, sino que se tiene un parámetro de escala a . El escalado es una operación matemática que dilata o comprime una señal. Las escalas más pequeñas corresponden a señales dilatadas, y las grandes a señales comprimidas. Sin embargo, debido a la presencia de este término en el denominador, el efecto que se produce es el opuesto al que su nombre indica.

La relación entre la escala y la frecuencia consiste en que las escalas menores corresponden a altas frecuencias y las escalas mayores corresponden a bajas

frecuencias. Debido a que la WT incluye información relacionada con el tiempo y la frecuencia, la representación gráfica de esta transformada se realiza en un plano denominado plano tiempo-escala, representado en la figura 23, donde se puede apreciar que la buena resolución temporal depende del estrechamiento (escala baja) de la *Wavelet* madre, representada en el eje inferior, con lo que se pierde resolución en la frecuencia. Si la *Wavelet* madre se ensancha (escala alta), se pierde resolución en el tiempo, pero se gana en la frecuencia. Así, variando la anchura de la wavelet madre y desplazándola por el eje temporal, se calcularía el valor correspondiente a cada celda.

Figura 23. Operaciones básicas de escalado y traslación



CUESTA FRAU D. Estudio de Métodos par Procesamiento y Agrupación de Señales Electrocardiográficas. Universidad Politécnica de Valencia, Tesis Doctoral. Septiembre 2001.

Cada celda en esta figura representa un valor de la WT en dicho plano. Es de destacar el hecho que estas celdas tienen un área no nula, lo cual indica que no es posible conocer el valor de un punto particular. Sin tener en cuenta las dimensiones de las celdas, sus áreas, tanto en la STFT como en la WT, son las mismas, y están determinadas por el principio de incertidumbre de *Heisenberg*. En concreto, el área de cada celda se fija mediante la función de inventanado temporal en la STFT o por la *Wavelet* madre en la CWT (Transformada Wavelet Continua), con lo que diferentes ventanas o funciones madre dan lugar

a diferentes áreas. Sin embargo, todas las áreas tienen una cota inferior dada por $\pi/4$.

Existen tres tipos de transformada *Wavelet*: continua (CWT), semidiscreta (SMT) y discreta (DWT). La diferencia entre ellas radica principalmente en la forma en que los parámetros de desplazamiento y escala son discretizados.

- **Transformada Continua Wavelet.** La Transformada continua wavelet pretende expresar una señal $x(t)$ continua en el tiempo, mediante una expansión de coeficientes proporcionales al producto interno entre la señal y diferentes versiones escaladas y trasladadas de una función prototipo llamada wavelet madre. La ecuación matemática que describe la WT continua es (4):

$$C(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (4)$$

donde

$$\psi_{a,b}(t) = a^{1/2}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (5)$$

es una función de enventanado denominada Wavelet madre, siendo a un parámetro de escala y b de traslación. $C(a,b)$ son los coeficientes de $f(t)$ en el espacio de funciones definido por $\Psi(t)$. En la tabla 1 se muestran estas transformaciones, apreciando que la transformada finalmente aplicada corresponde a la combinación de las dos primeras, traslación y cambio de escala.

Tabla 1. Transformaciones básicas aplicadas al cálculo de la WT.

Traslación	Cambio de escala	Traslación y cambio de escala
$\psi(t - b)$	$\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t}{a}\right)$	$\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t - b}{a}\right)$

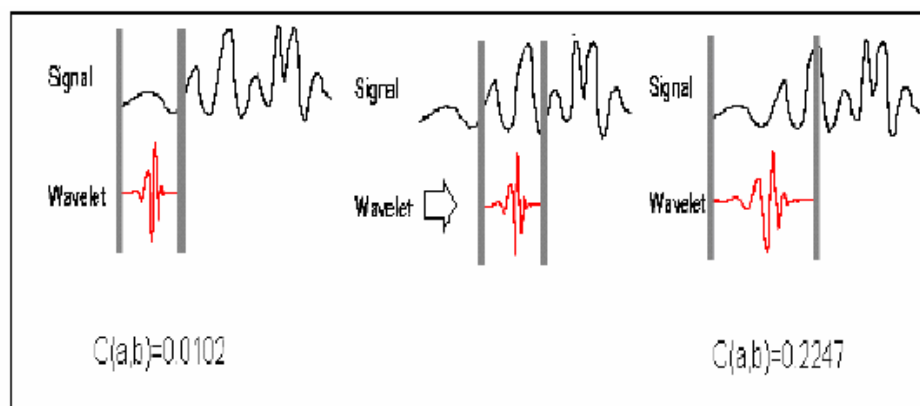
CUESTA FRAU D. Estudio de Métodos par Procesamiento y Agrupación de Señales Electrocardiográficas. Universidad Politécnica de Valencia, Tesis Doctoral. Septiembre 2001.

Puede verse que la CWT, al contrario de la STFT, permite una reconstrucción ideal de la señal, sin ninguna imprecisión, a partir de los coeficientes de la transformada. Este proceso de la CWT se puede detallar en cuatro pasos:

1. Tomar una *Wavelet* madre.
2. Dados dos valores a y b , calcular un coeficiente $C(a,b)$ mediante las ecuaciones 4 y 5, el cual represente la correlación entre la *Wavelet* y la sección de la señal bajo análisis. Cuanto mayor sea ésta, mayor es la similitud, con lo cual es interesante resaltar que los resultados dependerán por tanto de la forma de la *Wavelet*.
3. Desplazar la *Wavelet* en el sentido positivo del eje temporal, y repetir los pasos anteriores hasta que se haya cubierto la totalidad de la señal.
4. Escalar la *Wavelet* en el tiempo, y repetir los pasos 1 a 3.

Desde un punto de vista instintivo, la CWT consiste en calcular un índice de aproximación entre la señal que está siendo analizada y la *Wavelet*, tal como se muestra en la Figura 24, donde se toma la *Wavelet* y se calcula su correlación con cierta sección de la señal. Se desplaza en el eje temporal y se calcula la correlación con la siguiente sección. Al terminar se escala la *wavelet* y se repite el proceso.

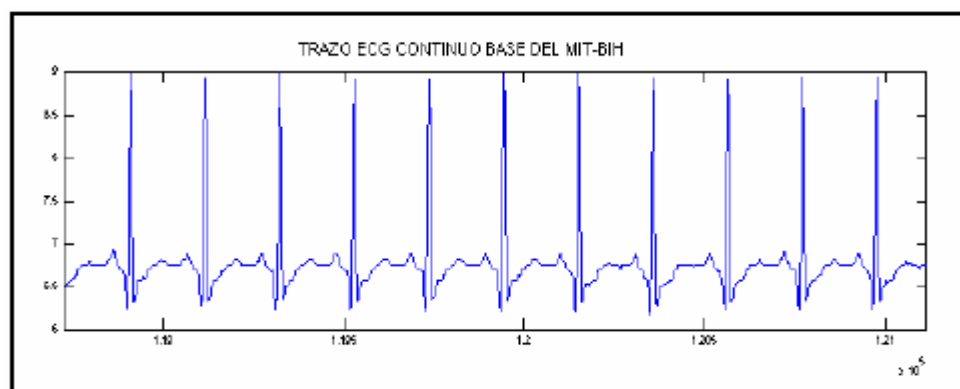
Figura 24. Funcionamiento de la CWT



CUESTA FRAU D. Estudio de Métodos para Procesamiento y Agrupación de Señales Electrocardiográficas. Universidad Politécnica de Valencia. Tesis Doctoral. Septiembre 2001.

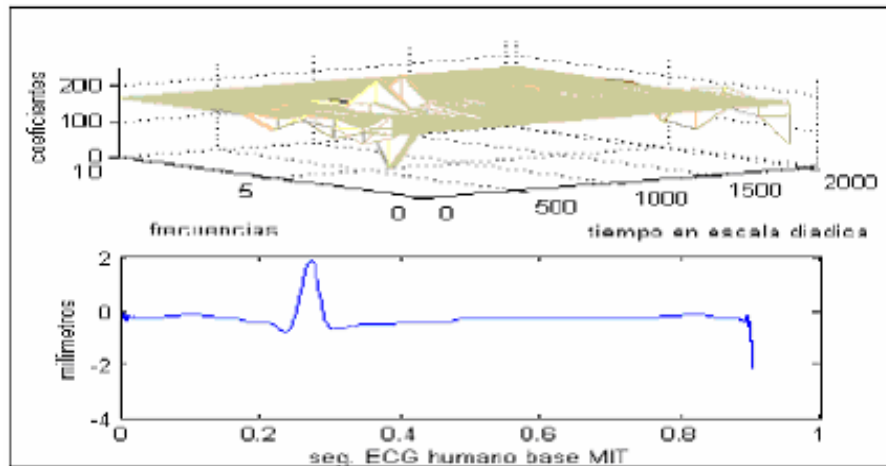
Como ejemplo de la CWT, se presenta una señal electrocardiográfica humana, Figura 25, a la cual se aplica la CWT y los resultados se observan en la figura 26.

Figura 25: Señal electrocardiográfica cuya CWT se desea calcular



ANDREA DEL PILAR ROSAS HERREÑO, RICARDO AYALA MANTILLA. Interfaz gráfica para la obtención de patrones ecg e hipótesis del vector de despolarización del corazón de una ballena jorobada adulta mediante el tratamiento de imagen y señal en un entorno comparativo con el ser humano.

Figura 26. Representación tridimensional del valor de los coeficientes calculados aplicando la CWT a la señal de la figura 25.



ANDREA DEL PILAR ROSAS HERREÑO, RICARDO AYALA MANTILLA. Interfaz gráfica para la obtención de patrones ecg e hipótesis del vector de despolarización del corazón de una ballena jorobada adulta mediante el tratamiento de imagen y señal en un entorno comparativo con el ser humano.

Los valores máximos en el tiempo corresponden a los puntos en los cuales aparece la onda R. En la frecuencia, los valores cambian según el instante de tiempo en el que se encuentre.

- **TRANSFORMADA WAVELET SEMIDISCRETA**

Es conveniente considerar la WT en algunos valores discretos desde a y τ . Por ejemplo la escala diádica [15] corresponde a la definición de los parámetros $a=2^i$ y $\tau = 2^j k$, con $(j,k) \in \mathbb{Z}^2$, denominándose Transformada Wavelet Semidiscreta (SWT).

$$A \|f\|^2 \leq \sum |\langle f, \psi(a, \tau) \rangle|^2 \leq B \|f\|^2 \quad (6)$$

Donde A y B son constantes positivas y $f(t)$ sigue siendo una función continua.

- **TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA**

Sirve para agilizar el proceso, sin tanta memoria requerida, y además se ha encontrado que la eficiencia se puede mantener utilizando escalas diádicas (escalas y posiciones en potencias de 2) [18]. Una manera de implementar la DWT es utilizando filtros, lo que lleva a la transformada rápida de wavelets.

Sea la señal a analizar $f[n]$ una función discreta. En este caso la transformada Wavelet de esta señal viene dada por

$$C[j, k] = \sum_{n \in \mathbb{Z}} f[n] \psi_{j,k}[n] \quad (7)$$

donde $\psi_{j,k}$ es una wavelet discreta definida como:

$$\psi_{j,k}[n] = 2^{-j/2} \psi[2^{-j}n - k] \quad (8)$$

Los parámetros a , b están definidos según la escala diádica, de manera que $a = 2^j$, $b = 2^j k$, con la diferencia respecto a SWT que la señal bajo análisis es discreta. La transformada inversa se define de forma similar como:

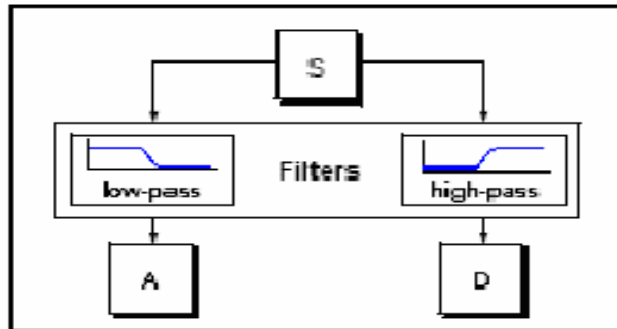
$$f[n] = \sum_{j \in \mathbb{Z}} \sum_{k \in \mathbb{Z}} C[j, k] \psi_{j,k}[n] \quad (9)$$

Si las constantes indicadas en la ecuación 6 son $A=B=1$, entonces la transformada es ortogonal.

Para muchas señales, el contenido de baja frecuencia es la parte más importante, estos dan la identidad a la señal. Mientras que el contenido de alta frecuencia, imparte matiz. En el análisis con DWT, se habla de coeficientes de aproximación y de detalle; los coeficientes de aproximación son los componentes de baja frecuencia de la señal, por

otra parte los coeficientes de detalle son los componentes de alta frecuencia de la señal. En general el proceso de filtrado o descomposición de una señal, se puede apreciar en la figura 27.

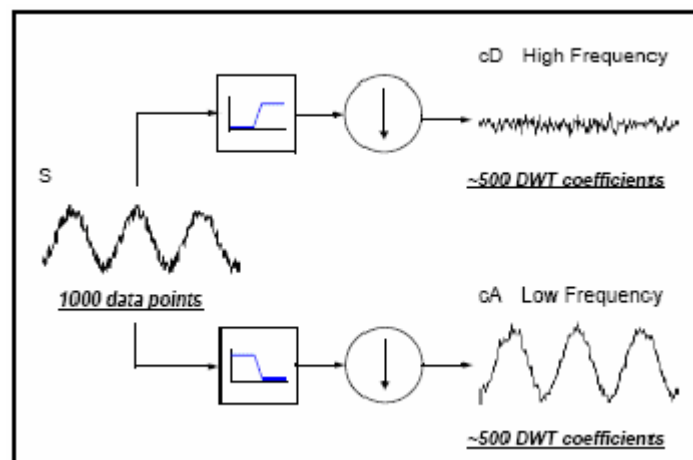
Figure 27. Filtrado o descomposición de una señal



WAVELET TOOLBOX, for use with matlab. The Mathworks, Inc. 2002. Matlab pdf Documentations. www.mathworks.com

La señal original S , pasa por dos filtros complementarios y emerge como dos señales. Desafortunadamente si se realiza esta operación en una señal digital real, se tendría al final del proceso dos veces la cantidad de datos con la que se inicio. Existe una forma más sutil para llevar a cabo la descomposición mediante DWT, usando la técnica de 'downsampling' se producen dos secuencias llamadas cA y cD , coeficientes de aproximación y coeficientes de detalles respectivamente. [22]

Figura 28. Esquema con una señal real, aplicando el downsampling



WAVELET TOOLBOX, for use with matlab. The Mathworks, Inc. 2002. Matlab pdf Documentations. www.mathworks.com

3.3. ANÁLISIS MULTIRESOLUCIÓN Y ALGORITMO DWT RÁPIDO

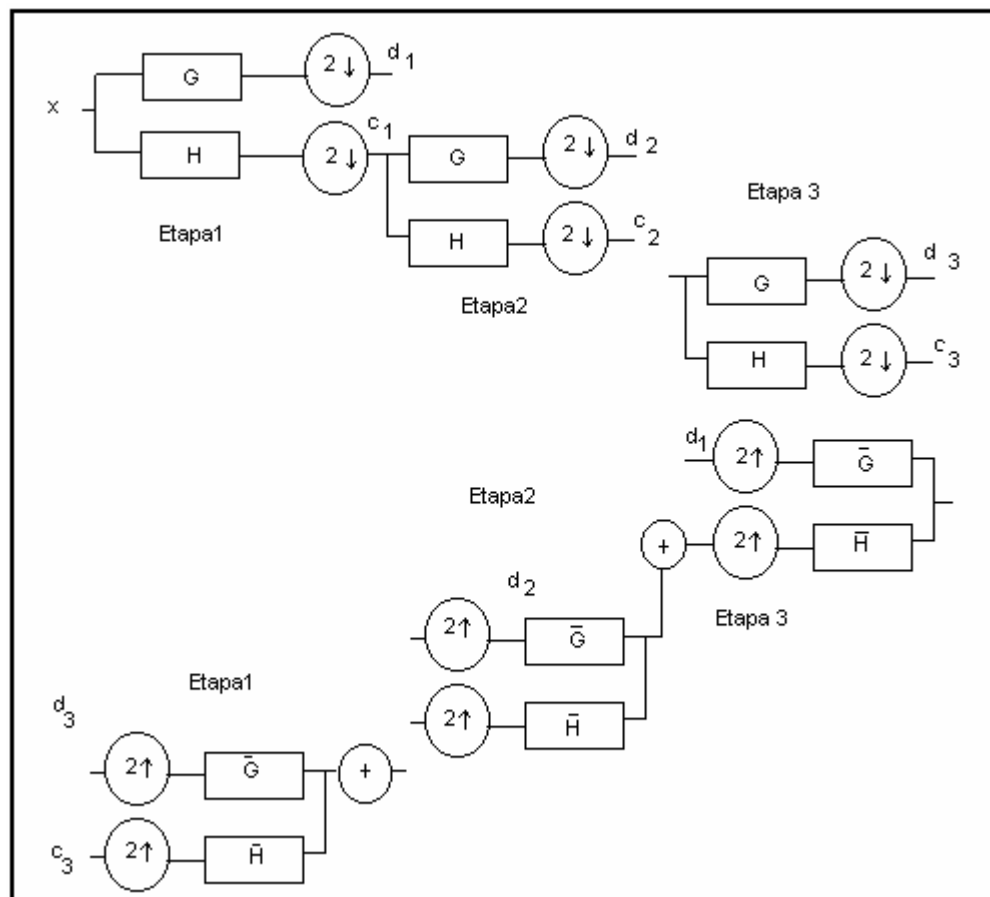
El análisis de multiresolución o algoritmo piramidal fue desarrollado con el fin de descomponer señales de tiempo discreto. La idea principal es obtener una representación de tiempo escala de una señal discreta, en el cual se usan filtros con diferentes frecuencias de corte usados para estudiar la señal a diferentes escalas. Esta señal pasa por filtros pasa altos para analizar sus componentes de altas frecuencias, luego por filtros pasa bajos para considerar las componentes de baja frecuencia como se observa en la figura 28. Estas ejecuciones cambian la resolución de la señal y la escala cambia por medio de operaciones de interpolación y submuestreo.

El análisis multiresolución de *Mallat* [20] se relaciona con el algoritmo piramidal, en el que se incluyen filtros de espejo en cuadratura; por lo cual la representación tiempo-escala de una señal digital se consigue usando técnicas de filtrado digital. El procedimiento de descomposición inicia pasando la secuencia discreta de la señal a través de un filtro paso bajo de media banda con respuesta al impulso $h[n]$. El filtrado de la señal corresponde a la operación matemática de convolución de ésta con $h[n]$. Este filtro descarta las componentes frecuenciales ubicadas por arriba de la mitad del ancho de banda de la señal [12].

Después de ser filtrada la señal por el filtro paso bajo, la mitad de las muestras son eliminadas al seguir la regla de Nyquist, ya que esta tiene frecuencia máxima en $\pi/2$ radianes en vez de π radianes, al eliminar una de cada dos muestras, obteniendo una señal con la mitad de sus puntos originales. La escala fue doblada pero esta no es afectada por el filtrado paso bajas solo son eliminadas las frecuencias altas. Solo al submuestrear se cambiara la escala. Mientras que la resolución de la señal es afectada por el filtrado ya que esta directamente relacionada con la cantidad de información presente en la señal.

El proceso de filtrado paso bajas ha eliminado la mitad de las componentes de frecuencia, por tanto la resolución ha bajado a la mitad, sin embargo el submuestreo no afecta la resolución, ya que este filtrado hace que la mitad de estas muestras sean redundantes, y entonces estas pueden ser eliminadas sin perder información significativa. Este proceso se puede ver en la figura 29, donde se observa el uso de los filtros G y H disminuidos en 2, las etapas de reconstrucción con filtros \bar{H} y \bar{G} con la interpolación por 2, la parte superior corresponde al análisis con H siendo el filtro paso bajo y G el filtro paso alto, mientras que la inferior es la de síntesis. [16], [17]

Figura 29. Algoritmo piramidal.



Esta es la forma mas compacta de describir el proceso para hallar los coeficientes Wavelet, así para una secuencia $f[n]$ que representa la señal discreta que será descompuesta, los operadores H y G se definen según las expresiones siguientes:

$$(Kf)_k = \sum h[n-2k]f[n] \quad (10)$$

$$(Gf)_k = \sum g[n-2k]f[n] \quad (11)$$

Aquí esta representado el filtrado de la señal mediante los filtros digitales $h[n]$, $g[n]$. El factor $2k$ es el submuestreo.

Estos operadores H y G son un paso en la descomposición Wavelet. Es así como la DWT será:

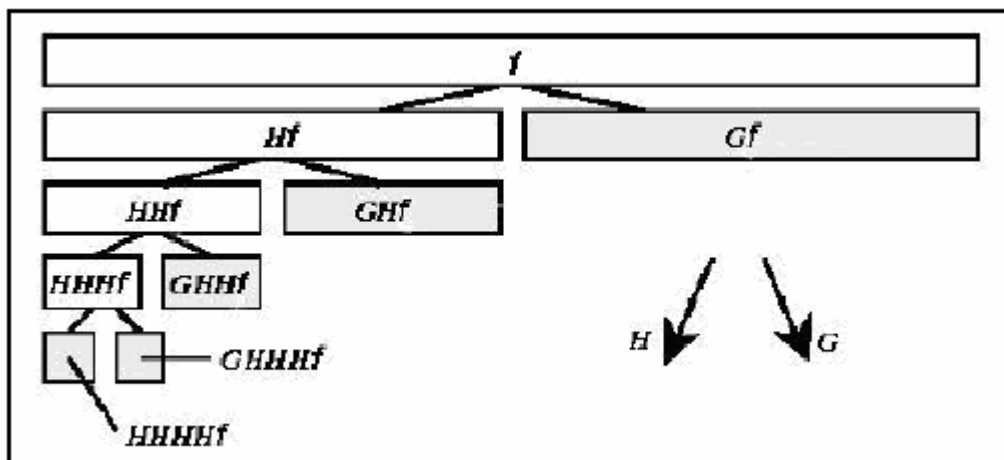
$$f \rightarrow (Gf, GHf, GH^2 f, \dots, GH^{j-1} f, H^j f) = (d^{(j-1)}, d^{(j-2)}, \dots, d^{(1)}, d^{(0)}, c^{(0)}) \quad (12)$$

donde $d^{(j-1)}, d^{(j-1)}, d^{(j-2)}, \dots, d^{(1)}, d^{(0)}$ se denomina coeficientes del detalle y $c^{(0)}$ coeficiente de la aproximación. Y los detalles y aproximaciones se obtienen iterativamente así :

$$c^{(j-1)} = Hc^{(j)}, d^{(j-1)} = Gd^{(j)} \quad (13)$$

Como se puede apreciar en la figura 15, en cada nivel la señal de entrada pasa por los filtros H y G. El resultado de este ultimo filtrado no es reexaminado, constituyendo los detalles del nivel de descomposición que se aplican, y el resultado del filtrado paso bajo se puede seguir descomponiendo, de manera que constituye la aproximación de la señal a cierto nivel.

Figura 30. Descomposición Wavelet usando la notación de operadores.



CUESTA FRAU D. Estudio de Métodos para Procesamiento y Agrupación de Señales Electrocardiográficas. Universidad Politécnica de Valencia. Tesis Doctoral. Septiembre 2001.

El proceso en el que se reconstruye la señal es semejante al de descomposición. La señal en cada etapa es multiplicada por dos, pasa por dos filtros de síntesis \bar{H} y \bar{G} , luego las salidas respectivas se suman, y estos operadores se definen como:

$$(\bar{H}f)_n = \sum h[n-2k]f[n] \quad (14)$$

$$(\bar{G}f)_n = \sum_k g[n-2k]f[n] \quad (15)$$

su aplicación recursivamente produce a:

$$f = \sum_{j=0}^{n-1} (\bar{H})^j \bar{G}d^{(j)} + (\bar{H})^n c^{(0)} \quad (16)$$

donde

$$D_j = (\bar{H})^j \bar{G}d^{(j)}, \text{ y} \\ C = (\bar{H})^n c^{(0)} \quad (17)$$

y D_j son los coeficientes detalle y C son los coeficientes de aproximación.

3.4. WAVELET DAUBECHIES dbN

Esta es una familia Wavelet ortogonal, con soporte compacto, es no simétrica. Estas funciones generan un nuevo análisis multiresolución (MRA), a partir de funciones de escalamiento con soporte compacto ortonormales, donde sus símbolos de doble escala presentan la siguiente forma:

$$\left(\frac{1+z}{2}\right)^m \quad (18)$$

Donde se tiene que considerar la doble escala de la siguiente manera:

$$P(z) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^N p_n z^n = \left(\frac{1+z}{2}\right)^m S(z) \quad (19)$$

con: $S(z)$ polinomios de orden $N-m$

$S(1)=1$, donde $S(z)$ es un filtro paso bajos y asegura que todo el conjunto $P(1)=1$.

$S(-1) \neq 0$ evita aumentar la multiplicidad de la raíz en -1

En general para las Daubechies, la relación doble escala es:

$$\phi_{D,m}(t) = \sum_{k=0}^N p_k \phi_{D,m}(2t-k) \quad (20)$$

y su correspondiente Wavelet daubechie esta dada por:

$$\psi_{D,m}(t) = \sum_{k=-N+1}^1 (-1)^k p_{l-k} \phi_{d,m}(2t-k) \quad (21)$$

Entonces se obtiene $P(z)$, y $\phi_{D,m}(t)$ y $\psi_{D,m}(t)$, la dificultad es establecer el factor $S(z)$. De la relación de doble escala y llevándola al espacio de Fourier:

$$\phi_{d,m}(\omega) = P(z)\hat{\phi}_{D,m}\left(\frac{\omega}{2}\right) \quad (22) \quad \text{con } z = e^{-j\omega/2}$$

como y $\phi_{D,m}(t)$ es una función de escalamiento ortonormal, debe cumplir:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \left| \phi_{D,m}(\omega - 2\pi k) \right|^2 = 1 \quad \forall \omega \quad (23)$$

Esta condición de ortonormalidad sobre ϕ es posible llevarla a los $P(z)$ así: Aplicando la condición de ortonormalidad (23), y la relación doble escala (22), entonces:

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \left| \hat{\phi}_{D,m}(\omega - 2\pi k) \right|^2 = \sum \left| P(-1)^k z \right|^2 \left| \hat{\phi}_{D,m}\left(\left(\frac{\omega}{2}\right) + \pi k\right) \right|^2 \quad (24)$$

donde la sumatoria de la derecha se separa para los índices k pares e impares

$$\sum_{k=-\infty}^{\infty} \left| \hat{\phi}_{D,m}(\omega - 2\pi k) \right|^2 = \sum_{k_{\text{par}}} \left| \hat{\phi}_{D,m}\left(\frac{\omega}{2} + \pi k\right) \right|^2 + \left| P(-z) \right|^2 \sum_{k_{\text{impar}}} \left| \hat{\phi}_{D,m}\left(\frac{\omega}{2} + \pi k\right) \right|^2 \quad (25)$$

aplicando la condición de ortonormalidad, las sumatorias dan uno y la condición (23) sobre ϕ pasa a $P(z)$ ó sea:

$$\left| P(z) \right|^2 + \left| P(-z) \right|^2 = 1 \quad (26)$$

para que la función de escalamiento sea ortonormal

luego usando cambio de variables se obtiene:

$$x = \frac{1 - \cos\left(\frac{\omega}{2}\right)}{2} = \text{sen}^2\left(\frac{\omega}{4}\right) \quad (27)$$

y con:

$$f(x) = \left| S\left(e^{\frac{-j\omega}{2}}\right) \right|^2 \quad (28)$$

teniendo en cuenta (23) y (30) se tiene:

$$\left| \left(\frac{1+Z}{2}\right)^m \right|^2 |S(z)|^2 + \left| \left(\frac{1-z}{2}\right)^m \right|^2 + |s(-z)|^2 = 1 \quad (29)$$

luego $(1-x)^m f(x) + x^m f(1-x) = 1$ (30) despejando luego $f(x)$

$f(x) = (1-x)^{-m} \{1 - x^m f(1-x)\}$ (31) la función $f(x)$ refleja el desarrollo para $S(z)$. Para resolver $f(x)$ se debe tener en cuenta que la ecuación (31) se puede ampliar por el teorema del binomio:

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{m+k+1}{k} x^k \{1 - x^m f(1-x)\} \quad (32) \quad \text{ó}$$

$$f(x) = \sum_{k=0}^{m-1} \binom{m+k+1}{k} x^k \quad (33)$$

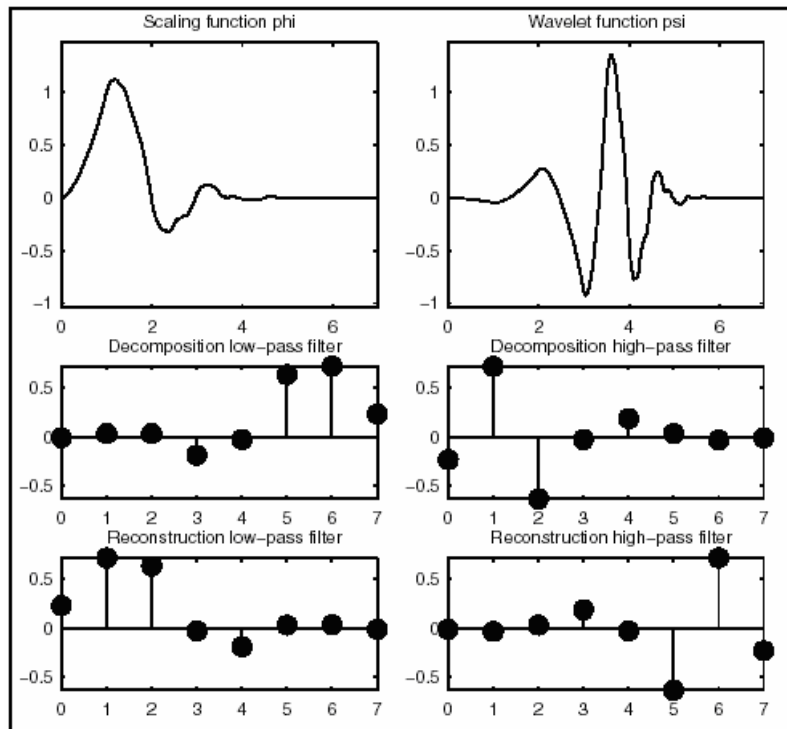
donde $f_o(x) = \sum_{k=0}^{m-1} \binom{m+k+1}{k} x^k$ (34) satisface la ecuación (30) y usando (27) y (34).

$$\left| s\left(e^{\frac{-j\omega}{2}}\right) \right|^2 = \sum_{k=0}^{m-1} \binom{m+k+1}{k} \text{sen}^{2k}\left(\frac{\omega}{4}\right) \quad (35)$$

Esta ecuación presenta el desarrollo para $\left| S(e^{-j\omega/2}) \right|^2$ donde es posible encontrar $S(e^{-j\omega/2})$ y así usando (19) determinar el símbolo doble escala que identifica las Wavelet Daubechies.

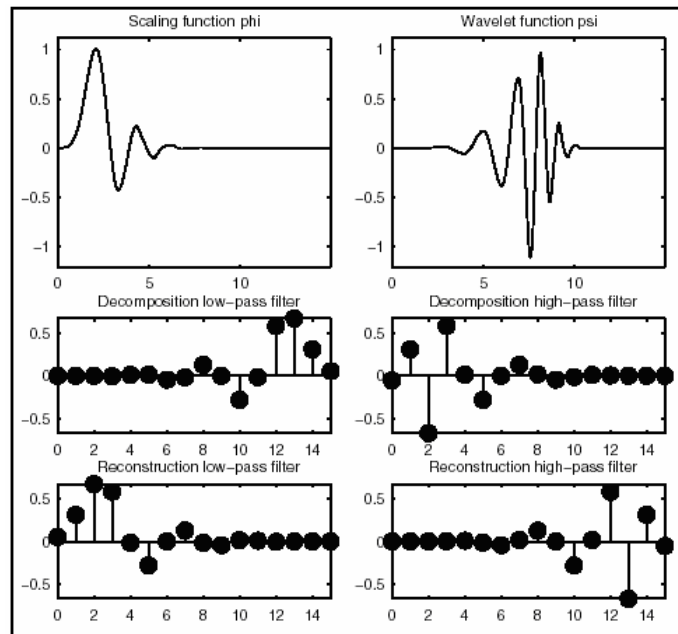
En la Figura 31 y 32 se presentan ejemplos de Daubechies.

Figura 31. Daubechies Wavelet db4



WAVELET TOOLBOX, for use with matlab. The Mathworks, Inc. 2002. Matlab pdf Documentations. www.mathworks.com

Figura 32. Daubechies Wavelets db8



WAVELET TOOLBOX, for use with matlab. The Mathworks, Inc. 2002. Matlab pdf Documentations. www.mathworks.com

4. FILTRADO DE LOS CANTOS DE LA BALLENA

El interés por el estudio de grabaciones submarinas en las que se escuchan “cliks” que en principio no tenían explicación, nació en 1951, donde después de varios estudios se estableció que estos sonidos eran emitidos por un Cachalote (**Globicephala Macrorhyncus**), de la misma manera se pudo establecer que la ballena azul emite entre 12 y 14 notas diferentes en una gama de frecuencias de 12.5 a 200 Hz; sin embargo dentro de todos los cetáceos, la ballena jorobada (**Megaptera Novaeangliae**) es quien produce mayor cantidad de sonidos abarcando desde muy bajas hasta muy altas frecuencias.

A partir de estas investigaciones se plantearon especulaciones teóricas que permitían asumir que dentro de las grabaciones que se hicieran de los cantos de las ballenas, podían quedar registrados los sonidos producidos por el funcionamiento del corazón [37], siendo estos cantos las señales iniciales para este proyecto, se plantea principiar el trabajo con el proceso de filtrado de las mismas con el fin de obtener los posibles sonidos cardiacos del cetáceo y continuar con su análisis, entendiendo que este proceso “resulta del interés de cambiar las amplitudes relativas de las componentes de frecuencia en una señal, o quizás eliminar por completo algunas componentes de frecuencia”¹.

4.1 INFORMACIÓN GENERAL DE LOS CANTOS

Teniendo en cuenta que los cantos fueron producidos y grabados bajo el mar, se presenta información general sobre la propagación del sonido en este medio.

1. Tomado de OPPENHEIM Alan V., WILLISKY Alan S., “Signals and Systems”, Prentice Hall. Inc,segunda Edition, 1998.

La velocidad de propagación del sonido en el mar es afectada por la temperatura, la salinidad, las estaciones del año y la posición geográfica. El principal factor es la temperatura, la cual hace variar la velocidad del sonido bajo el agua en 3.2 m/s por grado centígrado de variación en esta, también la profundidad afecta la velocidad del sonido haciéndola variar 1.7 m/s por cada 100 metros de profundidad. La salinidad cobra importancia en áreas en donde tiene incidencia significativa como en la desembocadura de los ríos, sectores de alta evaporación y precipitación; el efecto de la presión es notorio a grandes profundidades donde la salinidad y la temperatura son casi constantes. [37]

Ya que el punto de interés de este trabajo son los sonidos cardiacos de una ballena jorobada es necesario usar receptores artificiales de sonido para poder oír bajo el agua, es importante aclarar que los sonidos captados por estos receptores son innumerables y que el poder distinguirlos e interpretarlos han dado base a lo que se conoce como la ciencia del sonar, que no es otra cosa que un arreglo de hidrófonos que son conectados en paralelo permitiendo escuchar los ruidos que se producen y transmiten bajo el mar; un hidrófono es un transductor acústico que convierte las variaciones de presión en impulsos eléctricos.

Algunas consideraciones a tener en cuenta respecto al momento del registro de los cantos son:

- ✓ La propulsión del submarino con el que se grabaron los cantos del cetáceo (que fue usado en la investigación del Dr. Jorge Reynolds) es eléctrica y su fuente de energía la constituyen “cuatro” grupos de baterías de 120 elementos cada uno, para la carga de estas baterías los submarinos cuentan con “cuatro” motores Diesel a los que se acoplan generadores de corriente continua. Lo anterior muestra que la alimentación de los circuitos del submarino y los equipos usados para la grabación de las señales es de continua, por lo cual no se espera ruido de la fuente de alimentación.

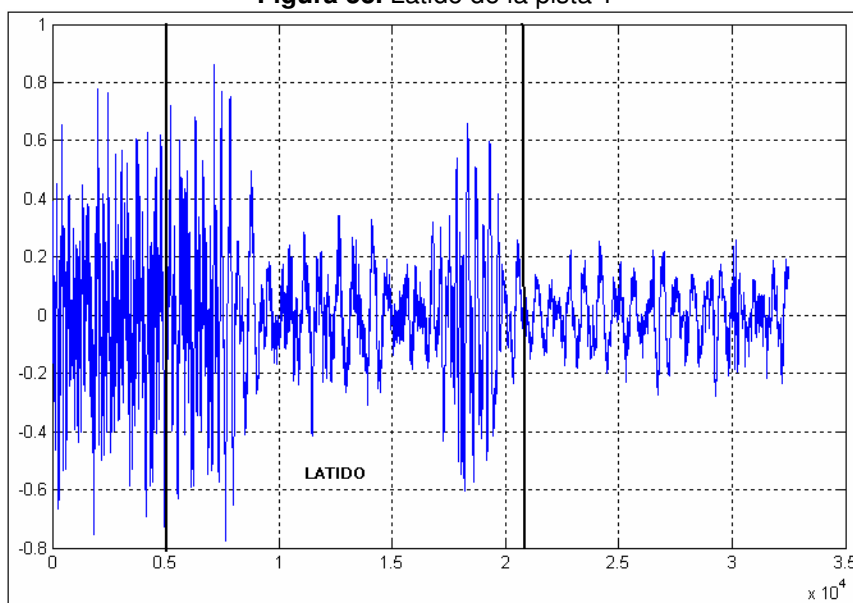
- ✓ Las ballenas se encontraban a diferentes distancias del submarino por lo cual los sonidos que se escuchan poseen cada uno diferente intensidad.
- ✓ Las señales registradas pertenecen a cantos de varias ballenas, por lo cual es de esperarse que puedan existir en la señal, eventos cardiacos de diferentes ejemplares, lo cual dificulta la identificación de cada latido.

Ya que el corazón del cetáceo produce sonidos en el rango de las bajas frecuencias debido a sus características físicas, se hace necesario realizar el filtrado de las frecuencias altas que conforman los cantos; en estudios anteriores, realizado por el Dr. Jorge Reynolds la frecuencia de corte del filtrado fue de 390 HZ [ver Anexo B], “ya que si esta se continua disminuyendo, se eliminan componentes importantes del posible evento cardiaco aunque cabe anotar que se disminuyen sustancialmente los cantos audibles.”²

Teniendo en cuenta lo anterior se realizó un trabajo previo con las dos primeras pistas usando filtros FIR con el fin de obtener un punto de partida para el posterior trabajo con *wavelet*, sabiendo de antemano el comportamiento que tiene este tipo de filtros ante señales no estacionarias como las que nos atañen en este proyecto; para empezar se trabajó con la pista 1 en la que a pesar de presentar ruido, se puede apreciar un latido; la forma de onda de esta se puede observar en la figura 33.

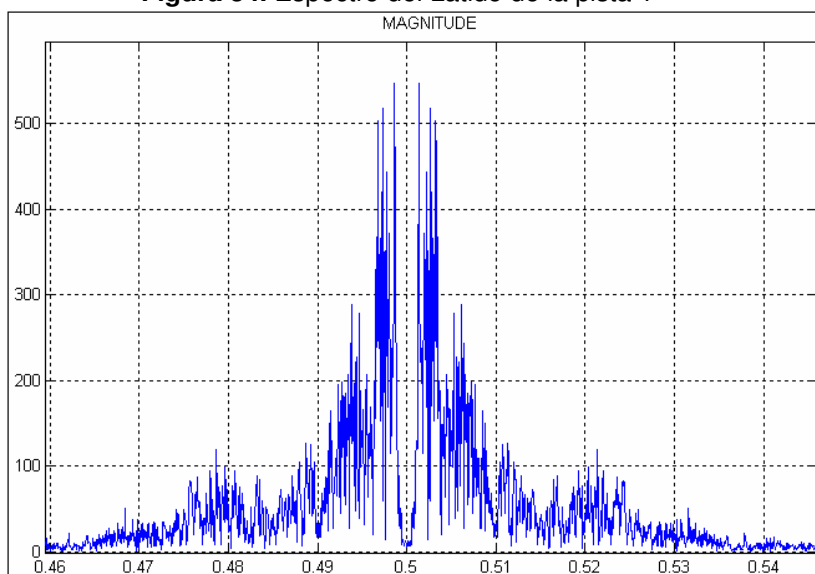
2. **JORGE REYNOLDS P, JOSE IGNACION ROZO C.** Viaje al corazón de las Ballenas. SCVS, Bogota, 1998.

Figura 33. Latido de la pista 1



El espectro del latido de la figura 33 se aprecia en la figura 34, la cual muestra que la componente de continua del latido (pista1) es igual a cero y la energía de la señal se encuentra concentrada cerca del origen; lo anterior indica que el primer paso a realizar es un filtrado pasa bajos para eliminar las componentes de altas frecuencias.

Figura 34. Espectro del Latido de la pista 1



Al espectrograma del latido extraído de la pista1 que se muestra en la figura 35, se ajusta el rango del mapa de color con los siguientes valores, valor del tope de color 31.2774 dB y valor mínimo de -155.5908 dB, anotando que este ajuste se hará para todos los espectrogramas que se usen en el procesado. Al escuchar este latido de la Pista 1 se aprecia cierto ruido que es posible eliminar, con un filtro pasa bajos con ventana *Hamming*, orden 1500 y frecuencia de corte 3690 Hz, usando la frecuencia de muestreo de 44100Hz; el resultado de este filtrado se observa en el espectrograma de la pista 1 en la figura 35, donde se distingue una disminución sustancial del ruido, escuchándose el latido aun más nítido, también se aprecia que las zonas con mayor intensidad dB (superior a los 0 dB) se encuentran desde 0 Hz hasta los 377 Hz aproximadamente; por otra parte la forma de onda se muestra con mayor definición.

Figura 35. Espectrograma Latido Pista 1

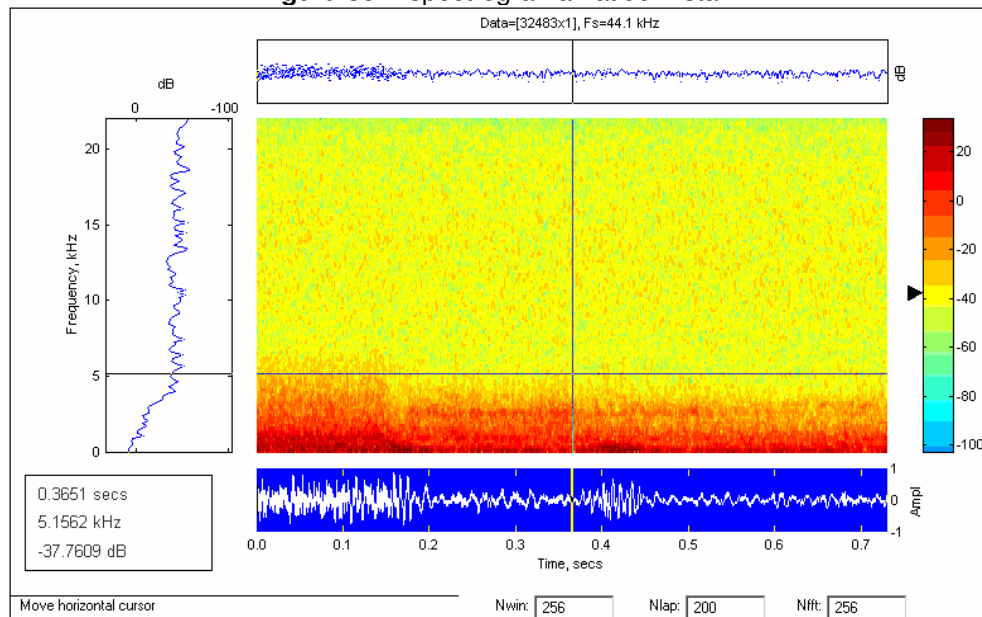
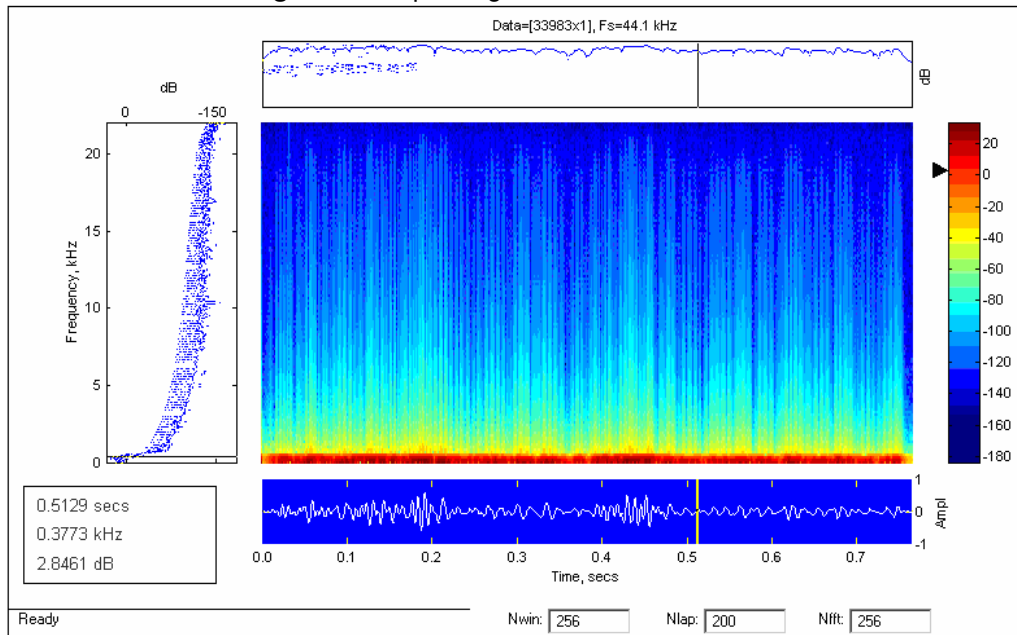
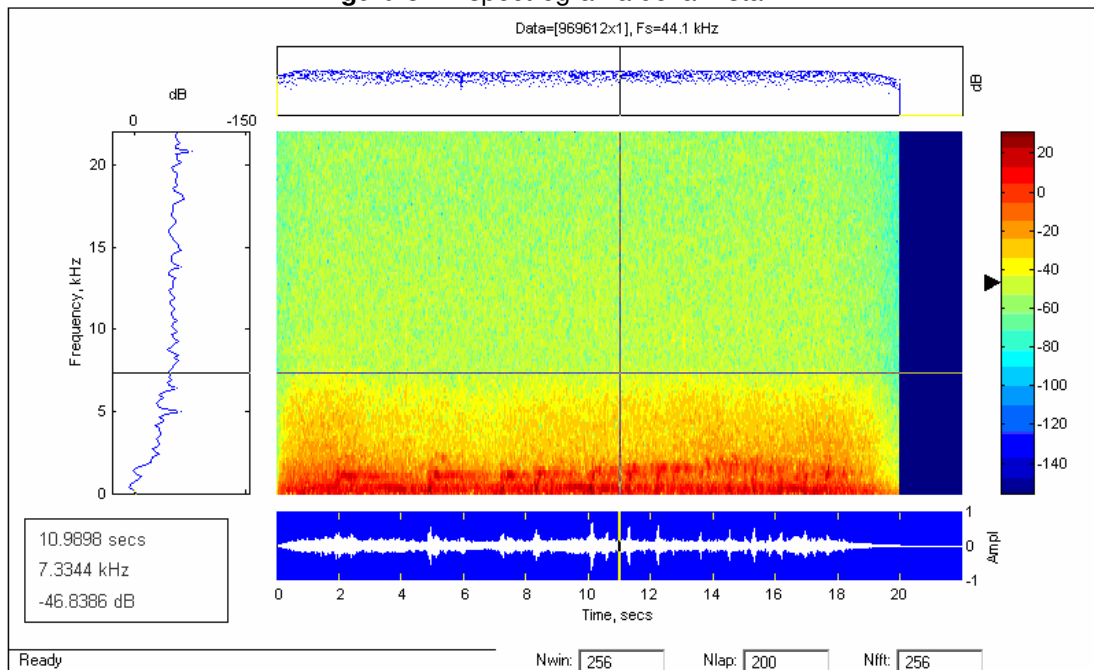


Figura 36. Espectrograma del Latido Filtrado



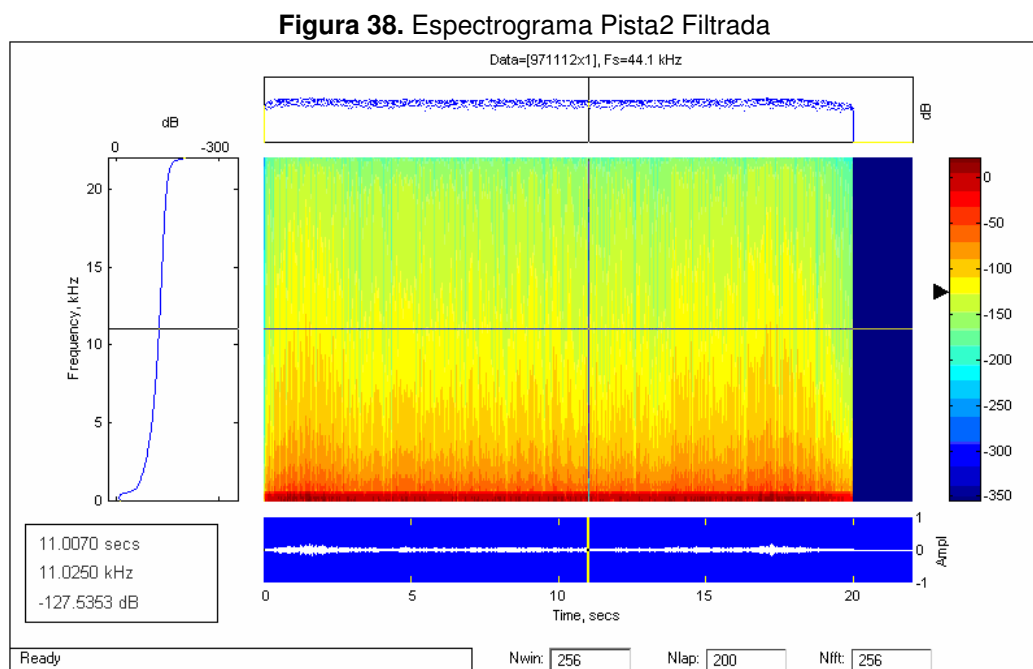
Se realiza el mismo procedimiento con la pista 2, en la cual originalmente solo se pueden apreciar cantos del animal, el espectrograma de esta pista se observa en la figura 37.

Figura 37. Espectrograma de la Pista 2



Entre los filtros que se trabajaron se encontró que los que mejor realizaban el filtrado eran el Hamming y el Hanning. Realizando el filtrado para la señal completa que contiene los cantos con la ventana Hanning, con una frecuencia de corte de 350Hz y orden 1500 se obtuvo el espectrograma de la figura 38.

Se observó que la señal aún tenía cantos de las ballenas a pesar del proceso de filtrado realizado anteriormente, por lo cual se optó por usar la Transformada Wavelet para extraer las altas frecuencias que representan los cantos, de las señales originales.



4.2 APLICACIÓN DE LA WT EN EL PROCESO DE FILTRADO.

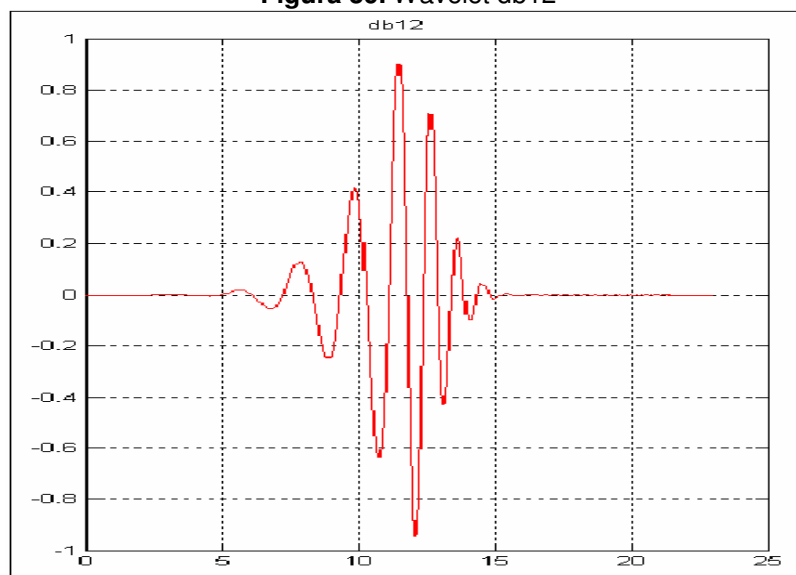
Una de las aplicaciones de la Transformada Wavelet es la de remover el ruido de una señal, para esto se necesita identificar cual componente o componentes contienen el ruido y luego reconstruir la señal sin esos componentes.

En general el procedimiento de extracción de ruido usando WT involucra tres pasos:

1. Descomposición: Se escoge una Wavelet madre, un nivel 'N' para trabajar y luego se calculan la descomposición wavelet de la señal a ese nivel.
2. Umbralizar los coeficientes de detalle: Para cada nivel desde 1 hasta N se selecciona un umbral y se aplica la umbralización.
3. Reconstrucción: Se realiza usando los coeficientes de aproximación del nivel N y los coeficientes de detalle modificados de los niveles desde 1 hasta N. [22]

4.2.1 Descomposición Multinivel. Como se menciona anteriormente en esta primera parte se debe escoger la *wavelet* con la que se trabajará, en este caso la wavelet escogida es “**db12**” que se muestra en la figura 39; ya que su forma de onda guarda algunas semejanzas con los sonidos cardiacos del hombre y los observados anteriormente en la pista 1, además su frecuencia central es de gran ayuda para determinar el nivel de descomposición (las frecuencias aproximadas de cada nivel de descomposición).

Figura 39. Wavelet db12



Para escoger el nivel de descomposición se tuvo en cuenta la frecuencia de muestreo de las señales originales la cual es de 44.1KHz, sabiendo que las bajas frecuencias son las de interés para este trabajo y luego de detallar la figura 37 donde se aprecia que la frecuencia máxima que se puede llegar a encontrar en la pista 2 que contiene cantos del animal oscila alrededor de 7.3344 KHz, se optó por asignar un nivel de descomposición N igual a 15, teniendo en cuenta las pseudo-frecuencias que con este nivel y con la wavelet escogida cada detalle puede llegar a tener aproximadamente, buscando ir desde las altas frecuencias (KHz) hasta las muy bajas frecuencias (menos de 1Hz) como se puede apreciar en la tabla 2.

Tabla 2 Valor de frecuencia para cada nivel de descomposición

NIVEL	ESCALA (2^N)	PSEUDO- FREQ “db12” (Hz)
1	2	15339
2	4	7669.6
3	8	3834.8
4	16	1917.4
5	32	958.7
6	64	479.35
7	128	239.67
8	256	119.84
9	512	59.918
10	1024	29.959
11	2048	14.98
12	4096	7.4898
13	8192	3.7449
14	16384	1.8725
15	32768	0.93623

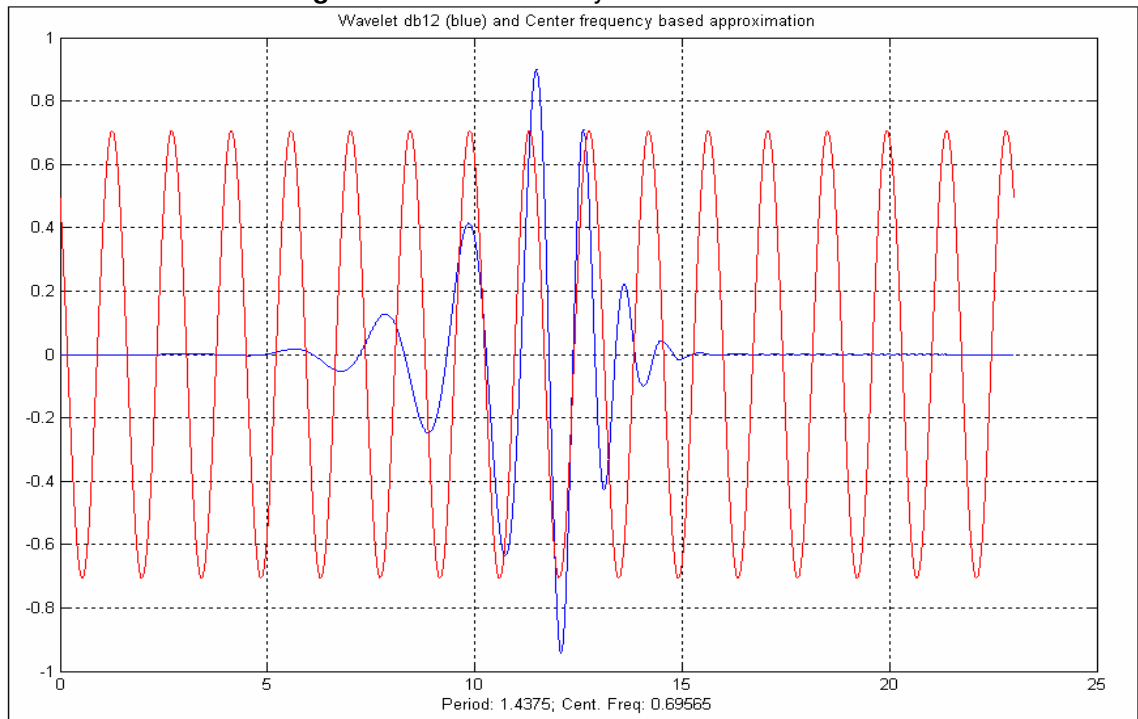
Como se mencionó en el capítulo anterior, la transformada wavelet usa la región tiempo-escala, existiendo una correspondencia o relación entre la escala wavelet y la frecuencia ⁹ aunque es mejor hablar de pseudo-frecuencia correspondiente a una escala; una forma de calcular esta pseudo-frecuencia es utilizando la siguiente relación.

$$Fa = \frac{Fc}{a * \Delta} \quad (36)$$

Donde a es un valor de escala (2^i $i=1:N$ siendo N el nivel de descomposición), Δ es el periodo de muestreo que para este caso es igual a $22.6757\mu s$, Fa es la pseudo-frecuencia en HZ correspondiente a la escala a y Fc es la frecuencia centro de la wavelet en Hz. La idea es asociar una señal puramente periódica de frecuencia Fc con una wavelet; la función “*centfrq*” en Matlab puede ser usada para calcular la frecuencia centro aproximada de una wavelet en particular, como se observa en la figura 40, esta frecuencia captura las oscilaciones principales de la wavelet; de esta manera la frecuencia centro se convierte en una caracterización conveniente de la frecuencia dominante principal de la wavelet, la cual cuando es dilatada por un factor a su frecuencia centro se convierte en Fc/a .

⁹ Ver Capítulo 3, sección 3.2.3

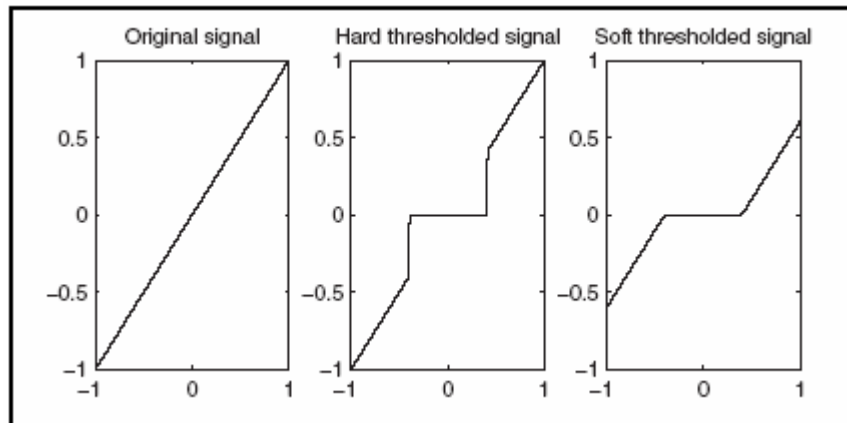
Figura 40. Wavelet db12 y su frecuencia centro



Para este caso en particular el valor de F_c es de 0.69565 Hz.

4.2.2 Umbralización. La reducción de ruido de una señal usando la transformada Wavelet tiene como idea básica eliminar los componentes obtenidos en la transformada que estén por debajo de un cierto umbral, antes de llevar a cabo la transformada inversa; cabe anotar que la umbralización se puede realizar por dos métodos 'soft-thresholding' o 'hard-thresholding' como se pueden observar en la figura 41; en el primero sólo aquellos coeficientes de detalle cuyo valor absoluto estén por debajo de cierto umbral serán eliminados, el resto de coeficientes son ponderados, mientras que en el segundo método simplemente se colocan a cero los elementos cuyo valor absoluto esté por debajo del umbral, creando discontinuidades en $x=\pm t$, mientras que en soft-thresholding no ocurre esto [22].

Figura 41. Hard and Soft Thersholding



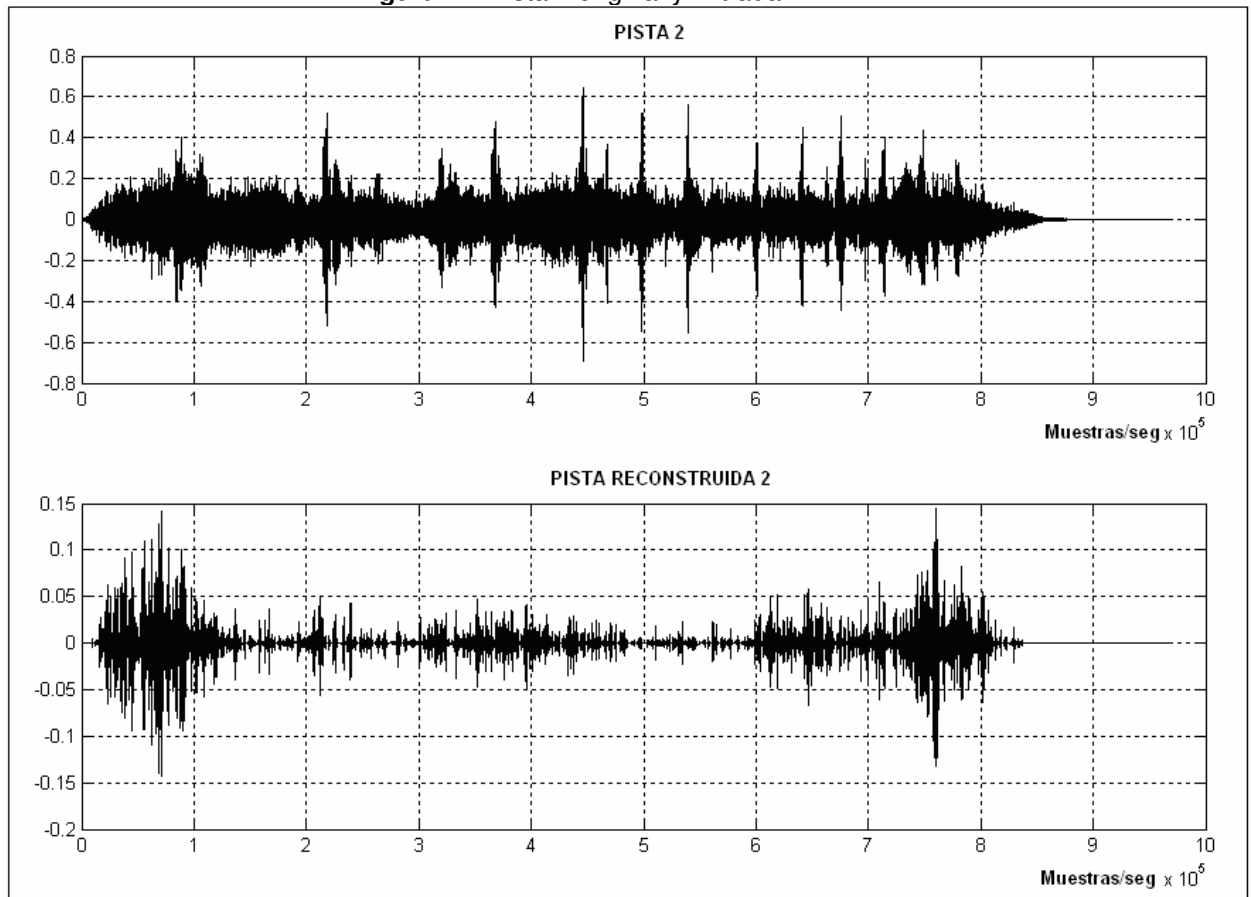
WAVELET TOOLBOX, for use with matlab. The Mathworks, Inc. 2002. Matlab pdf Documentations. www.mathworks.com

Una vez realizada la descomposición multinivel de los cantos (señales originales), se extraen los diferentes (15) niveles de detalle usando la función de Matlab “*detcoef*”, colocando cada detalle en un vector para continuar con el proceso de umbralización, luego se toma un valor de umbral para cada uno de los detalles; teniendo en cuenta los valores de las pseudo-frecuencias mostradas en la tabla 2 se asigna para los detalles nivel 1 hasta nivel 7 un valor de umbral igual al máximo valor absoluto de cada detalle; buscando eliminar los componentes de frecuencia que van desde 119.84Hz hasta 15.339KHz aproximadamente; para los detalles nivel 8, 9 y 10 se asigna un umbral de forma Heurística los cuales varían dependiendo de la pista (señal) que se este trabajando, para el resto de los detalles el valor del umbral es cero ya que no se quiere eliminar componentes de baja frecuencia que signifiquen información sobre los posibles sonidos cardiacos. Los umbrales asignados para cada detalle son almacenados en un vector para la posterior reconstrucción de la señal.

4.2.3 Reconstrucción. Una vez realizada la umbralización, el paso siguiente es la reconstrucción partiendo de los coeficientes Wavelet, la manipulación matemática que efectúa la síntesis es llamada la ‘*transformada inversa Wavelet discreta*’ (IDWT). En Matlab este proceso es posible realizarlo usando la función “*wdencmp*” para la cual se escoge la opción ‘*lvd*’ que indica que los

umbrales son diferentes para cada coeficiente de detalle y se encuentran almacenados en un vector, también se escoge la opción 's' indicando que se trabaja con umbralización suave o soft-thresholding. En la figura 42 se puede observar el antes y el después del proceso de filtrado.

Figura 42. Pista 2 original y Filtrada



El proceso de filtrado se realizó con cinco de las siete pistas dadas por el Dr. Jorge Reynolds, ya que la primera de ellas es el posible latido de la ballena obtenido en un trabajo previo y la sexta corresponde a los cantos de las ballenas mezclados con sonidos de varios instrumentos musicales, lo cual hace más complicado la obtención de los posibles sonidos cardiacos de una de estas ballenas.

Para la pista más larga como es la pista 7 de aproximadamente 135.28seg (2.254min) se hace necesario dividirla, lo cual mejora el rendimiento del equipo a la hora de ejecutar los programas y visualizar los resultados; por tal motivo se trabaja con secciones de la pista 7 las cuales tiene una longitud igual a 15seg. Para las demás pistas no se realiza esta división ya que su longitud no es lo suficientemente amplia y el equipo tiene buen rendimiento al momento de trabajar con ellas.

5. OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS POSIBLES SONIDOS CARDIACOS DE LA BALLENA JOROBADA

Una vez realizado el proceso de filtrado donde se obtiene como resultado señales en las cuales no se observa la presencia de cantos audibles del cetáceo, el paso a seguir es la extracción de los posibles sonidos cardiacos pertenecientes a la ballena, para lo cual se utiliza una técnica aplicada en la segmentación e identificación de los sonidos cardiacos humanos.

Tomando el resultado del proceso anterior, el cual recibe el nombre de pista reconstruida (RP), se realiza nuevamente una descomposición multinivel tomando como máximo nivel de descomposición el nivel 15 y utilizando la wavelet "db6". Se continua trabajando con la WT debido al buen comportamiento que presenta en el análisis de señales no-estacionarias en comparación con la transformada de Fourier [32], además, como se puede observar se cambia la complejidad de la wavelet ya que en la literatura recopilada comúnmente es con esta con la que se extraen características del fonocardiograma humano. [33]

El trabajo se realiza con un conjunto de siete pistas que contienen cantos de ballenas a las que se les realiza el proceso de filtrado pero con respecto a la pista seis no se realizó este proceso pues es una mezcla entre cantos y música instrumental.

Cada pista tiene más de 200000 datos o muestras que representan tiempo de grabación, donde la pista más corta es la primera con 311052 datos (7.05 seg) y la más extensa es la pista siete que contiene 5965848 datos (135.28 seg), por lo que se toma la decisión de segmentar para obtener un mejor del rendimiento en cada parte del proceso de análisis, lo que implica una alta capacidad de procesamiento y almacenamiento de datos del equipo de trabajo, además de tiempo.

Para tener una idea de los rangos de frecuencia que se puede llegar a manejar con la wavelet “db6”, se presenta la tabla 3. En el cálculo de estas pseudo-frecuencias se hace uso de la frecuencia centro de la wavelet con la que se trabaja¹⁰, la cual tiene un valor de 0.72727Hz como se puede apreciar en la figura 43; el procedimiento es el mismo descrito anteriormente, primero se realiza la descomposición a nivel 15, se extraen y reconstruyen los coeficientes de detalle de cada nivel y por ultimo para cada uno de ellos se obtiene la energía Shannon total. Con el fin de tener una idea de cuales detalles son los que poseen mayor concentración de información de la señal [32]. En la tabla 4 se muestra la energía de cada detalle para las pistas reconstruidas 2, 3, 4, 5 y 7.

Tabla 3 Pseudo-Frecuencias para db6

NIVEL	ESCALA (2^N)	PSEUDO-FREQ “db6” (Hz)
1	2	16036
2	4	8018.2
3	8	4009.1
4	16	2004.5
5	32	1002.3
6	64	501.14
7	128	250.57
8	256	125.28
9	512	62.642
10	1024	31.321
11	2048	15.661
12	4096	7.8303
13	8192	3.9151
14	16384	1.9576
15	32768	0.97878

¹⁰ Ver capitulo 3

Figura 43. Frecuencia centro db6

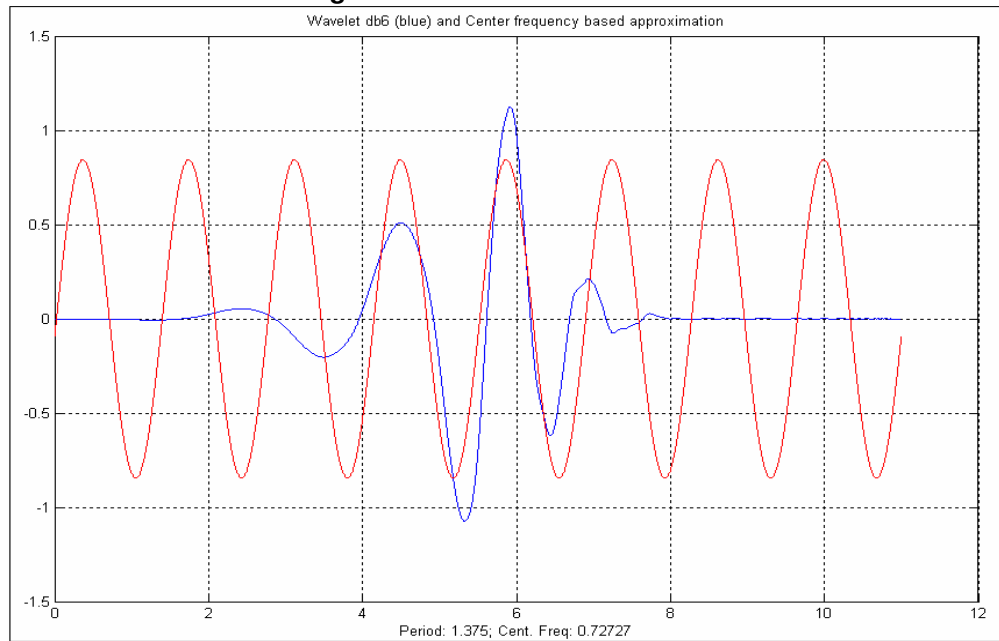


Tabla 4 Energía de cada pista reconstruida

NIVEL	Energía Shannon RP2	Energía Shannon RP3	Energía Shannon RP4	Energía ShannonRP5	Energía Shannon RP7
1	1.5512*10 ⁻¹²	7.0213*10 ⁻³	7.9825*10 ⁻¹⁶	7.7079*10 ⁻¹²	9.5423*10 ⁻¹¹
2	5.068*10 ⁻¹⁰	2.5303*10 ⁻¹⁰	1.9054*10 ⁻¹³	2.7367*10 ⁻⁹	6.0376*10 ⁻¹⁰
3	6.3993*10 ⁻⁸	2.9095*10 ⁻⁸	2.3959*10 ⁻¹¹	3.1152*10 ⁻⁵	6.6659*10 ⁻⁹
4	1.7206*10 ⁻⁵	8.3277*10 ⁻⁶	5.5015*10 ⁻⁹	0.011217	1.1649*10 ⁻⁶
5	2.2909*10 ⁻³	0.0011491	9.1302*10 ⁻⁷	0.011217	1.5157*10 ⁻⁴
6	0.7186	0.40603	0.30268*10 ⁻³	3.5118	0.049283
7	141.01	86.066	0.071103	595.47	10.544
8	337.7	81.479	14.715	668.04	24.574
9	47.229	9.0864	15.699	82.537	5.086
10	1.7692	0.26172	1.7536	2.0986	0.31596
11	44.609*10 ⁻³	0.0060871	0.036439	0.097974	0.017918
12	1.798*10 ⁻³	0.38485*10 ⁻³	1.8568*10 ⁻³	0.016274	0.043865
13	0.47128*10 ⁻³	0.15435*10 ⁻³	0.23188*10 ⁻³	0.017442	0.093746
14	9.3327*10 ⁻⁵	0.10432*10 ⁻³	8.0013*10 ⁻⁵	0.016597	0.11503
15	5.321*10 ⁻⁵	2.5002*10 ⁻⁵	5.339*10 ⁻⁵	0.0097632	0.23253

Cabe anotar que los valores de energía mostrados para la RP7 son resultado del promedio de las energías de sus nueve divisiones.

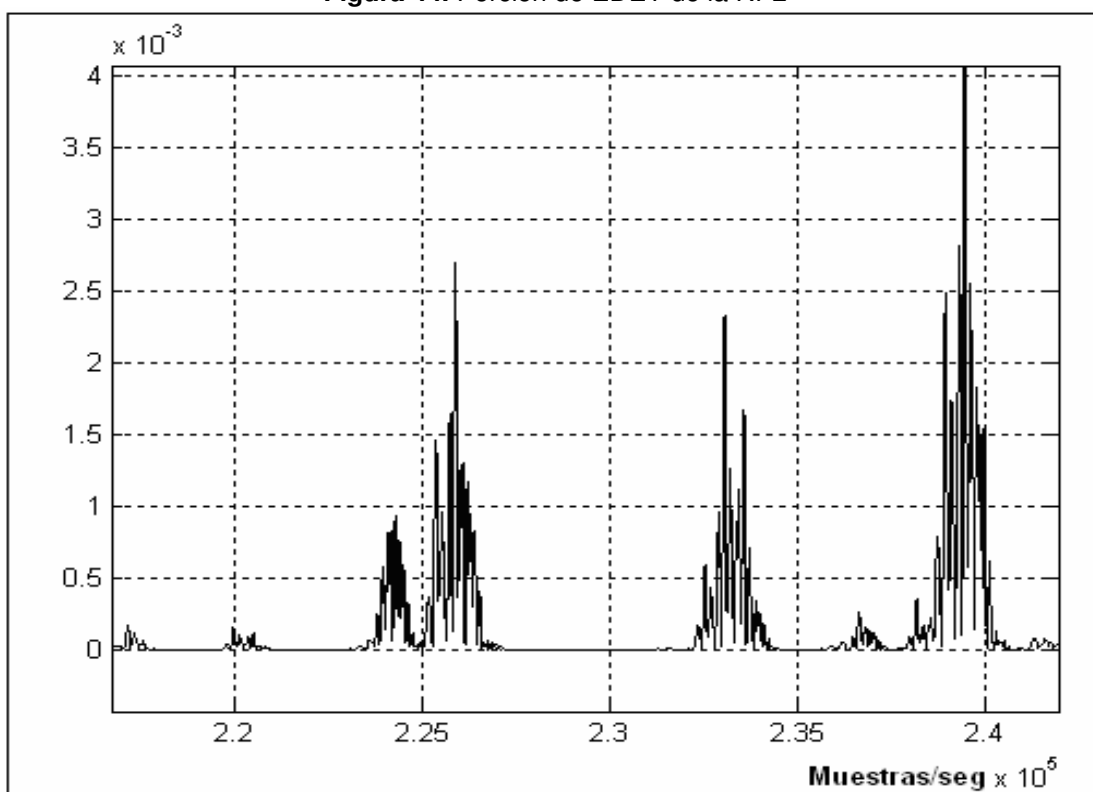
De acuerdo con los valores que se observan en la tabla 4, la mayor cantidad de información de las pistas reconstruidas se encuentra en los detalles 7, 8 y 9 razón por la cual son escogidos para continuar con el análisis; además de estos detalles la aproximación 9 también es escogida, ya que su rango de frecuencia va desde [0– 31.321] HZ las mas bajas posibles de acuerdo a la tabla 3.

5.1 ENVOLVENTE DE ENERGÍA TEMPORAL

Tomando como referencia trabajos elaborados anteriormente en el campo del análisis de sonidos cardiacos humanos se trabaja con el método de Envolvente de Energía Temporal (EDET), el cual consiste en tomar el máximo elemento de cada frecuencia a través del tiempo [34]; este método se aplica a los detalles más significativos de cada pista reconstruida, los cuales aparecen resaltados en la tabla 4, de esta manera el diferenciar un sonido de otro y localizar las mezclas de sonidos se hace más fácil que con solo observar la forma de onda de las pistas reconstruidas. En la figura 44 se muestra una porción de la EDET de la pista reconstruida 2 (RP2), donde se pueden apreciar envolventes de energía diferentes.

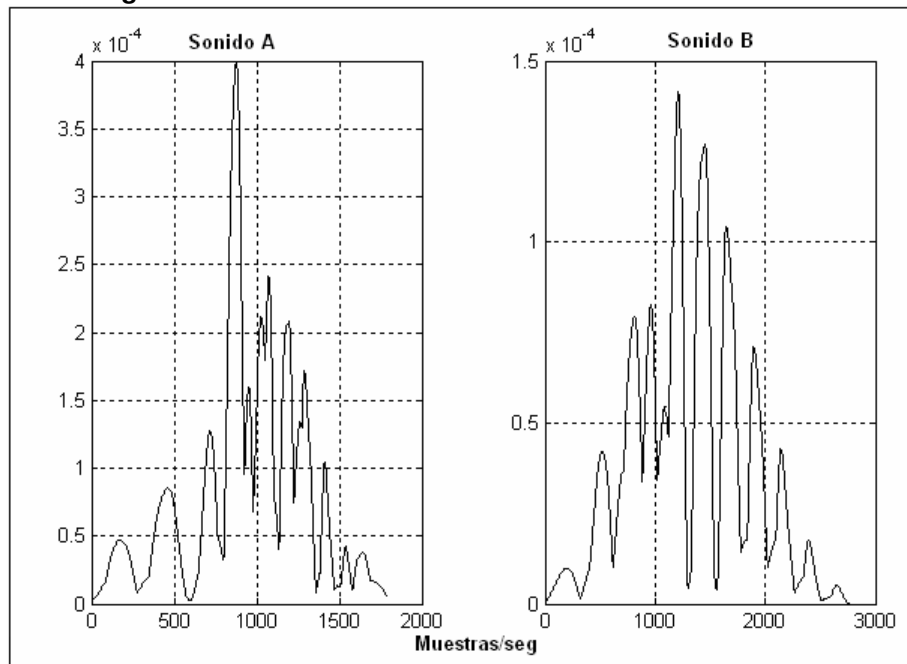
Con la observación de la envolvente de energía de cada pista reconstruida se pudo extraer dos formas de envolvente muy frecuentes, las cuales fueron bautizadas como sonido A y sonido B, ya que en este punto no se tiene certeza de cual de estos dos sonidos es alusivo al primer ruido cardiaco y cual al segundo.

Figura 44. Porción de EDET de la RP2



En la figura 45 se aprecian las envolventes características antes nombradas, hay de varias longitudes, valor máximo de energía y algunas mezclas las cuales son definidas como la unión de sonidos A con sonidos B, lo que hace difícil determinar varios ciclos cardiacos consecutivos del cetáceo a continuación se presenta una estimación promedio de la duración de los sonidos.

Figura 45. Forma estándar de las envolventes características



Para obtener todos los sonidos A y B de cada pista primero se extraen varios de estos sonidos que difieren en su longitud, la cual se encuentra en el rango de [27.21ms-136.05ms] aproximadamente, pero su forma se rige por el estándar que se observa en la figura 45, luego se realiza una correlación entre estos y las pistas reconstruidas tomando solo aquellos con un valor de correlación superior a 0.9 buscando evitar las mezclas de sonidos. Por último se examina visualmente cada componente de este conjunto para depurar la longitud y algún aspecto de la forma de envolvente.

La cantidad de sonidos encontrados cuyas longitudes varían considerablemente, pero cumplen con la forma estándar determinada es de 479 sonidos, este conjunto recibe el nombre de población inicial, de la cual el 57.42% son sonidos A y el 42.58% son sonidos B como se observa en la figura 46. El total de mezclas encontradas es de 197, estas se presentan por la unión de varios sonidos y se pueden apreciar mejor en la envolvente de energía de cada pista reconstruida, como se muestra en la figura 47.

Figura 46. Porcentajes de sonidos A y B encontrados.

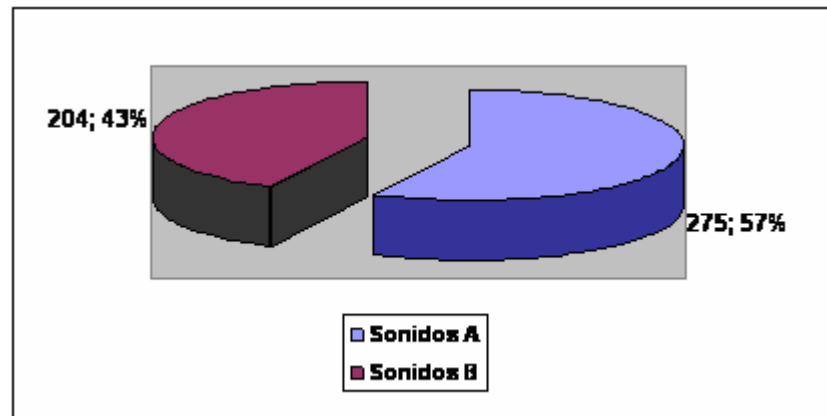
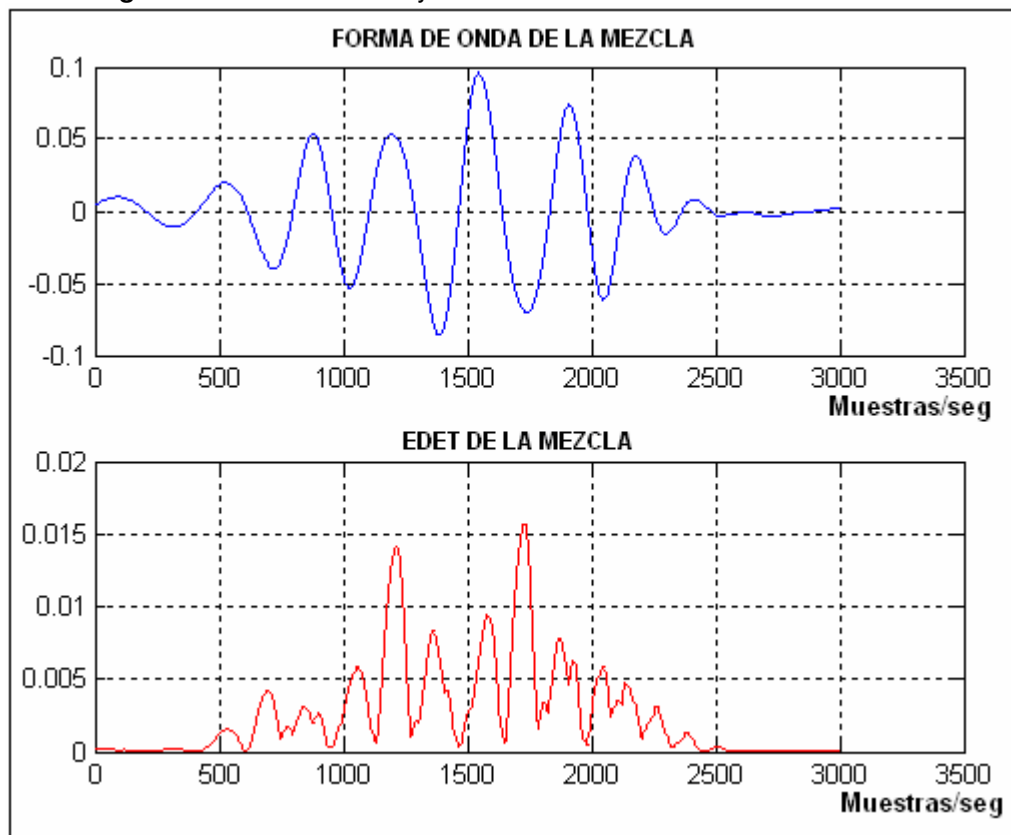


Figura 47. Forma de onda y EDET de una de las mezclas encontradas



5.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS SONIDOS A Y B

En esta etapa del trabajo se habla de caracterización en tiempo y caracterización en frecuencia, las cuales son muy usadas en el diagnóstico del funcionamiento de las válvulas del corazón humano.

5.2.1 Caracterización en Tiempo. Antes de realizar esta caracterización y dar valores de duración de los sonidos, hay que enfatizar en las condiciones en las que se encontraba el entorno en el momento de las grabaciones de las pistas ¹¹, una de esas condiciones es la presencia de otros animales además de la ballena, tales como delfines y otros peces alrededor de esta, lo que hace pensar que en las pistas entregadas se encuentren presentes sonidos producidos por estos animales, donde algunos de ellos pueden ser de tipo cardíaco, por tal razón no es posible afirmar en este punto que los sonidos A y B encontrados pertenezcan solo a la ballena jorobada.

De acuerdo a lo anterior es necesario discernir en primera instancia cual sonido pertenece o no al funcionamiento de las válvulas cardíacas de la ballena, se analiza la pista 1 donde se encuentra un evento cardíaco del cetáceo como se observa en la figura 48, obtenido en estudios previos realizados por el grupo SCVS; entendiendo por evento lo que en fonocardiografía humana se conoce como ciclo cardíaco y se visualiza como primer y segundo sonido.

Este evento cardíaco de una ballena jorobada tiene una duración aproximada de 362.81ms teniendo en cuenta la frecuencia de muestreo de la señal **$fs=44.1KHZ$** donde el primer sonido tiene una duración de 56.68ms y el segundo una duración de 72.56ms aproximadamente; con estos valores es posible estimar cuales sonidos de la población inicial pertenecen al funcionamiento del corazón de la ballena y llegar a obtener la duración promedio de cada uno de ellos.

¹¹ Ver Anexo C

Primero se extraen los sonidos cuya duración se encuentra dentro del rango de [56ms – 72ms], aclarando que aquellos sonidos con duración mayor también son tomados en cuenta, este conjunto de sonidos es de 291 y recibe el nombre de población de ballena, en la figura 49 se aprecian los porcentajes de sonidos A y B respecto a la población de ballena.

Figura 48. Evento cardiaco del cetáceo obtenido de estudios previos

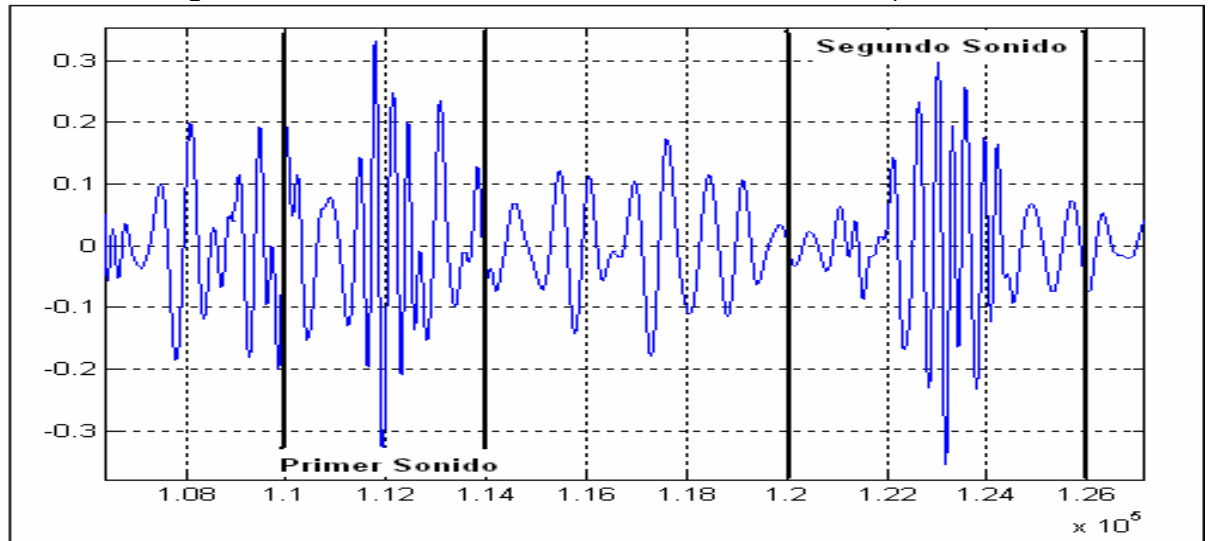
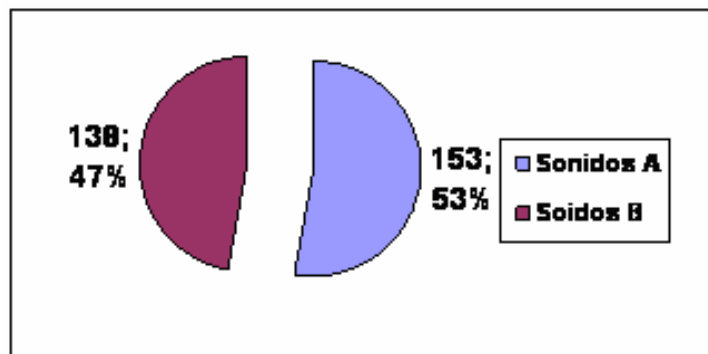


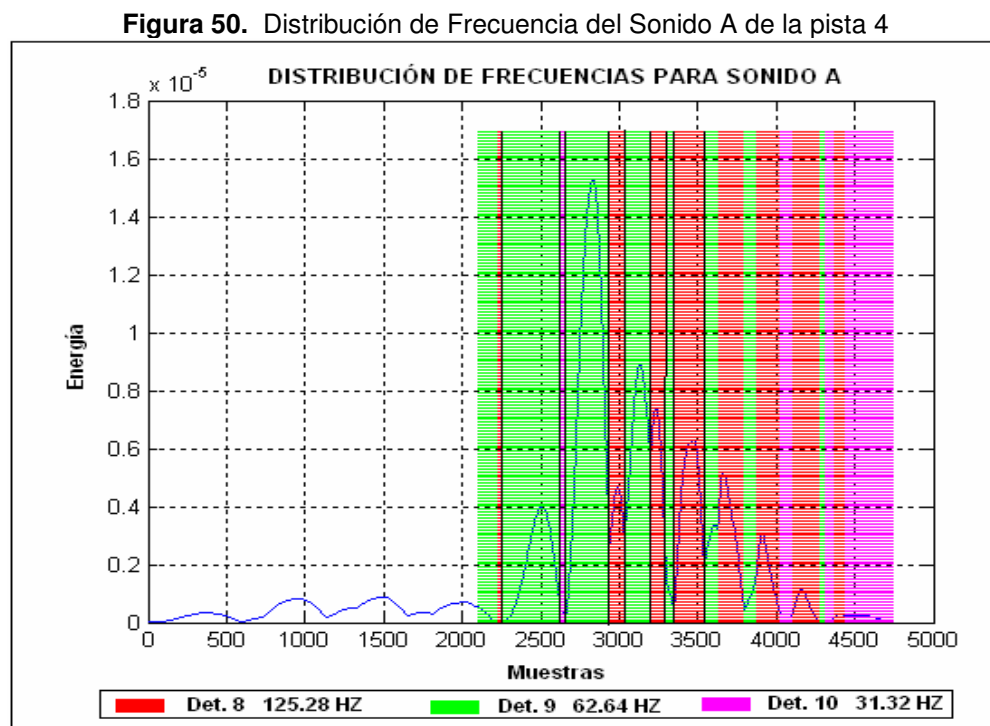
Figura 49. Grafica de sonidos A y B pertenecientes a la Ballena



Por ultimo se toman los sonidos A y B de la población de ballena y se obtiene la duración promedio de cada uno de estos sonidos, dando un valor aproximado para la caracterización en tiempo de estos de la siguiente manera, para el sonido A su duración promedio es de **96.89ms** y para el sonido B la duración promedio es de **76.14ms** aproximadamente; estos cálculos se

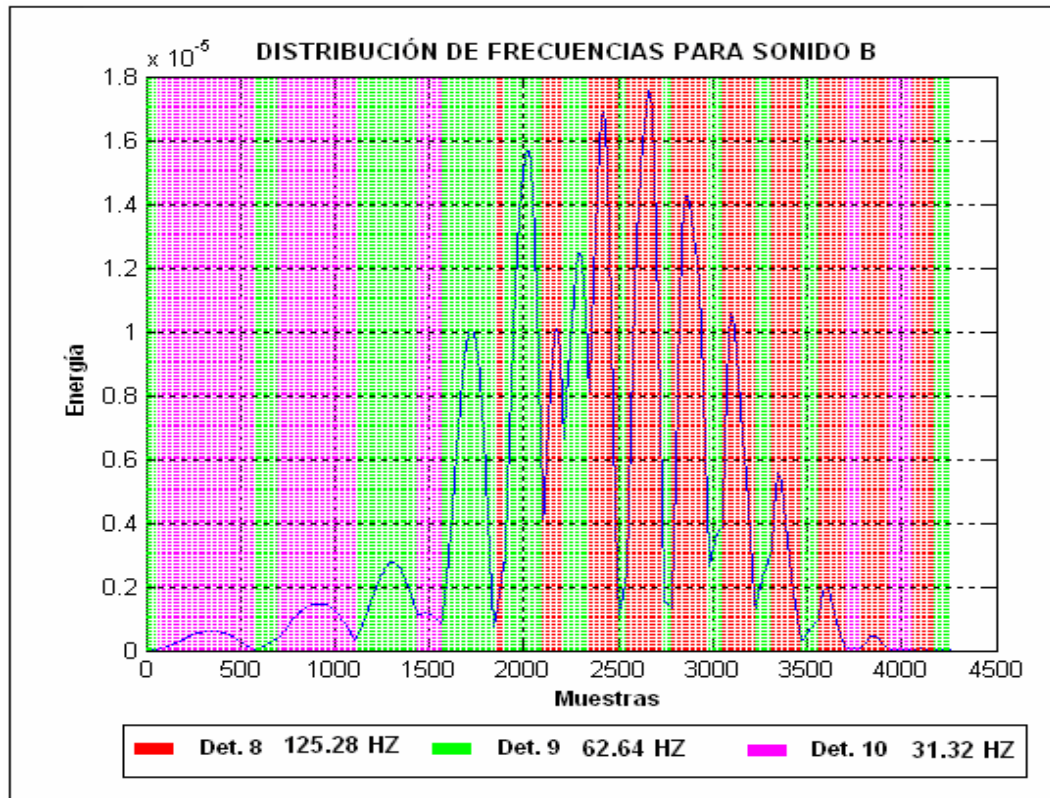
realizan multiplicando el periodo de muestreo por la duración promedio de cada sonido.

5.2.2 Caracterización en Frecuencia Para conocer el rango de frecuencias que pueden llegar a tener los sonidos A y B pertenecientes a la ballena se utiliza nuevamente la Envolvente de Energía Temporal recordando que esta se obtiene de los detalles de mayor energía¹²; la idea de este procedimiento es saber como estos detalles se distribuyen a lo largo de la envolvente representativa de cada sonido A y B, dando importancia a los picos de mayor energía dentro de la envolvente (sonido A y sonido B); en las figura 50 y 51 se puede apreciar la distribución de las frecuencia a lo largo de los picos de energía que conforman el sonido A y el sonido B.



¹² Ver Tabla 4

Figura 51. Distribución de Frecuencia Sonido B de la pista 4



De acuerdo a los datos obtenidos se llega a la conclusión que en los sonidos A la frecuencia predominante es de 62.64 Hz , ya que los picos de energía más altos la contienen, esta frecuencia se relaciona con el detalle 9 como se puede apreciar en la figura 50. En cuanto al sonido B, sus picos de energía altos se distribuye entre las frecuencias de 125.28 Hz relacionada con el detalle 8 y la frecuencia 62.64 Hz relacionada con el detalle 9, como se observa en la figura 51.

5.3 CLASIFICACIÓN DE LOS POSIBLES SONIDOS CARDIACOS DE LA BALLENA

Conociendo de antemano la relación existente entre el electrocardiograma y el fonocardiograma humano, donde el primer ruido cardiaco coincide con el complejo QRS específicamente con el descenso del intervalo RS del ECG, mientras que el segundo ruido cardiaco coincide con el final de la onda T del

ECG [35]; surge la posibilidad de llegar a clasificar el sonido A y B en primer o segundo ruido cardiaco. Para esta clasificación se tomaron los complejos QRS del ECG de la ballena jorobada identificados como complejos globales en un trabajo de grado anterior, donde se proponen tres tipos de señales de ECG orientadas a la organización de los registros trabajados, estos tipos de señales son obtenidos según los puntos particulares de cada una de las ondas que conforman el respectivo complejo global [36]. Los tres tipos de complejos globales se muestran en la figura 52, 53 y 54.

Figura 52. Tipo 1 de la señal cardiaca representativa (ECG) de la ballena Jorobada

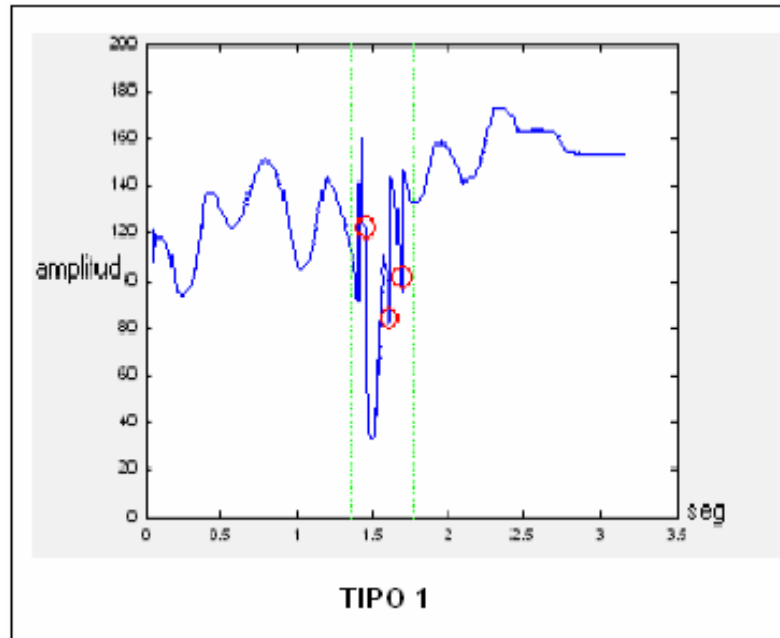


Figura 53. Tipo 2 de la señal cardiaca representativa (ECG) de la ballena Jorobada

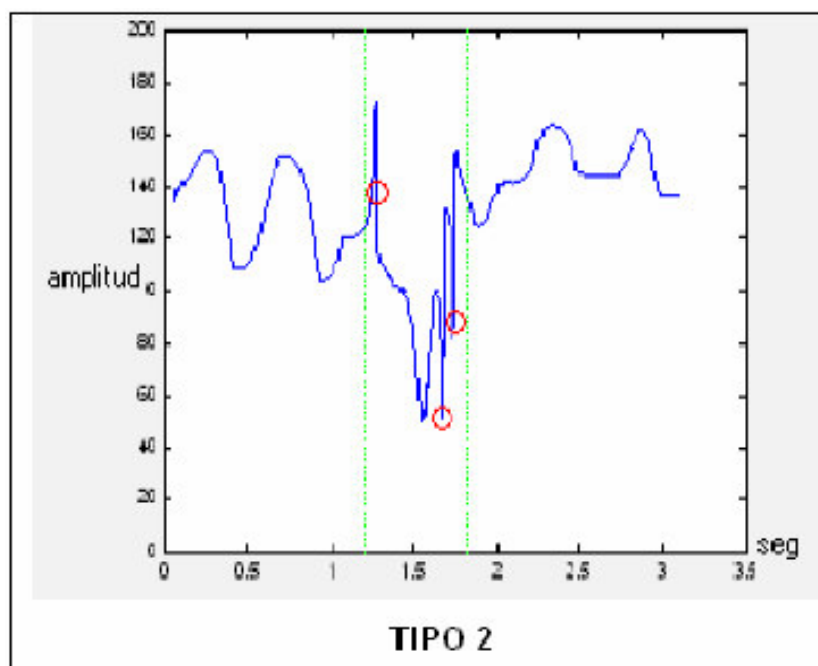
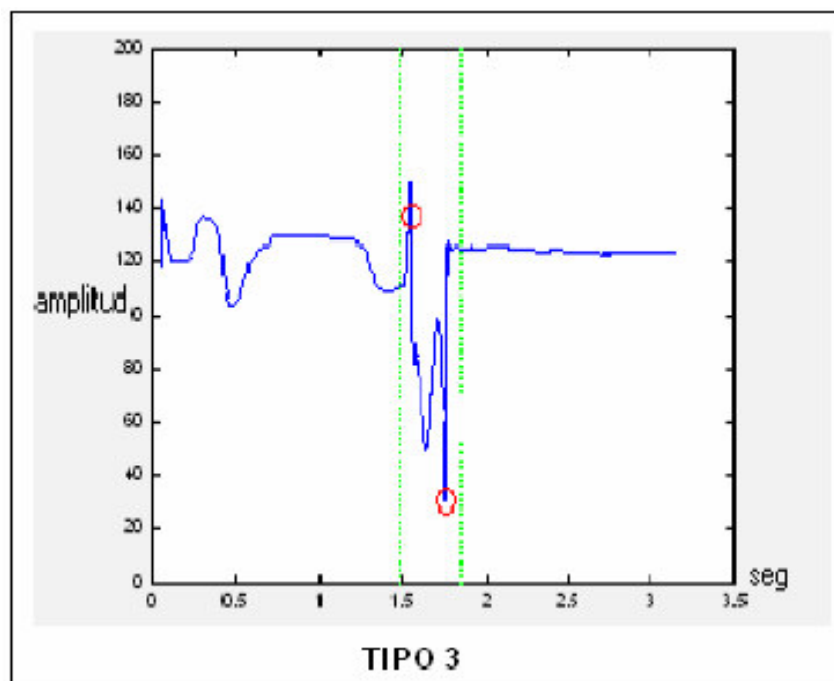


Figura 54. Tipo 3 de la señal cardiaca representativa (ECG) de la ballena Jorobada



El proceso de clasificación de los sonidos de la ballena empieza extrayendo la porción que corresponde al complejo global en cada una de las señales cardiacas representativas arriba mostradas, en estas porciones se puede

apreciar la onda R que es de interés en este momento; luego se busca la posible relación entre estos complejos globales y los sonidos A y B, para lo cual se emplea el coeficiente de correlación cruzada ρ_{xy} .

$$\rho_{xy} = \frac{COV(XY)}{\sigma_x * \sigma_y} \quad (36)$$

La correlación cruzada entre los complejos globales y los sonidos A y B se realiza escogiendo de forma heurística un ancho de ventana entre 50 y 150 muestras, dependiendo del complejo que se este trabajando, como se puede observar en la tabla 5; para determinar el valor de ventana se tiene en cuenta el intervalo donde se pasa de la onda R a la onda S en el ECG de la ballena, es decir el descenso de la onda R.

Tabla 5. Valores de ventana de correlación para cada tipo de complejo.

TIPO DE COMPLEJO	VALOR DE VENTANA (muestras)
1	100
2	1001
3	1001

De acuerdo al resultado arrojado por este proceso de correlación se presume que el primer ruido cardíaco de una ballena jorobada es el denominado en este trabajo como el sonido A y el segundo ruido cardíaco es el sonido B; se hacen estos planteamientos ya que es con el sonido A con el cual se alcanza un mayor valor de correlación en el punto donde se encuentra el descenso de la onda R, esto ocurre en los tres tipos de complejos. Se hace la aclaración que los valores de correlación obtenidos son de bajo orden, alrededor de $[10^{-9}-10^{-4}]$, esto se debe a que en el ECG y en los sonidos hay factores tanto ambientales como movimientos del animal que generan una especie de ruido que para este caso no se encuentran del todo caracterizados como lo está para el humano, además las señales eléctricas y acústicas fueron tomadas a individuos diferentes y en condiciones totalmente diferentes lo cual también influye en los valores obtenidos.

En la figura 55 y 56 se pueden apreciar los picos de correlación obtenidos con los sonidos A y B, al correlacionarlos con el primer tipo de los complejos representativos

Figura 55. Grafico de valores de correlación entre el complejo tipo 1 y sonidos B.

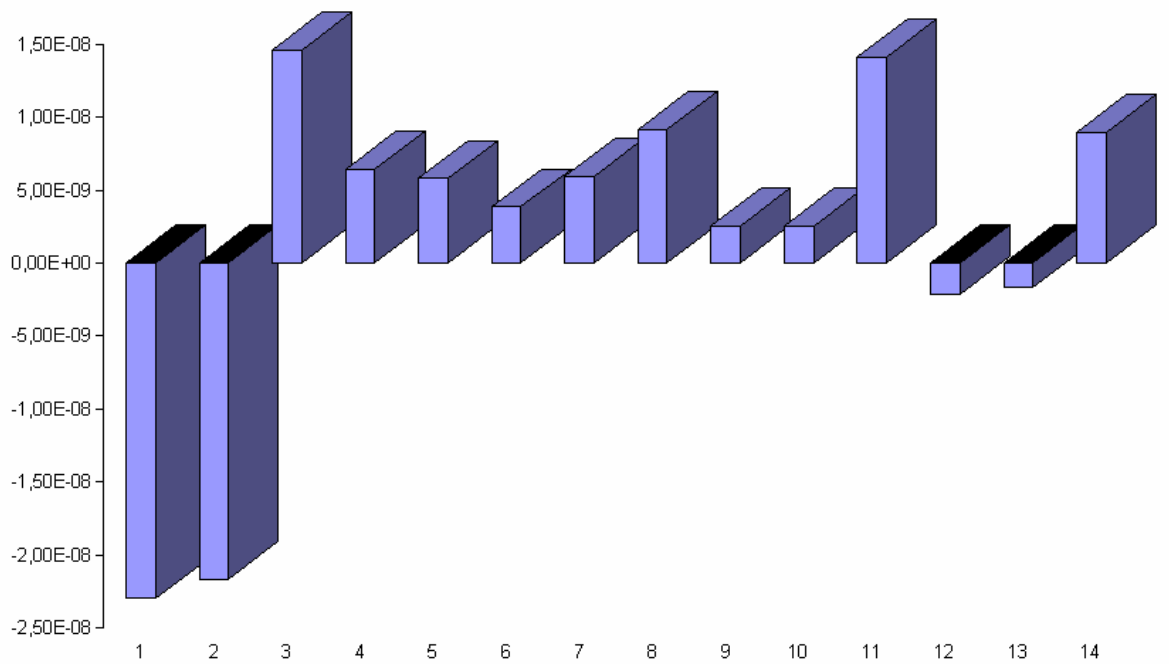
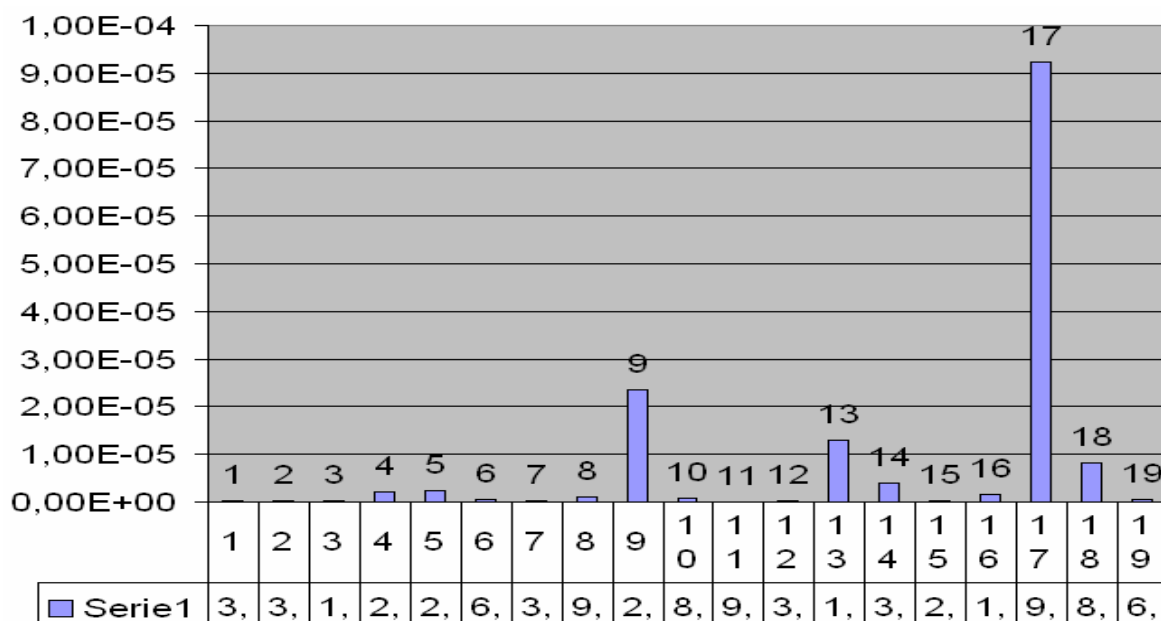


Figura 56. Grafico de valores de correlación entre el complejo tipo 2 y sonidos A



En las anteriores figuras se puede apreciar que los valores son de orden bajo, como ya se mencionó, esto posiblemente es consecuencia de las diferentes condiciones en las que fueron tomadas las señales de electrocardiograma y fonocardiograma; además se debe tener presente que para esta clase de estudios estas señales son tomadas en el mismo instante de tiempo y al mismo individuo.

6. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

Al trabajar de manera interdisciplinaria es importante conocer y comprender el origen y comportamiento de los fenómenos que representan las señales de estudio, en este caso se le da importancia a los fenómenos que constituyen el comportamiento cardiovascular en el hombre, pues son el punto de referencia a la hora de realizar estudios relacionados con esta área en otros seres vivos como la ballena jorobada.

El trabajo se inició con un conjunto de siete pistas de diferente duración entre las cuales se hallaba una que además de los cantos de las ballenas incluía instrumentos musicales la cual fue descartada para el análisis, el resto de las señales fueron grabadas en un ambiente en el cual se encontraban no solo una ballena sino varias de ellas acompañadas posiblemente por otros animales ubicados a diferente distancia y profundidad del submarino, esto se observa al encontrar sonidos de diferentes longitudes, amplitudes y en muchos casos mezclas de estos. Lo anterior influyó en el hecho de restringir la determinación del patrón fonocardiográfico y optar por obtener los sonidos cardiacos individualmente.

Debido a las características dinámicas en tiempo y frecuencia que poseen las señales no estacionarias como por ejemplo los cantos de ballenas, fue necesario para su filtrado usar la Transformada Wavelet ya que en otros trabajos relacionados con el procesamiento de señales biológicas esta herramienta presenta un buen desempeño en comparación con la transformada de Fourier; con este proceso se logró eliminar los cantos del cetáceo contenidos en las señales y obtener posibles sonidos cardiacos del mismo. Sin embargo se trabajó el filtrado con los filtros convencionales teniendo como

referencia el la investigación previamente realizada por el Dr. Reynolds pero el resultado arrojado fueron señales que aun conservan cantos audibles.

Se comprobó la eficiencia que la Transformada *Wavelet*, ofrece para el procesamiento de señales biológicas, dejando al descubierto el gran potencial y la posibilidad de aplicar este modelo matemático en el análisis de otro tipo de señales.

Se desarrollaron algoritmos los cuales permitieron identificar de manera eficiente los posibles sonidos cardiacos presentes en las señales, aplicando herramientas utilizadas en otros estudios de fonocardiografía como por ejemplo la Envolvente Temporal de Energía y trabajando con la Toolbox de Wavelet de Matlab.

Igualmente se desarrolló una interfaz grafica con la ayuda de la herramienta GUIDE de Matlab en la cual se pueden observar los resultados obtenidos en cada uno de los procesos que conforman este trabajo, además de poder escuchar cada una de las pistas originales y su respectiva señal filtrada, los sonidos característicos encontrados, y observar los valores los resultados obtenidos de la caracterización y clasificación de los sonido cardiacos de la ballena.

La caracterización en tiempo y la clasificación de los sonidos cardiacos del cetáceo se realizaron teniendo como punto de referencia los resultados obtenidos en trabajos previos, ya que el estudio de las señales fonocardiográficas ha sido orientado en gran parte al ser humano. En cuanto a la caracterización en tiempo se tuvo en cuenta la frecuencia de muestre para poder hacer la conversión de muestras a valores en segundos.

En la clasificación de los sonidos se tomaron los resultados obtenidos en el análisis del ECG de la ballena jorobada presentado en un trabajo de grado anterior, donde se proponen tres tipos de complejos globales los cuales fueron

utilizados en los algoritmos de correlación con los sonidos cardiacos de ballena encontrados, donde se obtuvo la clasificación de estos en primer y segundo ruido cardiaco del cetáceo.

Los valores de correlación entre los complejos globales y los sonidos encontrados son de bajo orden alrededor de $[10^{-9}-10^{-4}]$, esto se debe posiblemente a las diferentes condiciones en las que fueron tomadas las señales de electro y de fono, teniendo en cuenta que este tipo de análisis de relación entre estas dos señales cardiacas se realiza tomando primero estas en el mismo instante de tiempo y con el paciente totalmente relajado con el fin de evitar interferencia de otras señales biológicas como las producidas por el movimiento. Además en el análisis del electrocardiograma y del fonocardiograma no se tiene la certeza de hasta que punto se elimina totalmente el ruido, considerando a este como interferencia de cualquier tipo de señal no cardiaca.

RECOMENDACIONES

Para investigaciones posteriores se debe documentar de manera mas precisa el instrumental utilizado y en especial la frecuencia de muestreo que se utiliza a la hora de realizar las grabaciones, ya que este es un dato primordial en el momento de dar a conocer valores en segundos de los resultados obtenidos.

Para un análisis mas detallado y exhaustivo de los sonidos cardiacos encontrados se propone estudiar otros métodos de procesamiento como por ejemplo el método de árbol de la Transformada Wavelet, con el cual se podrían obtener características de frecuencia más específicas, además de la posible identificación de los componentes de cada ruido cardiaco.

Con el fin de obtener relaciones de mayor peso entre el electro y el fono se debe realizar la toma de estas señales por lo menos al mismo individuo, y en instantes de tiempo lo mas cercanos posibles, buscando también eventos cardiacos de este para lograr una mejor caracterización.

Continuar trabajando proyectos de carácter interdisciplinarios en la universidad con el fin de agrupar las potencialidades de cada una de las áreas de trabajo en pro de mejores resultados, teniendo siempre como meta la aplicación de estos hacia la sociedad, como por ejemplo aquellos encaminados por la línea de la bioingeniería.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BIBLIOGRAFÍA :ELECTROCARDIOGRAMA

- [1] http://www.e-mergencia.com/html/historia_ecg/
- [2] GUYTON AC, HALL JE. Tratado de Fisiología Médica. Novena Edición. México D.F. Interamericana –Mc Graw Hill, 1997, 131-8.
- [3] GANONG WF. Fisiología Médica. Décimo quinta edición. México D.F. Editorial El Manual Moderno, S.A. de C.V, 1996,601-4.
- [4] ANDRÓMEDA INTERACTIVE ldt. Medical Science Division. Cardiovascular System. Medical@andromeda.co.uk. Modulo 1-4. 1995.
- [5] ARANGO JJ. Manual de Electrocardiografía. Cuarta Edición. Medellín: Corporación para investigaciones Biológicas, 1996, 141-65.
- [6] www.medlib.med.utha.edu/kw/pharm
- [7] M. EL-HANJOURI, W. ALKHALDI, N. HAMDY AND O. ABDEL ALIM. Heart Diseases Diagnosis using HMM. IEEE Melecon 2002, May 7-9, 20002, Cairo, Egypt.
- [8] B. EL-ASIR, L. KHADRA & A.H. AL-ABBASI, M.M.J. MOHAMMED. Time-Frequency Analysis of the First Heart Sound. IEEE TENCON. Digital Signal Processing Applications.

[9] JHON C. WOOD AND DANIEL T. BARRY. Time-Frequency Analysis of Heart Sounds. IEEE ENGINEERING IN MEDICINE AND BIOLOGY. March/April 1995.

[10] JUNG JU LEE, SANG MIN LEE, IN YOUNG KIM, HONG KI MIN, SEUNG HONG HONG. Comparison Between Short Time Fourier and Wavelet Transform for Feature Extraction of Heart Sound. IEEE TENCON 1999.

BIBLIOGRAFIA ESPACIO TRANSFORMADAS

[11] OPPENHEIM Alan V., WILLSKY Alan S., "Signals and Systems", Prentice Hall. Inc, segunda Edition, 1998.

[12] OPPENHEIM A.V., y SCHAFER R.W., "Discrete-Time Signal Processing", Prentice-Hall International, 1989.

[13] BURRUS S., Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms, Prentice-Hall, 1997.

[14] GRAPS A., "An Introduction to Wavelets", IEEE Computational Science and Engineering, Vol. 2, Núm. 2, 1995.

[15] PROVAZNIK I., KOZUMPLIK J., BARDONOVA J., NOVAKOVA M., y NOVAKOVA Z., "Wavelet Transform in ECG signal Processing". Proceeding of the 15th Biennial Eurasip Conference Biosignal 2000 pp. 21-25, 2000.

[16] THAKOR N.V., WEBSTER J.G., y TOMPKINS W.J., "Estimation of QRS

ComplexPower Spectra for Design of a QRS Filter”, IEEE Transactions on Biomedical Engineering”, Vol. 31, Núm. 11, pp. 702-706, Noviembre 1984.

[17] VETTERLI M., “Wavelets and Subband Coding”, Prentice Hall, 1995.

[18] <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTtutorial.html>, 23 feb2004.

BIBLIOGRAFIA FILTRADO DE LOS CANTOS DE LA BALLENA

[19] KAMEN, Edward W. Introducción a señales y sistemas. CECSA. México, 1996. pág. 412.

[20] MALLAT S., “A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: the Wavelet Transform”, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 11, Núm. 7, pp.674-683, 1989.

[21] GOLDBERGER AL, AMARAL LAN, GLASS L, HAUSDORFF JM, IVANOV PCh, MARK RG, MIETUS JE, MOODY GB, PENG CK, STANLEY HE. “PhysioBank, ¹³PhysioToolkit, and Physionet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals”. Circulation 101(23):e215-e220. 2000.

[22] WAVELET TOOLBOX, for use with matlab. The Mathworks, Inc. 2002. Matlab pdf Documentations. www.mathworks.com

[23] PIETKA E. Feature extraction in computerized approach to the ECG

analysis. Pattern Recognition.1991. 139-146 p.

[24] GRITZALI F., FRANGAKIS G., PAPAKONSTANTINOV G. Detection of the P and T waves in a ECG. Computing Biomedical. IEEE. 1989 Res : 22. 83-91 p.

[25]HAMILTON P.S., TOMKINS W.J. Quantitative investigation of QRS detection rules using the MIT-BIH arrhythmia database. IEEE Transactions Biomedical Engineering. 1986. Res : 33. 1157-1165 p.

[26] PAN J., TOMKINS W.J. A real – time QRS detection algorithms. . IEEE Transactions Biomedical Engineering. 1985. Res: 32. 230 -236 p.

[27] SAHAMBI J.S., TANDOM S.N., BHATT R.K.P. Using Wavelet Transform for ECGs Characterization. Center for Biomedical Engineering. Indian institute of Technology Delhi. IEEE EMB. Vol 16. 1997.

[28] MEYER C.R., KEISER H.N., Electrocardiogram Baseline Noise Estimations and Removal using Cubic Splines and State-Space Computation Techniques. Computers and Biomedical Research, pp. 459-470, 1977.

[29] MALLAT, Stephane. Zero-Crossings of a Wavelet Transform. IEEE Transactions on information theory. (1991) 37, 1019-1033.

[30] VULLINGS E. J., GARCIA P. LAGUNA. Waveform detection in holter ECG using dynamic time warping. Comunicaciones del XV congreso anual

de la sociedad española de ingeniería biomédica. Valencia España. 1997.

313 -316 p.

[31] SUPAPPDA S., SUN Y. Nonlinear transform of ECG signals for digital QRS detection: A quantitative analysis. IEEE Transactions on biomedical engineering. 1994. vol. 14. num. 4. 397 – 400 p.

BIBLIOGRAFÍA ANALISIS DE CANTOS

[32] JUNG JU LEE, SANG MIN LEE, IN YOUNG KIM, HONG KI MIN, SEUNG HONG HONG. Comparison Between Short Time Fourier and Wavelet Transform for Feature Extraction of Heart Sound. IEEE TENCON 1999.

[33] B. EL-ASIR, L. KHADRA & A.H. AL-ABBASI, M.M.J. MOHAMMED. Time-Frequency Analysis of the First Heart Sound. IEEE TENCON. Digital Signal Processing Applications.

[35] Patrones de correlación Estadísticas entre Segmentos de Señales Electrocardiográficas y Fonocardiográficas.

[36] ANDREA DEL PILAR ROSAS, RICARDO AYALA. Interfaz gráfica para la obtención de patrones ecg e Hipótesis del Vector de Despolarización del Corazón de una Ballena Jorobada Adulta Mediante el Tratamiento de Imagen y Señal en un Entorno Comparativo con el Ser Humano.

[37] **JORGE REYNOLDS P, JOSE IGNACION ROZO C.** Viaje al corazón de las Ballenas. SCVS, Bogota, 1998.

ANEXO A. LAS BALLENAS

Imagen A1. Salto de Ballena Jorobada



Enciclopedia Microsoft Encarta 2001

Su nombre científico *Megaptera novaeangliae* se deriva del griego “megas” por grande y “pteron” por aleta para *Megaptera* y del latín “novus” para nuevo y del inglés modificado “angliae” por Inglaterra para *novaeangliae*, que significa “el gran alado de Nueva Inglaterra”. Este gentilicio lo recibió ya que el primer espécimen que se describió formalmente fue en 1781, y en las costas del noreste de Estados Unidos. En la imagen A1. se puede observar las ballenas jorobadas actuales.

De acuerdo con ciertas características morfológicas, el orden *cetácea* está dividido en dos grupos:

Mysticeti: Las ballenas propiamente dichas es decir animales filtradores sin dientes y dotados de barbas, a manera de las ballenas jorobadas.

Odontoceti: Animales dentados como los delfines de mar y agua dulce, la orca, el cachalote y el marval entre otros.

En términos biológicos la división de estos grupos es por las estructuras manejadas para la alimentación y los variados hábitos alimenticios.

A.1 EVOLUCION

En 1983 en Pakistán se pudo establecer que hace unos 50 millones de años, a orillas de un antiguo mar llamado Tethys, entre Indonesia y España, se encontraron los huesos de una ballena primaria, llamada Pakicetus, con esta se comprobó que las ballenas venían de un animal con forma de lobo, con pezuñas llamado Mesonikites. Ver Imagen A2.

Imagen A2. Mesonikites



Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo y José Ignacio Rozo Carvajal.

El Pakicetus, al evolucionar en el Mesonikites, desarrolló colmillos y un orificio auditivo grueso que le permitía oír bajo el agua, mamíferos completamente terrestres, cuadrúpedos, carnívoros, omnívoros y herbívoros. Estos eran animales similares a un perro lobo con masa corporal que podía variar de 10 a 250 kg.. Los *Mesoniquianos* provienen de África, Norte América, Australia y Nueva Zelanda, algunos tienen más de 64 millones de años.

Tiempo después fue descubierto otra ballena que vivió tres millones de años antes que el Pakicetus llamada Indocetus, más terrestre que marina. Posteriormente fue descubierto en 1994 el eslabón perdido para esta especie llamado el Ambulocetus natans, la ballena que camina y nada.

Más tarde se encontró el Rodocetus (Ver imagen A3), donde apareció la adaptación clave de las vértebras de la cola de las ballenas primarias fusionadas para permitir el apoyo sobre la superficie terrestre.

Imagen A3. Rodocetus



Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo y José Ignacio Rozo Carvajal.

La historia de cómo estos mamíferos terrestres regresaron al mar, se supone que hace millones de años salieron del mar y desarrollaron extremidades, en una cadena evolutiva hasta convertirse en grandes criaturas que poblaron el planeta los llamados dinosaurios, mas tarde una de estas especies regreso al mar y perdió sus extremidades, en un salto evolutivo en el que una especie en vez de extinguirse regreso al mar. Se sabe que hace cinco millones de años las grandes ballenas ya habían alcanzado un tamaño semejante a las especies actuales y por esa época apareció la yubarta o ballena jorobada.

A.2 FISILOGIA

Las ballenas son mamíferos acuáticos, del grupo de los cetáceos, su cuerpo es alargado, robusto en la sección central y más estrecho hacia la cola y la cabeza. El color del cuerpo va del gris oscuro hasta el negro en la región dorsal y del blanco hasta un gris oscuro o negro en la zona de la garganta y la barriga, parte de las aletas pectorales y la cara ventral de la cola.

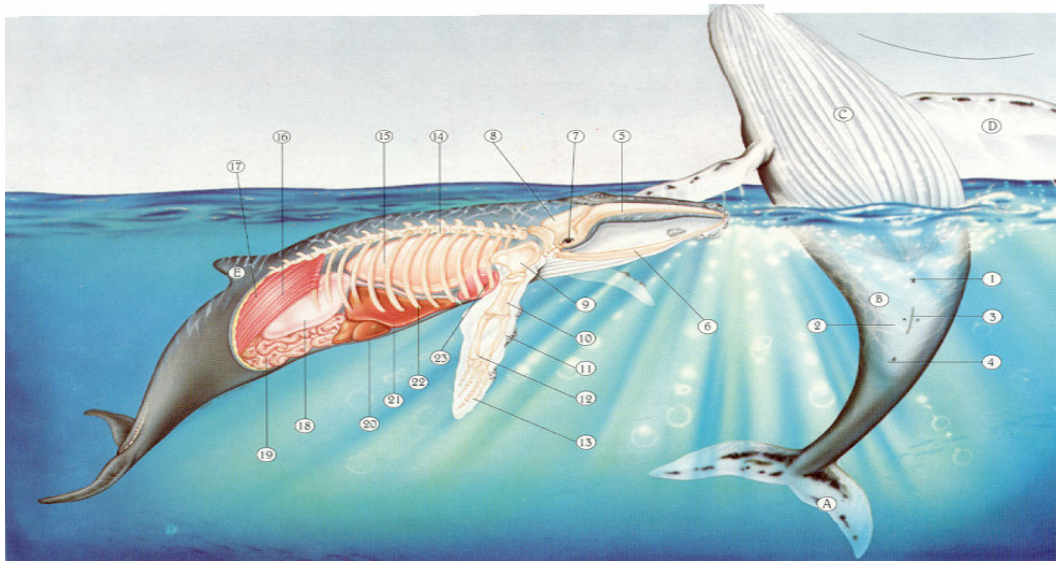
La cabeza es cerca de un cuarto de la longitud total y un tercio de la masa corporal, es amplia redondeada con una cresta central poco visible, sobre esta presenta una serie de protuberancias carnosas como verrugas, con un pelo cada una, tienen función sensorial. También existe una protuberancia más grande en la mandíbula inferior. De cada lado del maxilar se desprenden entre 270 y 400 barbas de 70cm de largo y 15cm de ancho, de color negro con cerdas negras o verde oliva.

El labio va a todo lo largo de la cabeza, doblándose centralmente antes del ojo. Los ojos están uno a cada lado por detrás del extremo del labio. El oído es un orificio pequeño ubicado atrás y abajo del ojo. Carece de pabellón auditivo. Los orificios respiratorios están sobre el centro de la cabeza, levemente por detrás de los ojos.

En la región ventral se encuentran de 14 a 35 surcos de hasta 38 cm de ancho, que van en línea recta desde el extremo anterior de la mandíbula hasta el ombligo. Las dos aletas pectorales tienen hasta 6m de longitud y tienen nudosidades en su borde anterior. En el tercio dorsal del cuerpo, sobre un montículo carnoso esta la aleta dorsal de forma variable desde chata hasta afilada.

En la región media ventral del cuerpo y en dirección cefalo caudal se ubica: el ombligo, en el centro del cuerpo, la abertura genital y pliegues mamarios en la hembra, el ano y un engrosamiento carnoso llamado Carina, que es el uno de los últimos huesos de la columna.

Imagen A4. Morfología de una ballena



Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo y José Ignacio Rozo Carvajal.

IDENTIFICACION DE LA MORFOLOGIA DE LA BALLENA

- A. Aleta caudal
- B. Bajo vientre
- C. Pliegues
- D. Aleta pectoral
- E. Aleta dorsal
- 1. Ombligo
- 2. Glándulas mamarias
- 3. Orificio uro-genital
- 4. Ano
- 5. Maxilar superior
- 6. Maxilar inferior
- 7. Cavidad ocular
- 8. Cráneo
- 9. Omoplato
- 10. Húmero
- 11. Cubito
- 12. Radio
- 13. Dedos
- 14. Columna vertebral
- 15. Pulmón
- 16. Tejido muscular
- 17. Capa de grasa
- 18. Estómago
- 19. Intestino
- 20. Páncreas
- 21. Hígado
- 22. Costillas
- 23. Corazón

Su organismo es similar a cualquier gran mamífero terrestre. Las diferencias inician con el gran esqueleto que posee, que equivale solo al 15% del peso total del cuerpo, mientras que en un mamífero terrestre solo comprende más de 50%. No poseen hueso de la clavícula, y los huesos propios de las patas desaparecieron, solo tienen conservado en su interior los vestigios de la cadera y las patas, pero están unidas rígidamente, sin ninguna función conocida. Posee costillas flotantes, facilitando los cambios del volumen torácico durante el buceo.

Poseen un órgano llamado retina mirabilia o red maravillosa que solo tienen los cetáceos, es una red de pequeños vasos sanguíneos que rodea el cerebro y su función es extraer las burbujas de gas de la sangre que se forman en el buceo profundo. La red maravillosa consiste en una red de venas y arterias, que se encuentran en los capilares sanguíneos y que permiten que los flujos de sangre (el venoso y el arterial) se mantengan cercanos, corran en direcciones opuestas y puedan transferir calor de uno a otro.

La sangre contenida en las aletas y en la cola tiende a enfriarse si el medio es frío, pero gracias a la red maravillosa y a la posición de los vasos sanguíneos, las arterias ceden calor a las venas y la sangre se precalienta antes de llegar a las regiones del cuerpo donde están aisladas y en las que se pueden conservar el calor.

Bajo la piel poseen una gruesa capa de grasa de hasta 20cm de grueso, que sirve para aislarse de las bajas temperaturas en los polos y de reserva de energía para la época de reproducción en la que no se alimentan. Esta capa varía de acuerdo al momento del año y con la edad.

El cerebro puede pesar entre 5 y 7.5kg, el corazón unos 220kg y los pulmones aproximadamente 650kg. Los ovarios y testículos maduros alcanzan pesos de 3 y 4kg respectivamente. Los órganos de reproducción masculinos están dentro del cuerpo y solo se expone el pene durante la copula. Las glándulas mamarias femeninas desembocan en unos surcos delgados. Pueden alcanzar una longitud de 18m y un peso de hasta 45 toneladas, una cría puede medir 3.5m y pesar 1.5 toneladas. En su estado adulto miden entre 1 y 2 m más que los machos. Se cree que pueden llegar a vivir 60 años o más.

Las ballenas no tienen cuerdas vocales y cuando producen sonidos, lo hacen bajo el agua con la boca y los canales nasales cerrados, las vocalizaciones son de baja frecuencia de 3KHz a 35KHz. A los sonidos se les atribuye muchas funciones como advertencias de peligro, reconocimiento sexual, comunicación a larga distancia, comunicación entre manadas e información sobre alimento.

La respiración se realiza a través de los orificios nasales. Después de haber realizado varias ventilaciones, se sumerge y los orificios nasales se cierran por medio de válvulas, los tiempos de inmersión cambian de acuerdo a las especies y pueden variar de 20 a 80 minutos. En la superficie las emanaciones poseen forma de un soplo por lo que el contenido de aire en los pulmones es expulsado hacia las fosas nasales; el aire a presión atomiza el agua y los aceites que se están en estos canales y se genera la columna visible y muy caliente de vapor de agua.

Las ballenas al sumergirse no pueden acumular mucho aire en sus pulmones por que a gran profundidad la presión hace que el oxígeno se vuelva tóxico y el Nitrógeno obtenido al respirar el aire se disuelve en la sangre y se transforma en burbujas al momento de ascender. Las ballenas requieren sangre

oxigenada para sus actividades metabólicas y acumulan oxígeno por medios químicos asociados a moléculas de Hemoglobina en la sangre y la Mioglobina en los músculos.

A diferencia de otros mamíferos ellas tienen más sangre y por tanto, mayor cantidad de Hemoglobina, lo que aumenta el total de oxígeno disponible. Los pulmones y los alvéolos se colapsan durante la inmersión y el oxígeno es enviado hacia las regiones donde no ocurre intercambio gaseoso (tráquea), evitando así que el Nitrógeno pase a la sangre y produzca burbujas.

Para ahorrar oxígeno durante la inmersión ellas bajan su frecuencia cardíaca a la mitad (Bradycardia), ósea 4 -5 contracciones por minuto, también el volumen de sangre oxigenada que circula por los órganos y tejidos baja a la mitad. También se presenta vasoconstricción periférica que ayuda a la circulación de la sangre oxigenada en órganos como el cerebro, el hígado y los riñones, los demás mantienen su actividad sin oxígeno ósea con un metabolismo anaeróbico.

Para transportarse en el mar su cuerpo está adaptado, ya que su peso corporal es 40% músculo haciendo más fácil desplazarse en el medio acuoso que presenta 800 veces más densidad que el aire y 30 veces más viscosidad. Ellas se desplazan por propulsión generando movimientos verticales de la cola, el desplazamiento en la mayoría de las ballenas forma un flujo laminar, dando mayor eficiencia para disminuir la resistencia del agua. Su velocidad varía según la especie pero puede llegar a ser 30km/h en la ballena jorobada y la azul. Otro mecanismo de locomoción es la flotación, mientras duermen permanecen en la superficie, y se dejan llevar por las olas. Las aletas ayudan a la estabilidad y propulsión, estas aletas son:

Aletas pectorales: planas y alargadas, ayudan a la estabilidad y la dirección del cuerpo en la natación.

Aletas Dorsales: Solo en algunas especies, se piensa que sirven para estabilidad, regular la temperatura corporal o reconocimiento sexual.

Aleta Caudal: Hay variedad de forma y tamaño según la forma corporal del animal, proporcionan diferentes patrones de locomoción.

Las migraciones realizan estos viajes extensos periódicamente entre aguas polares y tropicales, moviéndose entre 15 y 21 grados de latitud por mes. En la estación de verano de cada hemisferio permanecen en las latitudes altas alimentándose nada más, y en el otoño migran a regiones tropicales en las que permanecen durante el invierno para aparearse y dar a luz sus ballenatos. Estas migraciones pueden abarcar hasta 20000 Km de distancia en las jorobadas.

Aunque todos los cetáceos son capaces de emitir sonidos las yubartas son únicas en cuanto a complejidad y diversidad de sus sonidos subacuáticos. Los cantos están formados por largas secuencias de sonidos complejamente organizados. Son unidades de sonidos que se combinan para formar frases que al repetirse constituyen un tema. La unión ordenada de varios temas origina un canto. Este canto completo puede durar cerca de media hora y ser emitido por pocos minutos o repetido durante muchas horas seguidas.

Este varía durante la temporada de reproducción, al igual que a lo largo de varias temporadas, hasta cambiar completamente al final de 6 o 8 temporadas. Todas las yubartas de una población cantan la misma canción pero las demás poblaciones diferentes en cada océano cantan diferentes canciones. Debido a que estos cantos se producen en su mayoría en las regiones tropicales se cree que su función es netamente reproductiva. Este comportamiento solo se le conoce a los machos, especialmente cuando están solos, por lo que se cree que está relacionado con el cortejo.

Las ballenas se orientan a través del magnetismo de la tierra, gracias a la presencia de magnetitas en la corteza cerebral que corresponde a los campos magnéticos de la tierra y esta interacción magnética ayuda a la orientación para sus rutas migratorias. También se ayudan escuchando los sonidos bajo las aguas producidas por los peces, invertebrados y otros organismos.

Tienen diferentes clases de alimento, con la única condición que su tamaño es pequeño. Las del hemisferio sur se alimentan casi exclusivamente de krill, como son *Euphausia*, *Thysanoessa*, *Meganyctiphanes*, que es un crustáceo similar a un amarrón de un tamaño no más allá de 30mm. En la antártica se encuentran inmensas concentraciones de krill. Ver imagen A5.

A5. Krill



Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo y José Ignacio Rozo Carvajal.

En el hemisferio norte comen también pequeños peces que forman cardúmenes, como el arenque (*Clupea harengus*), la caballa (*Scomber scombrus*) y el capelín (*Malotus villosus*). Tienen varias técnicas de alimentación como:

Si la comida es abundante liberan de su boca una gran burbuja bajo el agua (de 20m de diámetro) que al ascender forma una nube alrededor del cardumen. En la superficie la ballena se abalanza sobre su comida con la boca totalmente abierta. Esta nube concentra, atrapa, desorienta, las presas. También bucean bajo un cardumen y nadan lentamente hacia la superficie describiendo una espiral y libera lentamente desde sus orificios respiratorios varias columnas de burbujas a intervalos regulares. Esto forma una barrera en espiral evitando que los peces escapen y compactándolos. Cuando esta red está completa la ballena emerge por el centro con la boca abierta, engullendo una buena cantidad de agua y el cardumen. El exceso de agua es expulsado del interior de la boca a través de las barbas, reteniendo los peces. Ver imagen A6.

A6. Ballena yubarta alimentándose



Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo y José Ignacio Rozo Carvajal.

En la época de alimentación acumulan reservas de grasa en la piel, así pueden pasar varios meses sin comer, es por lo general en este tiempo en el que se hacen las migraciones para reproducción. En los meses de alimentación el grosor de esta capa puede llegar a ser de 50cm y en ayuno extenso se reduce a 15cm.

El apareamiento es poliginico o promiscuo, ocurre durante 4 a 5 meses, en las de hemisferio sur desde julio hasta noviembre o diciembre. En esta época las hembras están siempre receptivas a los machos. La gestación dura mas o menos 10 meses, y el cuidado materno se da en todas las especies. En el inicio del ciclo de migración las madres y sus crías van juntas hacia la zona de alimentación, solo se detienen a amamantar. Ver imagen A7.

A7. Imagen apareamiento, y Ballena con cría en superficie e inmersión



Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo y José Ignacio Rozo Carvajal.

Para identificación y observación de ellas se usa:

1. Secuencia de respiración
2. Forma del “Geiser” o soplo
3. Forma y pigmentación de las aletas
4. Tamaño del grupo

Las yubartas efectúan varios típicos de actividades como saltos de giro, de cola, de vientre, coletazos (espalda y vientre), exposición de la cola fuera del agua al sumergirse, mantenimiento de la cola fuera del agua, levantamiento de la cabeza, giros del cuerpo en la superficie, arqueamiento de dorso y aletazos. La interpretación de estos comportamientos aun es un misterio, pero se sabe que se presentan en su mayoría en las zonas de reproducción, aunque se piensa que puede ser muestra de excitación, comunicar una posición, facilitar el desprendimiento de piel muerta o algunos parásitos, ubicar objetos flotantes, por diversión.

Para evitar el “recalentamiento” cuando la ballena nada activamente en aguas tropicales, debido al calor que acumula en el cuerpo por efecto de la capa grasa, el sistema contracorriente de los vasos sanguíneos hace que las venas (de las regiones del cuerpo poco aisladas) cedan el calor de la sangre circulante al aire o al agua y baje la temperatura corporal. Las ballenas tienen el sistema de conducción más evolucionado dentro de los mamíferos. El corazón de la ballena Azul puede alcanzar el tamaño de un automóvil pequeño, 4000 veces más grande que el corazón humano.

El músculo cardíaco pesa aproximadamente 2 toneladas, mueve hasta 1000 litros de sangre por contracción y sus válvulas son del tamaño de una rueda de automóvil. Se ha observado que la aorta de estas ballenas alcanza a medir 45cm de diámetro, en las ballenas Azules el Haz de His y las fibras de Purkinje se transformaron en los sistemas más rápidos y eficientes de conducción eléctrica, si se comparan con los de otros mamíferos. Ver imagen A8.

A8. Tamaño del corazón de la ballena jorobada



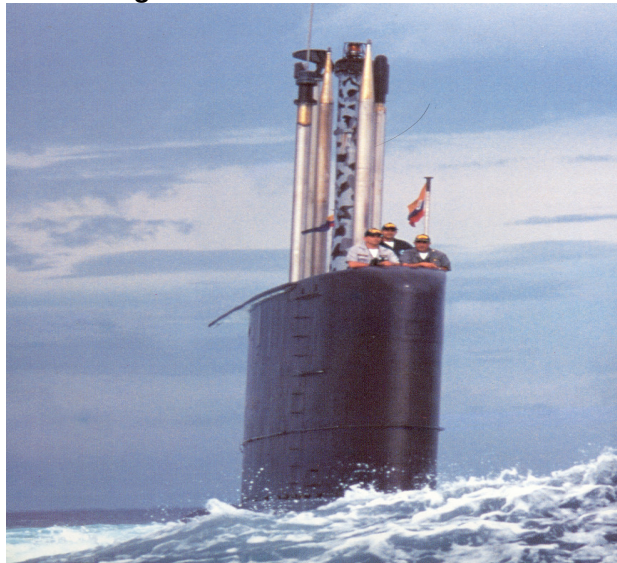
Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo y José Ignacio Rozo Carvajal.

ANEXO B. LA EXPEDICION AL CORAZON DE LA YUBARTA

B.1 LOS SUBMARINOS

Después de un seminario “taller” de investigación electrocardiográfica en ballenas, en la base Naval ARC Málaga, de la Armada Nacional en el océano pacifico, se propuso “emplear las capacidades de los sensores del sonar pasivo de los submarinos oceánicos” como plataforma de trabajo para la investigación en fonocardiografía de las ballenas.”¹⁴

Figura 65. Submarino ARC PIJAO



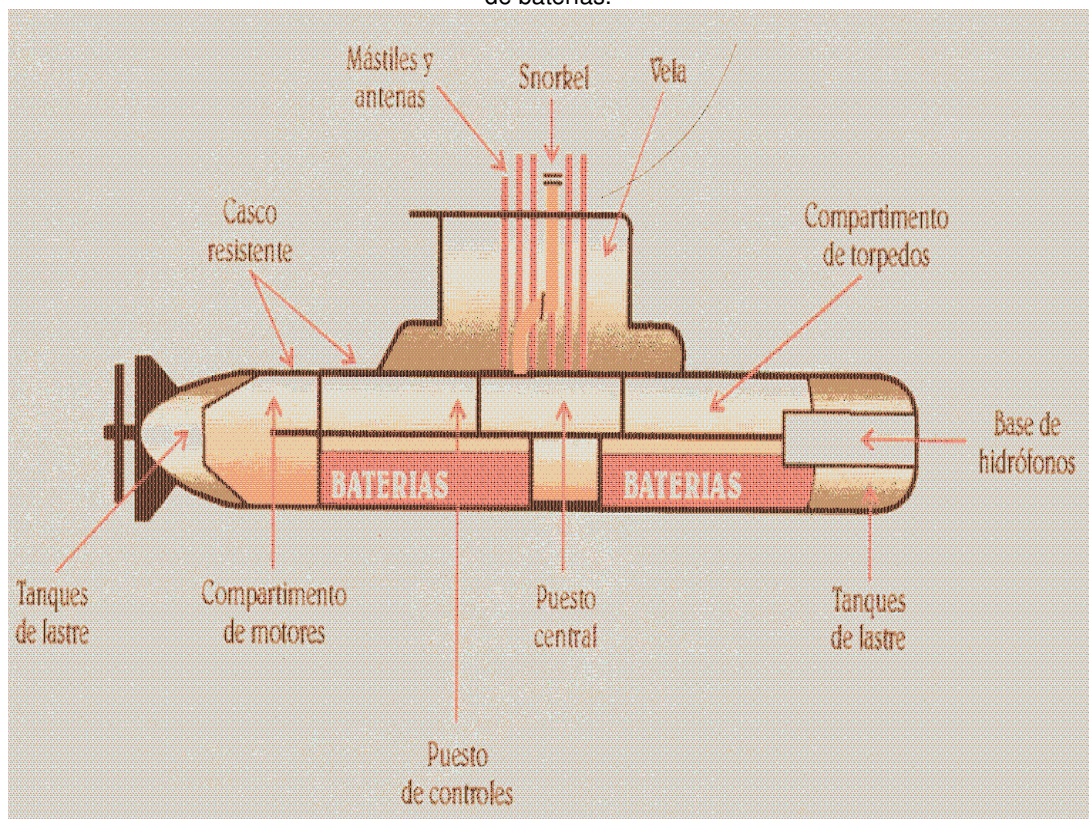
Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo y José Ignacio Rozo Carvajal

Un submarino oceánico permite ubicar, aproximar y realizar un seguimiento objetivo discretamente. Logrando una mínima interferencia a la actividad y hábitat normal de la ballena, gracias a la baja producción de ruidos artificiales que generan los equipos abordo, y la habilidad del submarino de mantener una posición estática, que permite garantizar la seguridad e integridad del animal.

¹⁴ Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo, José Ignacio Rozo Carvajal, cita del Comandante de la Fuerza Naval del Pacífico y oficial submarinista, contralmirante José Ignacio Rozo Carvajal

Este submarino es una plataforma móvil con autonomía para desplazarse en el mar trabaja habitualmente en inmersión. Su hidrodinámica hace que alcance velocidades superiores a 40 millas /hora, con gran maniobrabilidad y bajo nivel de ruido. Se sumerge hasta 200m sin problemas y el punto crítico es a 500m. Tiene propulsión eléctrica, necesita 4 grupos de baterías de 120 elementos cada uno. Necesita 4 motores diesel que se usan como generadores de corriente continua para la carga de las baterías. Ver figura 66.

Figura 66. Distribución interior de un submarino oceánico de construcción alemana, perteneciente a la Armada Nacional, donde se puede observar la ubicación de los hidrófonos del sonar pasivo y los grupos de baterías.



Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo y José Ignacio Rozo Carvajal

Un submarino esta formado por 4 compartimentos: el de torpedos, el puesto central, el puesto de controles y el compartimento de motores, las baterías están bajo la cubierta principal interior. El diseño de un submarino oceánico convencional obedecer la aplicación de conceptos hidrodinámicos, que hacen mas fácil su movilidad en el mar, disminuyen la perturbación en el hábitat, y su propulsión eléctrica lo hace muy silencioso.

Para el control del ruido hacia el exterior el submarino dispone de equipos de control de emisiones de sensores instalados en diferentes partes del exterior del casco. En navegación silenciosa se desactivan las bombas de enfriamiento, aire acondicionado. Las comunicaciones al interior se hacen con ayuda del sistema de micrófonos de alta sensibilidad y auriculares, todo esto lo hace muy silencioso en el mar.

El sonar pasivo esta equipado con una base acústica de 180 base triples de hidrófonos de alta sensibilidad, colocados en la proa. Para determinar la posición se usan los satélites (GPS), además usa un radar y un sistema de detección de blancos con alcance de 60millas náuticas y dos periscopios. Posee un teléfono submarino para comunicación acústica, un ecosonda para control de profundidad, un batitermografo y medidor de velocidad de sonido y un equipo analizador de trazo de sonido en el agua.

Tabla 6. Características de los submarinos

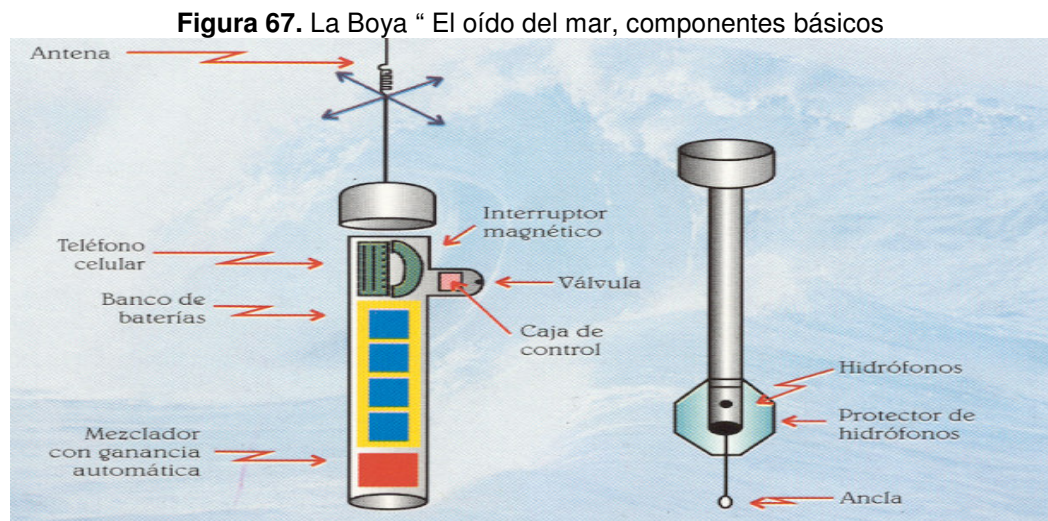
CARACTERISTICAS DE LOS SUBMARINOS OCEANICOS DE LA ARMADA NACIONAL DE COLOMBIA	
Eslora(longitud)	55.8m
Manga(diámetro)	6.2m
Calado	5.2m
Desplazamiento en superficie	1.180m ³
Desplazamiento en inmersión	1.280m ³
Profundidad máxima	200m
Autonomía	40 días
Velocidad de crucero en inmersión	7 nudos
Tripulación Oficiales	7
Tripulación suboficiales	27

Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo y José Ignacio Rozo Carvajal

B2. LA BOYA “ EL OIDO DEL MAR”

Es un sistema automático que permite detectar los sonidos omnidireccionalmente del mar, producidos bajo la superficie y permite transmitirlo por una red de telefonía celular. Esta consiste en un cilindro donde hay un sistema de hidrófonos omnidireccionales. Las señales captadas se

envían a una etapa de preamplificación, luego pasa a un circuito amplificador que la conecta luego al teléfono celular, programado con respuesta automática a la llamada y a la desconexión.



Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo y José Ignacio Roza Carvajal

La salida de antena del teléfono se conecta a una antena en la parte superior de la boya. La energía que necesita para funcionar se la dan 4 baterías alcalinas de 6 voltios, pero solo puede trabajar por unas pocas horas, para recargarlas se usa un arreglo de celdas fotovoltaicas de alta eficiencia.

B.3 CRUCEROS AL CORAZON DE LAS BALLENAS

I CRUCERO

Se realizó a bordo del submarino de la Armada Nacional ARC Pijao, entre el 20 de septiembre y el 7 de octubre de 1994. Su objetivo realizar un estudio de fisiología cardíaca por medio de la fonocardiografía en ballenas, mediante métodos no invasivos. Se buscaba probar que con ayuda de bases acústicas del sonar pasivo del submarino, registrar los cantos y demás sonidos producidos en el mar por las ballenas, tratando de ver si se podía detectar sonidos del corazón por medio de análisis de señales.

El procedimiento para el acercamiento al animal consistió en asumir que el animal fuese un buque enemigo, después de ser detectado por medios visuales o electromagnéticos (radar), se realizaría la aproximación a una distancia de 500 yardas.

El comportamiento de una ballena frente a un buque de superficie es particular, la ballena navega a una profundidad cercana a la superficie, lo cual facilita el contacto permanente del submarino y la ballena, manteniendo el mismo canal de sonido. La velocidad máxima de la ballena es 4 nudos, pero realiza saltos, giros y cambios de dirección hasta de 180 grados en fracción de segundos, esto sumado a la gran variedad de frecuencias presentes en los cantos y ruidos producidos por ellas desconcierta a los operadores del sonar.

El seguimiento y monitoreo con el sonar pasivo permitió grabar los sonidos de los cantos de 20 ballenas, este primer crucero permitió iniciar la investigación acústica, el procedimiento se realizó con el submarino en inmersión a profundidad de periscopio, aproximadamente 45 pies, con sensores activos y asegurados, para evitar perturbaciones acústicas. Se procuró que el nivel de ruidos generados por el submarino fuera mínimo, la velocidad de maniobra abarcó de 0 nudos hasta 8 nudos, que es la máxima velocidad a profundidad de periscopio.

Se buscó que mantener contacto y seleccionar si fuera posible un individuo que permitiera realizar grabaciones hasta una distancia de 4 millas náuticas, hasta una mínima distancia de 500 yardas, sin riesgo de perder seguridad tanto para el submarino como para el animal.

II CRUCERO

Realizado del 28 de septiembre al 7 de octubre de 1995, en el submarino oceánico ARC Tayrona, comandado por el capitán de fragata Cesar Fernández Barreto. También se uso el buque oceánico ARC Quindío como apoyo donde iban biólogos y periodistas, mientras que en el submarino principal, estaba el equipo de investigación comandado por el Dr. Jorge Reynolds Pombo, donde contaba con cardiólogos, ingenieros electrónicos y eléctricos.

Para esta ocasión se adapto al sonar del submarino una consola de audio que permitió grabar en sistema análogo y digital. El total de la grabación fueron 26 horas, en 2 días, desde la madrugada hasta entrada la noche. Se usaron otra vez como referencia para hallar a las ballenas, sus cantos, buscando que el sonido llegara a estar por encima de los 40dB.

Se utilizo para el procesamiento y análisis de la señal la construcción de un laboratorio, un filtro electrónico, y además el uso del software "Labview" de instrumentación virtual. Los resultados de este crucero permitieron establecer que la frecuencia cardiaca de la ballena, baja oscilando entre 3 y 6 contracciones por minuto, cuando descienden a profundidad, la presencia del submarino no altera el comportamiento de los animales, se puede usar la fonocardiografía para el estudio de las frecuencias cardiacas de animales submarinos, y dentro de las grabaciones de los cantos de las ballenas pueden quedar incluidos los sonidos de la actividad cardiaca de los cetáceos.

III CRUCERO

Se realizo a bordo del submarino ARC Tayrona, entre el 15 y 20 de septiembre de 1996, bajo el comando del capitán de Fragata Cesar Fernández Barreto, con apoyo del buque oceanográfico ARC Gorgona.

Su objetivo realizar mas grabaciones en sistema digital y análogo, análogas de FM y procesamiento en tiempo real de las señales de audio con instrumentación virtual. Durante este crucero se hicieron las primeras pruebas de una boya dispositivo llamada “el oído del mar”, buscando poder transmitir vía telefonía celular, los sonidos obtenidos bajo la superficie del mar.

IV CRUCERO

Realizado del 10 al 16 de septiembre de 1997, en el ARC Tayrona, comandado por el capitán de fragata Alejandro Vidal, como buque de apoyo ARC Providencia. Se encontró un grupo numeroso de ballenas y luego usando las experiencias anteriores para lograr eliminar las posibles interferencias acústicas y mejorar los sonidos obtenidos para lo cual determinaron:

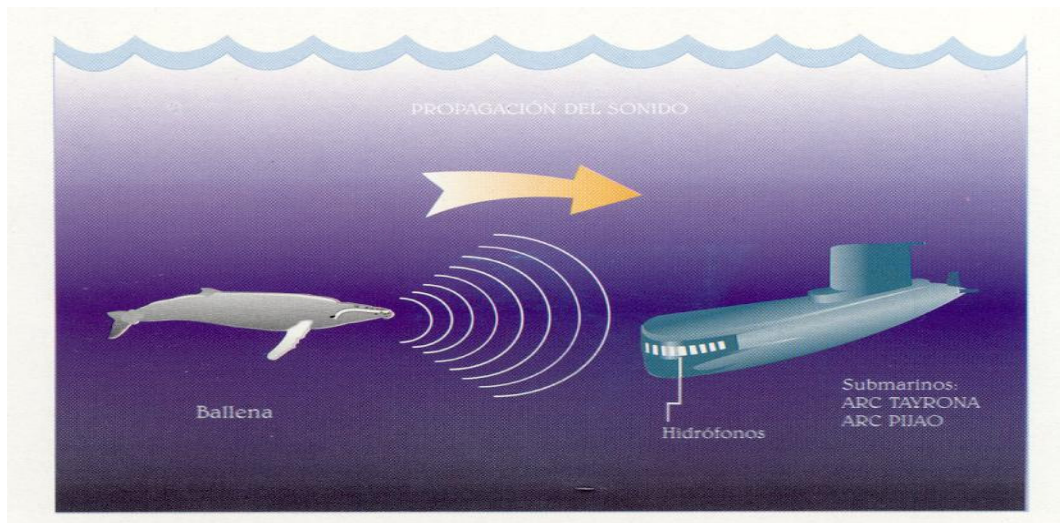
1. Al detectar el grupo de yubartas, el submarino se detiene, haciendo seguimiento con el sonar por el mayor tiempo posible.
2. Grabar el sonido ambiente con el submarino sin propulsión
3. No usar filtros de corte de bajas frecuencias del sonar, para evitar eliminación de posible información que no se hubiera registrado antes.
4. Estandarizar las grabaciones en los sistemas análogo y digital
5. Grabar por un sistema de frecuencia modulada, teniendo así mayor margen de grabación a altas y bajas frecuencias sin límite de ancho de banda.
6. Recibir mayor información del funcionamiento del sonar pasivo.
7. Extender el horario de guardia para obtener la mayor información posible.

ANEXO C. FONOCARDIOGRAFIA EN BALLENAS

C.1 ESTADO DEL ARTE

El uso de las bases acústicas del sonar pasivo en la investigación realizada acerca del corazón de las ballenas jorobadas por medio de la fonocardiografía permitió superar los problemas que se presentaron en las anteriores expediciones.

Figura 68. Presentación conceptual de la detección acústica de los cantos de las ballenas con el sonar pasivo del submarino: Investigación Submarina en el corazón de la ballena



Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo y José Ignacio Rozo Carvajal.

El submarino permitió realizar un seguimiento de la ballena en su hábitat natural (Ver figura 68), logrando reducir el estrés que se le podría generar al animal bajo otras condiciones; obteniendo una mayor información con una gran confiabilidad, además de saber que se tiene una mayor fidelidad en los equipos de la plataforma submarina.

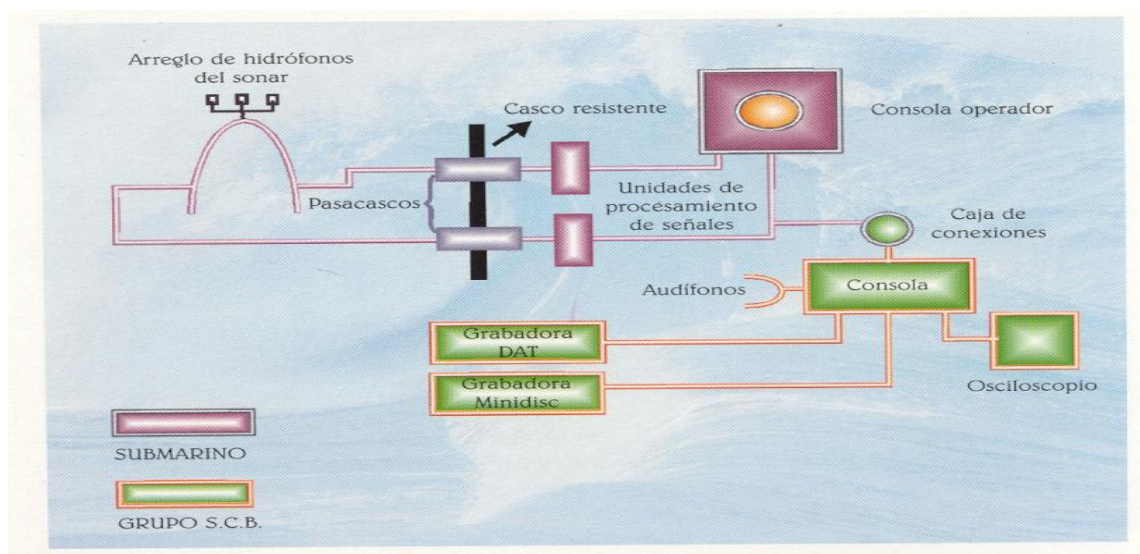
En el proceso de registro de la información se conecto a la consola del operador del sonar, una grabadora análoga y una digital. Para el trabajo de procesamiento de las señales se uso:

- Un computador personal con procesador 486 DX2 de 66 MHz de velocidad y disco duro de 850Mbytes.
- Software Sound Blaster 16, Creative Labs Inc, de 16 bits.
- Software LabView de National Instruments.

C.1.1 REALIZACION DE GRABACIONES

Mediante el uso del sonar pasivo, operado en la misma manera que habitualmente se hace en el buque para detección de otros submarinos de Guerra enemigos, se realizo la búsqueda de las ballenas por medio de la detección de sus cantos.

Figura 69. Interfaz entre el sonar pasivo del submarino y los equipos de grabación del “Grupo de Seguimiento”



Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo y José Ignacio Rozo Carvajal.

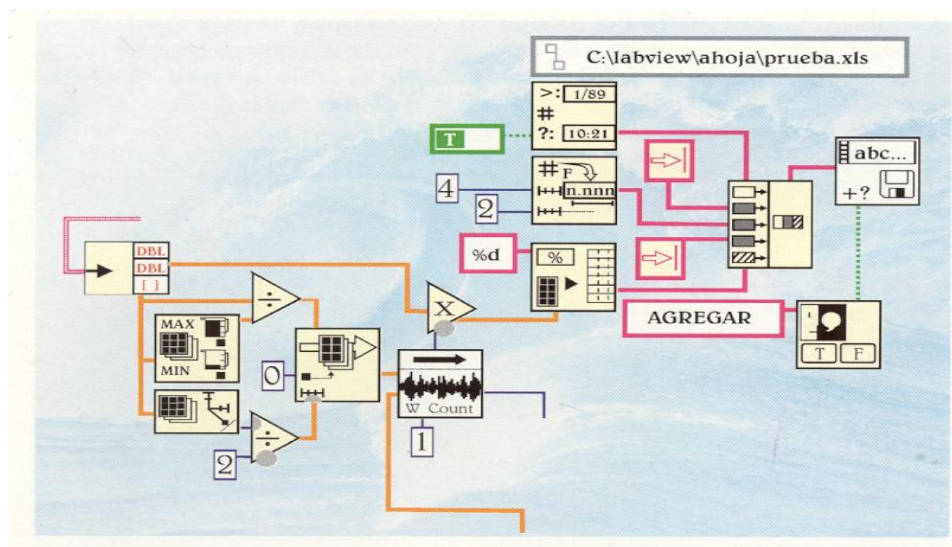
Las grabaciones que fueron realizadas en el sistema análogo a través de la consola de audio conectada al sonar en forma directa (Ver figura 69). Estas grabaciones se realizaron en forma continua por varias horas. Luego fueron grabadas en el sistema digital DAT y minidisc. Se tuvieron en cuenta los sonidos que tenían intensidades mayores a 40 dB es así como en total se lograron registrar 26 horas de grabación.

C.1.2 EVALUACION DE LAS GRABACIONES

Escuchando cuidadosamente las grabaciones, lograron encontrar momentos en los que se podría decir habría sonidos cardiacos de la ballena. Determinaron la Identificación de los sonidos cardiacos basándose en las características que poseen los mamíferos, como: sonidos fuertes, reconocibles, generados por el ventrículo durante la diástole y sístole.

Después del proceso de filtrado realizaron la visualización del resultado para determinar si era necesario realizar cambios en tiempo y magnitud, de los sonidos que se creían eran del corazón de la ballena. La señal se proceso por medio de el software Sound Blaster y LabView (Ver imagen E.3), en este último se hizo el análisis de estos sonidos usando elementos de estudio de señales.

Figura 70. Diagrama de instrumento virtual denominado “HOJA VI”.



Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo y José Ignacio Rozo Carvajal.

Para seguir el proceso de análisis se hallaron los espectros de potencias y graficas de magnitud relacionadas con el tiempo, para poder afirmar si estos eventos son producidos por el corazón y determinar características de los mismos. Lograron identificar secuencias¹⁵ de eventos¹⁶ cardiacos, una de 2.5 minutos, otra de 5 minutos, y 7 eventos diferentes.

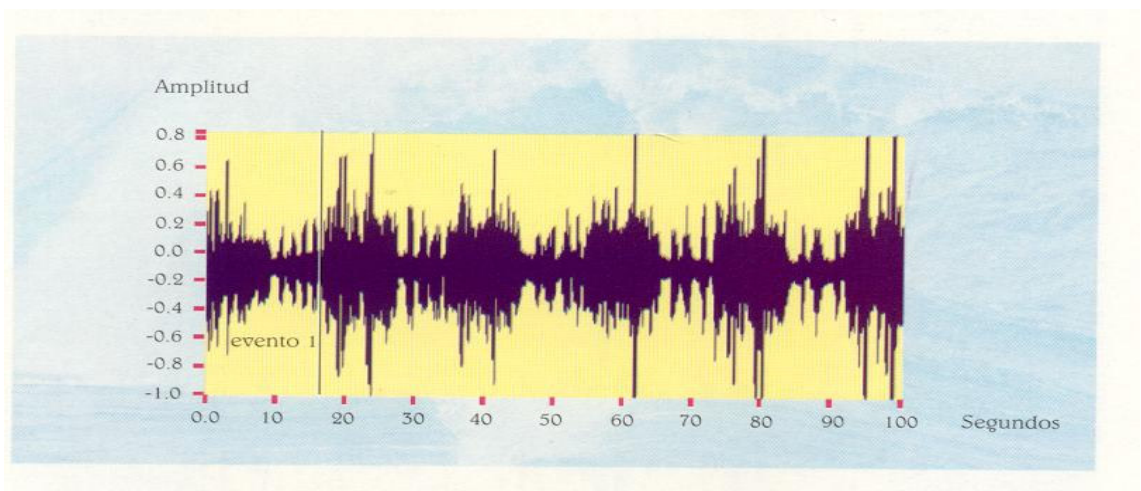
La secuencia 1 dura 160 seg. o 2.4 minutos, donde se encuentran 7 eventos cardiacos. Estos en orden tienen la siguiente duración: (ver figura 71)

¹⁵ Secuencia: Serie consecutiva con respecto al tiempo de eventos.

¹⁶ Evento: En PCG humano se llama al ciclo cardiaco. Se ve como primer y segundo ruido que se asocia en ECG con el QRST.

- | | |
|--------------|--------------|
| 1. 16.8 seg. | 5. 19.5 seg. |
| 2. 17.5 seg. | 6. 17.6 seg. |
| 3. 19.8 seg. | 7. 18.9 seg. |
| 4. 18.3 seg. | |

Figura 71. Patrón fonocardiografico de la secuencia denominada en el estudio como “uno”



Viaje al corazón de las ballenas, Jorge Reynolds Pombo y José Ignacio Rozo Carvajal.

La secuencia 2, dura 300 segundos o 5 minutos, donde se identifican 18 eventos cardíacos. En orden cronológico tiene la siguiente duración:

- | | |
|---------------|---------------|
| 1. 16 seg. | 12. 17 seg. |
| 2. 14.7 seg. | 13. 18 seg. |
| 3. 17 seg. | 14. 18.3 seg. |
| 4. 14.2 seg. | 15. 17.7 seg. |
| 5. 14.2 seg. | 16. 19.5 seg. |
| 6. 14.6 seg. | 17. 19 seg. |
| 7. 14.5 seg. | 18. 16.5seg. |
| 8. 15 seg. | |
| 9. 16.1 seg. | |
| 10. 13.3 seg. | |
| 11. 14.9 seg. | |

Los siete eventos independientes tienen diferencia en cuanto a su duración en tiempo:

Primer evento	18 seg.
Segundo evento	8.6 seg.
Tercer evento	13.3 seg.
Cuarto evento	15.2 seg.
Quinto evento	14.8 seg.
Sexto evento	15.2 seg.
Séptimo evento	19 seg.

C.1.3 ANÁLISIS DE LA INFORMACION

Las señales registradas en los diferentes equipos no fueron modificadas en el momento de su adquisición. Con ayuda de filtros se procesaron las grabaciones para eliminar la mayor cantidad de frecuencias que correspondían tanto a los cantos de las ballenas como a otros ruidos espurios, obteniéndose así los sonidos cardiacos.

Se sabe que las grabaciones realizadas fueron en inmersión por las siguientes razones:

- Varios científicos entre los cuales esta el Dr. Royer Payne dicen que las ballenas no cantan cuando están en superficie.
- El sonar solo puede detectar sonidos submarinos.

También se tuvieron en cuenta varios criterios, para poder afirmar que los sonidos obtenidos después del proceso de filtrado eran correspondientes a los generados por el corazón de una ballena:

1. Un corazón tan grande como el de este animal debe producir ruidos perceptibles al oído humano.
2. El corazón tiene una actividad periódica y constante, por lo cual su sonido debe ser similar al del corazón humano y al de otros mamíferos, ósea que debe tener una periodicidad, una frecuencia constante y que tenga similitud en diferentes muestras tomadas.

Como el corazón por sus características físicas, produce sonidos en el rango de las bajas frecuencias, tomaron la primera decisión de realizar el filtrado para frecuencias por encima de los 500Hz, luego por debajo de este rango hallaron cantos que creyeron podían esconder los ruidos cardiacos. Luego Establecieron como limite del filtrado los 390Hz, pues hicieron pruebas en las cuales encontraron que por debajo de este rango era posible que llegaran a eliminar frecuencias posiblemente correspondientes a ruidos cardiacos.

Con los eventos identificados se realizo una comparación entre el tiempo del suceso y el tiempo que se observaba en la grafica. Luego una relación entre los eventos por su forma, periodicidad en la secuencia y duración, encontrando que la

duración variaba por efecto de la constante actividad del animal lo que hacía variar la velocidad de circulación de sangre y su ritmo cardiaco.

Se mantuvo la suposición de tener solo presencia de un solo animal, por tener el submarino a una velocidad constante por debajo de los 6 nudos, y que el eje

del sonar estaba siempre orientado en el mismo punto durante largos periodos de tiempo.

Para las secuencias, el espectro se realizó con varios eventos, en la secuencia dos solo se analizaron los siete eventos simultáneamente, por la capacidad de memoria del computador, pero se pudo analizar cada evento por separado.

Analizando los espectros de secuencias con sus eventos, como de espectros con eventos independientes, se lograron observar que los picos más importantes mantienen iguales valores de frecuencia. El primero pico está entre 50 y 60 Hz, el segundo y tercero entre 80 y 90 Hz, con un pequeño pico intermedio, el cuarto pico está cerca de 170Hz.

La potencia de los cantos es menor que la de los cuatro picos, esto permitió decir que los eventos son producidos por una misma actividad, a la que ya se le había determinado periodicidad, forma y duración similares.

C.1.4 ANÁLISIS FOURIER

En base a los resultados obtenidos por medio de la instrumentación virtual, se obtuvo una visualización del espectro de la señal. Con los datos obtenidos se reafirmo la teoría que los sonidos percibidos eran realmente ruidos cardiacos. Se procesaron estas señales de diferentes secuencias como una sola y ciclo por ciclo, al igual que los eventos cardiacos en forma individual y se obtuvieron espectros con una buena exactitud.

C.1.5 ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL

Las señales son mostradas tridimensionalmente en una grafica bidimensional, donde cada eje tiene su significado, frecuencia, tiempo y una escala de grises o colores para la potencia, al observar la grafica y compararla con los análisis de tiempo y frecuencia se ve como estos dos análisis gráficos se relacionan y afirman entre ellos.

El inicio del ciclo encontrado coincide con un silencio de frecuencias, hay una periodicidad aparente en estos, en los mismos periodos de tiempo que se identifican como comienzos de cada ciclo. Al realizar un análisis tramo a tramo se observa las variaciones de potencias de las diferentes frecuencias, ósea que al finalizar cada ciclo existe un grupo de frecuencias con aumento de potencia y esto se repite en todos los ciclos.

En los resultados obtenidos se reflejan casi una huella espectral y de tiempo del ciclo cardiaco de la ballena aunque la señal aun presenta ruido marino. Si las señales obtenidas no son de la misma fuente no se presentaría repetición de sus espectros de frecuencias y su grafica de tiempo simultáneamente y en forma periódica.

C.1.6 ALCANCE DE LOS RESULTADOS

Lograron comprobar la validez de la metodología para obtener el fonocardiograma del corazón de la ballena jorobaza por medio del sonar pasivo de un submarino.

Demostraron que era posible realizar un estudio del PCG a través de un método continuo de análisis de señales, aunque no se filtrara todo el ruido espurio presente.

Identificaron el espectro de un evento cardiaco completo, con las características generales de cada ruido.

Y establecieron como trabajos futuros:

1. Encontrar la relación de cada sonido con su función fisiológica
2. Estudiar las variaciones de frecuencia y magnitud de cada evento con la profundidad alcanzada por la ballena
3. Optimizar el sistema de adquisición de la señal acústica bajo el agua

4. Estudiar las limitaciones de los hidrófonos y equipos de procesamiento para el análisis de las bajas frecuencias.

ANEXO D. EL SONAR

La palabra **SONAR** es el acrónimo inglés de **SO**und **NA**avigation and **R**anging y es el equipo necesario para determinar por medio del sonido la presencia, localización o naturaleza de objetos en el mar.

Las ondas acústicas son longitudinales, el sonido aumenta su velocidad a medida que decrece la compresibilidad del medio, lo que tiene una enorme incidencia en el aspecto de la propagación. En el mar la compresibilidad es función de variables como la salinidad, la temperatura y la presión.

D.1 TIPOS DE SONAR

Básicamente hay dos tipos de Sonar: pasivo y activo.

Sonar Activo: Para detectar objetos bajo el agua, emplea el eco devuelto por dicho objeto al incidir sobre él las ondas acústicas emitidas por un transmisor. El objeto sobre el que inciden las ondas devolverá parte de ellas. El camino recorrido por las ondas es el doble del camino entre emisor y objeto.

Sonar Pasivo: escucha directamente los sonidos de los objetos que permanecen sumergidos. En este caso la onda recorre únicamente la distancia entre el objeto y el receptor.

Hay diferentes criterios para elegir uno u otro tipo de Sonar. Los más comunes son:

Tabla 7. Criterios para el tipo de sonar

Criterio	Activo	Pasivo
Alcance	Menor	Mayor
Obtención de distancia	Si	No
Detección de contactos no ruidosos	Si	No

El sonar activo y el pasivo es complementan para efectuar la detección y análisis de objetos sumergidos.

D.2 FUNCIONAMIENTO

D.2.1 EL SONAR PASIVO

Está formado por 3 subsistemas:

1. Captación de la señal.
2. Procesado de la señal.
3. Lectura y medición de la señal procesada.

La captación se realiza mediante un conjunto de hidrófonos colocados en la disposición que más convenga según el rango de frecuencias en el que se pretende utilizar.

Un rango de frecuencias elevado requiere una disposición en forma cilíndrica o esférica. El ruido debido a la propia plataforma no afecta mucho a estas frecuencias. No obstante si le afecta el ruido producido por el movimiento de la plataforma en el agua, y con esta disposición cilíndrica o esférica se mejora la respuesta.

Un rango de frecuencias bajas si que se verá afectado por el ruido de la propia plataforma. Por ello se usa una disposición en array de los hidrófonos para que puedan ser remolcados a suficiente distancia de la plataforma como para eliminar

el ruido. La señal que se recibe se amplifica y se filtra antes de tratarse, para contrarrestar la atenuación y eliminar el ruido fuera de banda.

El tratamiento de la señal es primero una detección electrónica de la dirección de origen, una escucha por parte de un operador, y una representación visual y registro gráfico. La señal procesada entra a un subsistema de medición y escucha por un operador y a otros equipos que permitan identificar el objeto. La señal digital obtenida se usa para elaborar los gráficos y demás representaciones visuales. Así pues la señal sufre un doble tratamiento, analógico y digital.

D.2.2 EL SONAR ACTIVO

Se fundamenta en la detección del eco devuelto por un objeto sumergido al incidir sobre él un tren de ondas acústicas emitidas por un proyector, para detectar objetos sumergidos y obtener información de su dirección, distancia y analizar su movimiento. También puede funcionar como sonar pasivo con restricciones en la dureza del transductor y un menor rango de frecuencias de operación.

D.2.2.1 Posee 5 subsistemas:

D.2.2.1.1 Base acústica: La base acústica suele ser un El receptor pasivo funciona igual que en el caso del sonar pasivo.

D.2.2.1.2 Selección y conmutación: Se encarga de seleccionar el modo adecuado de funcionamiento del sonar, activo o pasivo, así como de conmutar del emisor al receptor una vez que se ha realizado la emisión en el sonar activo. Así el funcionamiento en modo activo consiste en una alternancia de períodos de emisión y recepción. Conociendo la velocidad de propagación del sonido en el agua, se puede calcular la distancia al llegar el eco, según el tiempo que tardó.

D.2.2.1.3 Emisor: El emisor es el encargado de formar el impulso eléctrico conocido como "ping sonar". Este pulso se forma a partir de un oscilador que genera una onda continua que se aplica a un dispositivo de disparo. El pulso se amplifica y se aplica al transductor mediante un adaptador de impedancia y el circuito de conmutación.

D.2.2.1.4 Receptor: Sólo interesa recibir un rango pequeño de frecuencias centrado en la frecuencia de emisión. El eco emitido por los objetos al incidir sobre ellos la onda, está ligeramente desplazado en frecuencia respecto de la frecuencia de emisión, y por ello se amplía el rango de emisión a una pequeña banda, y no únicamente a la frecuencia de emisión. Así mismo, la ganancia del amplificador en recepción es variable en el tiempo, para no amplificar más los ecos cercanos anulando los lejanos.

D.2.2.1.5 Lectura y procesado de la señal recibida: Se trata la señal de dos formas, analógica, resultando una señal de audio que va a un operador, y digital, usada en la representación gráfica de la señal.

D.3 ANÁLISIS DE LOS ECOS

Cuando se utiliza el sonar activo el análisis se centra en los ecos devueltos por el objeto sobre el que incide la onda emitida. La detección permite conocer la dirección y la distancia a la que se encuentra el eco desde el transmisor, si se conoce la velocidad del sonido en el agua. Si no se conoce la velocidad, se puede promediar con una cantidad representativa de la celeridad para la latitud en la que se encuentren el emisor y el eco. El pequeño error cometido no introduce un error sustancial en la distancia obtenida.

A partir de las direcciones y distancias obtenidas se puede determinar la dirección del objetivo. Así podemos distinguir también si se trata de un objeto móvil o inmóvil. Al conocer su dirección en el caso de un móvil, se puede realizar un seguimiento de forma automática.

El efecto Doppler que presenta el eco permite apreciar el movimiento relativo y el aspecto o posición que tiene el contacto respecto al emisor. El timbre permite apreciar la cualidad sonora del eco. Así podemos identificar un submarino o un animal biológico. La duración y anchura del eco permite evaluar la geometría del contacto y la posición relativa del mismo.

D.4 ANÁLISIS DE BANDA ANCHA

Es el realizado con sonar pasivo en toda la banda de frecuencias que maneja el transductor. Se realiza escuchando directamente el sonido del mar, para ello se necesita mucha experiencia, para la identificación del origen de la señal recibida. El efecto de cavitación y el batido de una hélice permite contar las revoluciones a las que gira, con lo que puede lograrse una aproximación de la velocidad que lleva el barco detectado. El ruido de propulsión es la mayor fuente de datos de la escucha, permite conocer el tipo de propulsión, diesel, turbinas de gas o vapor, motores eléctricos. Hay otros ruidos detectables no permanentes, como los de máquinas auxiliares y ruidos transitorios.

El sonar pasivo, a diferencia del activo, no permite obtener las distancias al contacto, pero las distancias de detección son mayores y permiten obtener gráficos de tiempo-dirección a partir de los cuales se puede obtener la dirección, velocidad y distancia del contacto (mediante un proceso asistido por ordenador).