

## **Análisis y Caracterización de los Sonidos Cardiacos de una Ballena Jorobada Adulta en su Entorno Natural**

Maribel Anaya Vejar\* Nancy Elizabeth Rubiano\*  
Arturo Plata\* Jorge Reynolds Pombo†

Fecha de Recibido: 02/06/2008 Fecha de Aprobación: 10/10/2008

### **Resumen**

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, Se realiza el filtrado de seis pistas cuyo contenido eran los cantos de ballenas jorobadas para obtener los sonidos cardiacos los cuales se encontraban mezclados con los cantos. Para esto se uso la descomposición multinivel de la transformada Wavelet implementando un algoritmo en Matlab.

**Palabras clave:** *Ballena Jorobada, Transformada Wavelet, sonidos cardiacos, descomposición multinivel, umbralización, envolvente de energía temporal.*

### **Abstract**

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.

We present a material which initially posed a problem in the signal processing and sound, filtering is performed six tracks whose contents were chants of humpback whales to obtain the cardiac sounds which were mixed with the chants. This will use the decomposition of multilevel Wavelet transform implemented an algorithm in Matlab.

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

---

\* Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, maribel\_anaya\_v@yahoo.com, aplata@uis.edu.co

† Fundación seguimiento del corazón de las Ballenas vía satélite, Bogotá, jorgereynolds@hotmail.com

## **1 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 [1].

El presente trabajo 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. Este trabajo es un avance de los estudios de los grupos de investigación Seguimiento al Corazón Vía Satélite (SCVS) y Control, Electrónica, Modelado y Simulación (CEMOS) 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.

## **2 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 [2].

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 [2,3]. Figura 1.

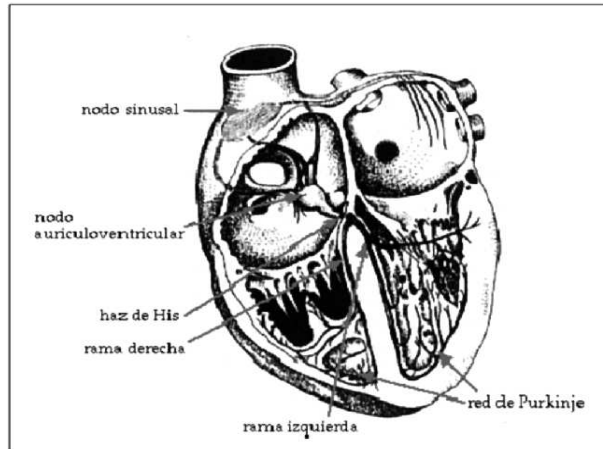


Figura 1. Sistema específico de conducción del corazón adaptado de [5]

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, tal como se ve en la Figura 2.

**2.1 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, la "duración" aproximada de la onda P es de 0.06 seg). [3,4]

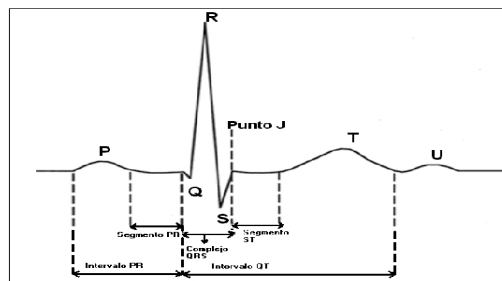


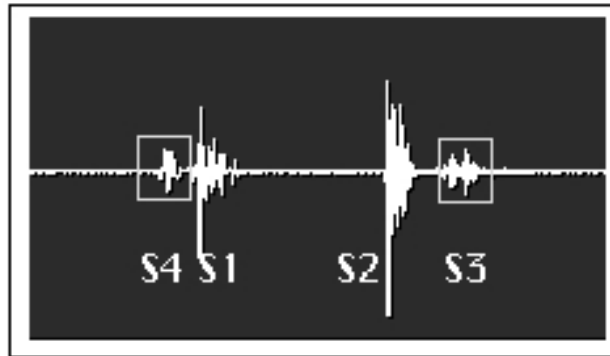
Figura 2. Trazado electrocardiográfico normal ondas, intervalos y segmentos que representan la actividad eléctrica del corazón. adaptado de [6]

**2.2 Complejo QRS** Es producido por la despolarización (activación) ventricular, su duración 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. [3,4,5]

**2.3 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". [4]

**2.4 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. [2]

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 3. [4]



**Figura 3.** Fonocardiograma Normal Humano. Adaptado de [4]

El corazón normal está formado por cuatro cámaras, dos aurículas y dos ventrículos, además posee cuatro válvulas que se abren y cierran para controlar la dirección del flujo de sangre cuando el corazón late.

Los hechos que ocurren desde el comienzo de un latido hasta el comienzo del siguiente se conocen como Ciclo Cardíaco este 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. Al auscultar se escucha el cierre de 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. [4,7]

Los ruidos producidos por el corazón son llamados:

**Primer Sonido Cardíaco.** Este sonido se produce al iniciarse la sístole ventricular es producido por el cierre de la válvula mitral y la válvula tricúspide; su duración es aproximadamente de 150ms y sus componentes de frecuencia se encuentran en el rango de 50-140Hz. [4,8,10]

**Segundo Sonido Cardíaco:** Ocurre al final de la sístole ventricular, es causado por el cierre de las válvulas semilunares aórtica y pulmonar. 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 cardíaco tiene componentes de frecuencias de 10-400Hz. [4, 9]

**Tercer Sonido Cardíaco.** 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. [4, 5,10]

**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. [4, 5,10]

### 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 [11,16]. 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 esta.

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 [12,13]. Existen varias transformadas las cuales van a depender de ciertas características de la señal, por lo general las más utilizadas son:

- Transformada de Fourier comúnmente conocida como FT.
- Transformada de Tiempo Corto de Fourier, denominada también como STFT.
- 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 y al efectuar cualquiera de las dos la información obtenida no sería útil ya que se tendría el contenido frecuencial pero no se sabría el instante en que sucede. [14,15]

Entre tanto al hacer uso de la Transformada wavelet (WT) 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 [18,19]; ya que las señales a trabajar en este proyecto son señales biológicas (señales no estacionarias) es la WT la utilizada para procesamiento de estas señales.

## 4 Filtrado de los cantos de la ballena

El interés por el estudio de grabaciones submarinas en las que se escuchan “cliks” 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. [1]

A partir de estas investigaciones se plantearon especulaciones teóricas que permitían asumir que dentro de las grabaciones de los cantos de las ballenas, podían quedar registrados los sonidos producidos por el funcionamiento del corazón, siendo estos cantos las señales iniciales para este proyecto los cuales fueron obtenidos por medio de las grabaciones de un submarino de la armada colombiana en uno de los cruceros realizados por el DR. Jorge Reynolds. 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 [1].

Teniendo presente lo anterior se realizó un trabajo previo usando filtros FIR con ventanas Hamming y el Hanning, con la ventana Hanning, una frecuencia de corte de 350Hz y orden 1500 se obtuvo el espectrograma de la Figura 4.

Se observó que la señal aún tenía cantos de las ballenas a pesar del proceso de filtrado realizado anteriormente, además de presentar componentes frecuenciales alrededor de 7.3344KHz. Por tal motivo se vio la necesidad de utilizar la WT para el proceso de filtrado.

En general el procedimiento de filtrado usando WT involucra tres pasos:

**Descomposición multinivel:** Se escoge una Wavelet madre en este caso “**db12**”[10, 19]; un nivel 'N' para trabajar, de acuerdo a la frecuencia de muestreo de la señal (44.1KHz) N=15 y luego se calculan la descomposición wavelet de la señal desde el nivel 1 hasta N.

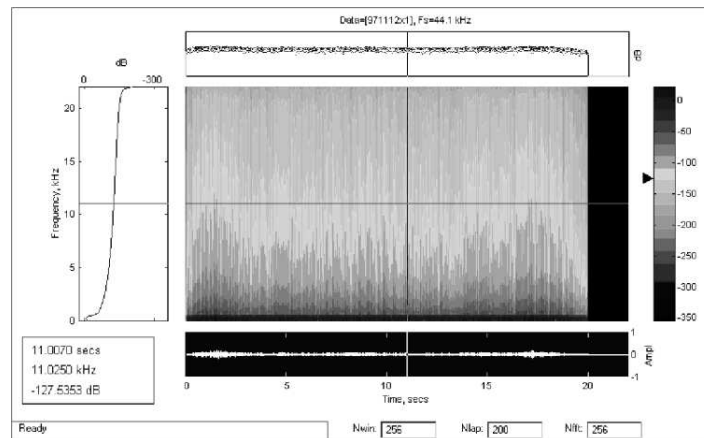


Figura 4. Espectrograma Pista2 Filtrada

**Umbralizar los coeficientes de detalle:** Para cada nivel desde 1 hasta N se selecciona un umbral y se realiza la umbralización por el método 'soft-thresholding' [18,19]. Estos umbrales fueron escogidos teniendo en cuenta la pseudo-frecuencia de cada nivel de descomposición que se aprecian en la tabla 1.

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

**Tabla 1.** Valor de frecuencia para cada nivel de descomposición

Para los detalles nivel 1 hasta nivel 7 el valor de umbral es el máximo valor absoluto de cada detalle; buscando eliminar los componentes de frecuencia que van desde 119.84Hz hasta 15.33KHz 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.

**Reconstrucción:** Partiendo de los coeficientes Wavelet, la manipulación matemática que efectúa la síntesis es llamada la 'transformada inversa Wavelet discreta' (IDWT) [15]. En Matlab este proceso es posible realizarlo usando la función “wdencmp”.

En la Figura 5 se puede observar el antes y el después del proceso de filtrado.



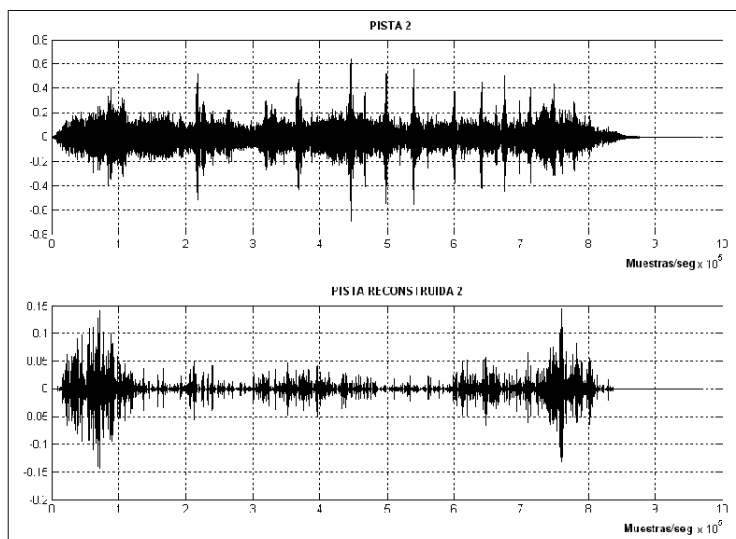


Figura 5. Pista 2 original y Filtrada

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.

## 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 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 [10,19]. En la tabla 2 se muestra la energía de cada detalle para las pistas reconstruidas 2, 3, 4, 5 y 7.

NIVEL	Energía Shannon RP2	Energía Shannon RP3	Energía Shannon RP4	Energía Shannon RP5	Energía Shannon RP7
1	$1.5512 \cdot 10^{-12}$	$7.0213 \cdot 10^{-3}$	$7.9825 \cdot 10^{-16}$	$7.7079 \cdot 10^{-12}$	$9.5423 \cdot 10^{-11}$
2	$5.068 \cdot 10^{-10}$	$2.5303 \cdot 10^{-10}$	$1.9054 \cdot 10^{-13}$	$2.7367 \cdot 10^{-9}$	$6.0376 \cdot 10^{-10}$
3	$6.3993 \cdot 10^{-8}$	$2.9095 \cdot 10^{-8}$	$2.3959 \cdot 10^{-11}$	$3.1152 \cdot 10^{-5}$	$6.6659 \cdot 10^{-9}$
4	$1.7206 \cdot 10^{-5}$	$8.3277 \cdot 10^{-6}$	$5.5015 \cdot 10^{-9}$	0.011217	$1.1649 \cdot 10^{-6}$
5	$2.2909 \cdot 10^{-3}$	0.0011491	$9.1302 \cdot 10^{-7}$	0.011217	$1.5157 \cdot 10^{-4}$
6	0.7186	0.40603	$0.30268 \cdot 10^{-3}$	3.5118	0.049283
7	<b>141.01</b>	<b>86.066</b>	0.071103	<b>595.47</b>	<b>10.544</b>
8	<b>337.7</b>	<b>81.479</b>	<b>14.715</b>	<b>668.04</b>	<b>24.574</b>
9	<b>47.229</b>	<b>9.0864</b>	<b>15.699</b>	<b>82.537</b>	<b>5.086</b>
10	1.7692	0.26172	<b>1.7536</b>	2.0986	0.31596
11	$44.609 \cdot 10^{-3}$	0.0060871	0.036439	0.097974	0.017918
12	$1.798 \cdot 10^{-3}$	$0.38485 \cdot 10^{-3}$	$1.8568 \cdot 10^{-3}$	0.016274	0.043865
13	$0.47128 \cdot 10^{-3}$	$0.15435 \cdot 10^{-3}$	$0.23188 \cdot 10^{-3}$	0.017442	0.093746
14	$9.3327 \cdot 10^{-5}$	$0.10432 \cdot 10^{-3}$	$8.0013 \cdot 10^{-5}$	0.016597	0.11503
15	$5.321 \cdot 10^{-5}$	$2.5002 \cdot 10^{-5}$	$5.339 \cdot 10^{-5}$	0.0097632	0.23253

**Tabla 2.** Energía de cada pista reconstruida

De acuerdo con los valores que se observan en la tabla 2, 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.

### 5.1 Envoltente de energía temporal

Tomando como referencia trabajos elaborados anteriormente en el campo del análisis de sonidos cardiacos humanos se trabaja con el método de Envoltente de Energía Temporal (EDET), el cual consiste en tomar el máximo elemento de cada frecuencia a través del tiempo [10,19,20]; este método se aplica a los detalles más significativos de cada pista reconstruida, los cuales aparecen resaltados en la tabla 2, 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 6 se muestra una porción de la EDET de la pista reconstruida 2 (RP2), donde se pueden apreciar envoltentes de energía diferentes.

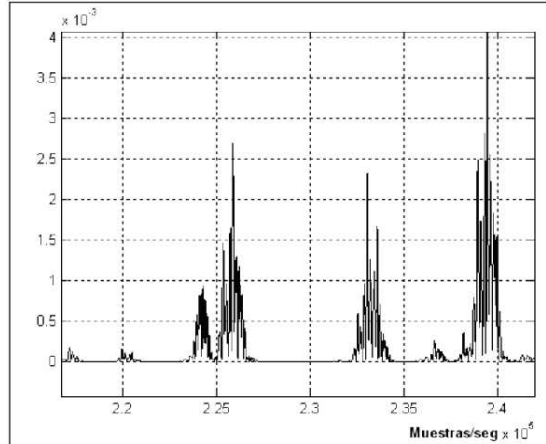


Figura 6. Porción de EDET de la RP2

En la Figura 7 se aprecian las envoltentes 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.

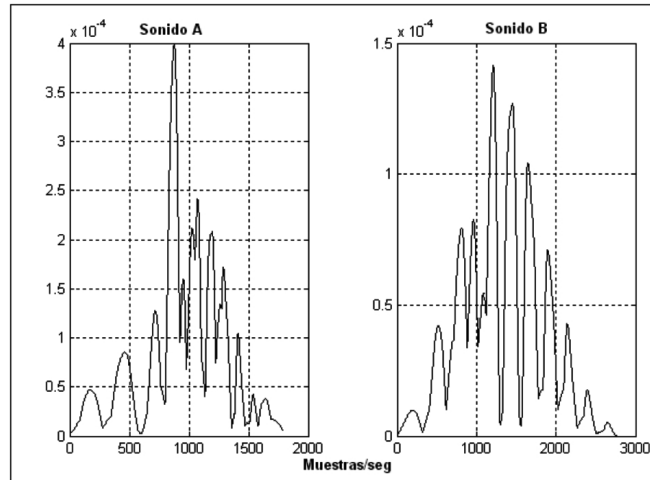


Figura 7. Forma estándar de las envolventes características

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 7, 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 8.

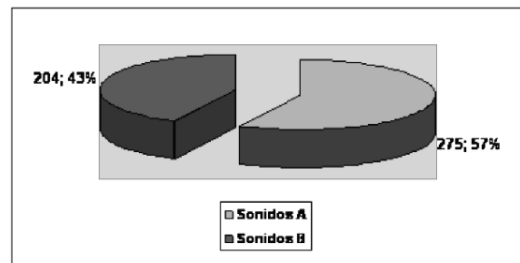


Figura 8. Porcentajes de sonidos A y B encontrados.

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 9.

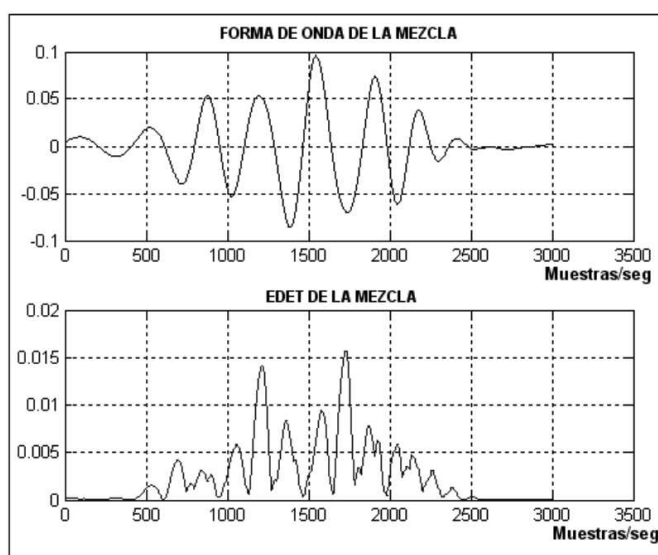


Figura 9. Forma de onda y EDET de una de las mezclas encontradas

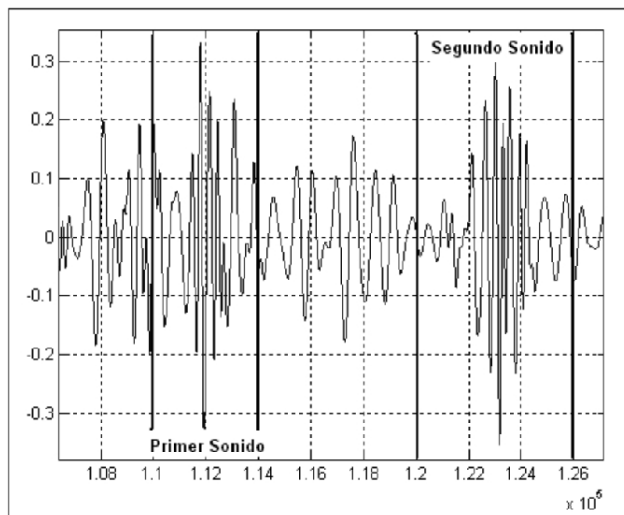
## 5.2 Caracterización de los sonidos a y sonidos b

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

### 5.2.1 Caracterización en Tiempo

Primero se hace necesario aclarar las condiciones en las que se encontraba el entorno en el momento de las grabaciones de las pistas, 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 cardiaco

De acuerdo a lo anterior es necesario discernir en primera instancia cual sonido pertenece o no al funcionamiento de las válvulas cardiacas de la ballena, para esto se analiza la pista 1 donde se encuentra un evento cardiaco del cetáceo como se observa en la Figura 10 , obtenido en estudios previos realizados por el grupo SCVS.



**Figura 10.** Evento cardíaco del cetáceo obtenido de estudios previos

Este evento cardíaco de una ballena jorobada tiene una duración aproximada de 362.81ms teniendo en cuenta la frecuencia de muestreo de la señal  $f_s=44.1\text{KHZ}$  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.

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, de la cual 138 (47%)son sonidos B y 153 (53%) son sonidos A. 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, dando un valor aproximado para la caracterización en tiempo 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.

### 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 energía; 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 11 y 12 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.

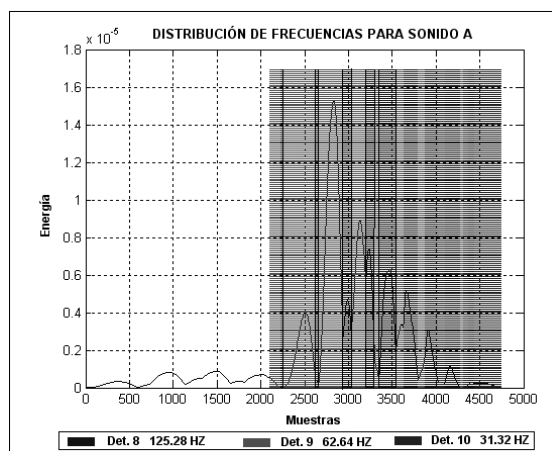


Figura 11. Distribución de Frecuencia del Sonido A de la pista 4

De acuerdo a los resultados, se llega a la conclusión que en los sonidos A la frecuencia predominante es de 62.64 HZ (Det 9), ya que los picos de energía más altos la contienen como se puede apreciar en la Figura 11; en cuanto al sonido B, sus picos de energía altos se distribuye entre las frecuencias de 125.28 Hz (Det 8) y la frecuencia 62.64 HZ (Det 9), como se observa en la Figura 12.

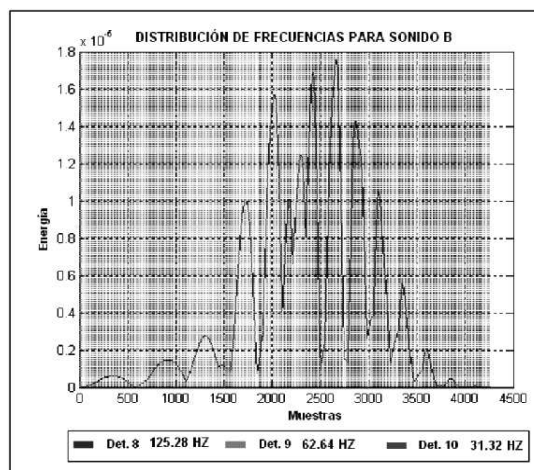


Figura 12. Distribución de Frecuencia Sonido B de la pista 4

## 6 Clasificación de los posibles sonidos cardíacos de la ballena

Conociendo de antemano la relación existente entre el electrocardiograma y el fonocardiograma humano, donde el primer ruido cardíaco coincide con el complejo QRS específicamente con el descenso del intervalo RS del ECG, mientras que el segundo ruido cardíaco coincide con el final de la onda T del ECG; surge la posibilidad de llegar a clasificar el sonido A y B en primer o segundo ruido cardíaco. Para esta clasificación se tomaron los complejos QRS del ECG de la ballena jorobada identificados como complejos globales en un trabajo de grado anterior

Lo que se busca es la posible relación entre estos complejos globales y los sonidos A y B, para lo cual se emplea el coeficiente de correlación cruzada  $\rho_{xy}$  el cual se puede apreciar en la ecuación 1.

$$\rho_{xy} = \frac{COV(XY)}{\sigma_x * \sigma_y} \quad (1)$$

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.

## 7 Conclusiones

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.

Las señales originales (cantos) 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.

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 logró eliminar los cantos del cetáceo contenidos en las señales y obtener posibles sonidos cardiacos del mismo, trabajando con la Transformada Wavelet.

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 muestreo para poder hacer la conversión de muestras a valores en segundos.

Los valores de correlación entre los complejos globales y los sonidos encontrados son de bajo orden alrededor de [10<sup>-9</sup>-10<sup>-4</sup>], 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.

## **Referencias**

- [1] JORGE REYNOLDS P, JOSE IGNACION ROZO C. Viaje al corazón de las Ballenas. SCVS, Bogota, 1998.
- [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 Ild. Medical Science Division. Cardiovascular System. Medical@andromeda.co.uk. Modulo 1-4. 1995.
- [5] <http://webs.comb.es/aranda/egene2.html>
- [6] [www.laboratoriosamerica.com.co/web/congreso2001/Html/ImportanciaDelECG.htm](http://www.laboratoriosamerica.com.co/web/congreso2001/Html/ImportanciaDelECG.htm)
- [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.
- [11] OPPENHEIM Alan V., WILLISKY 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] GRAPSA., "An Introduction to Wavelets", IEEE Computational Science and Engineering, Vol. 2, Núm. 2, 1995.
- [15] <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTtutorial.html>, 23 feb2004.
- [16] KAMEN, Edward W. Introducción a señales y sistemas. CECSA. México, 1996. pág. 412.
- [17] 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.
- [18] WAVELET TOOLBOX, for use with matlab. The Mathworks, Inc. 2002. Matlab pdf Documentations. [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)
- [19] 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.
- [20] 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.