

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar**

**“Medición y Análisis de la Respuesta de una Embarcación  
Semiplaneadora a la Acción de las Olas”**

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO NAVAL**

Presentada por:

Lenin Marcelo Paredes Tobar

GUAYAQUIL-ECUADOR

AÑO: 2007

## AGRADECIMIENTO

A toda las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de este trabajo y especialmente en el Ph.D. José Marín López Director de Tesis por su invaluable ayuda.

## DEDICATORIA

A MI MADRE

A MIS HERMANOS

A MIS AMIGOS

A MIS COMPAÑEROS

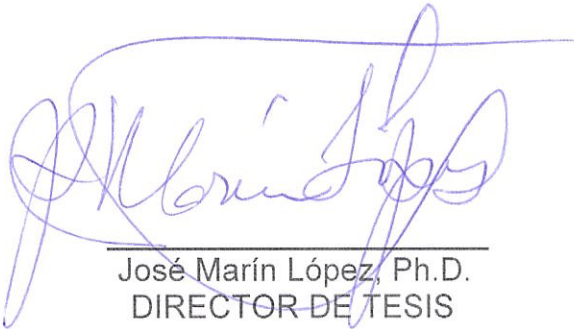
A ELLA

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



---

Cristóbal Mariscal, M.Sc.  
PRESIDENTE



---

José Marín López, Ph.D.  
DIRECTOR DE TESIS

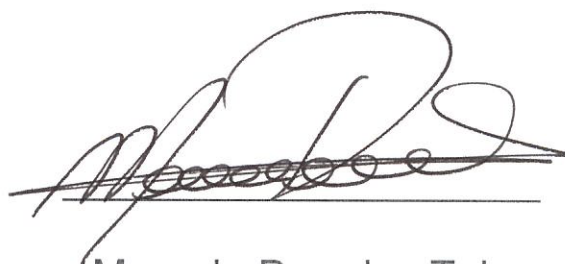


---

Patrick Townsend, Ing.  
VOCAL

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Marcelo Paredes Tobar', is written over a horizontal line.

Marcelo Paredes Tobar

## RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el análisis de la respuesta vertical de una Corbeta Misilera y su incidencia sobre la proficiencia del personal de abordaje, en la realización de sus tareas. Para ello se utilizó un inclinómetro marca Applied Geomechanics, modelo 900 H y un acelerómetro vertical marca Bruel&Kjaer, modelo 4370. Las señales a través de una tarjeta de adquisición de datos marca Omega modelo DAQ 308 fueron almacenadas en un computador portátil. El equipo se lo montó en la Sala del Sonar, ubicada en la sección Proa del buque para realizar varias mediciones de los movimientos de Balance, Cabeceo y Levantamiento en distintas direcciones con respecto a la ola de incidencia. Los datos de aceleración recopilados fueron procesados en una hoja electrónica de Excel, con la que se calculó los parámetros estadísticos de cada medición como: máxima, media, promedio de la raíz cuadrada y los promedios de la tercera y décima parte de las aceleraciones más grandes. Posteriormente se calcularon los Espectros de Energía y Aceleración de los tres movimientos, ya descritos anteriormente, mediante el empleo de un programa en Visual FORTRAN que utilizaba las subrutinas "SPCTRM" y "FOUR1", y se determinaron las frecuencias de máxima energía para cada condición de carga. Finalmente se calcularon los espectros de potencia y aceleración del movimiento vertical y se evaluaron dentro del 1/3 de la Octava de frecuencia para

establecer las frecuencias promedios presentes en el movimiento de Levantamiento, y se compara con las curvas de evaluación del Mareo y Fatiga que proponen la Organización Internacional de Estandarización (ISO) y la Estandarización Inglesa (BS) para juzgar el nivel de confort de la embarcación y definir los rangos donde la proficiencia comienza a disminuir.

Finalmente, se aplicaron las formulaciones de Savitsky para estimar las aceleraciones promedio de la embarcación en la zona de Proa, y se las comparó con los resultados de las mediciones obtenidas. Dado que la embarcación no satisfacía adecuadamente los rangos de aplicabilidad de las formulaciones mencionadas, se obtuvieron valores muy diferentes respecto de las observaciones a bordo. Se nota eso sí, buen paralelismo en las mediciones en estado de Mar 4, aunque las dos curvas lucen como desplazadas una respecto de la otra.

## ÍNDICE GENERAL

|                                                                                          |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| RESUMEN .....                                                                            | I      |
| ÍNDICE GENERAL.....                                                                      | III    |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                                                  | V      |
| ÍNDICE DE FOTOS.....                                                                     | VII    |
| ÍNDICE DE TABLAS .....                                                                   | VIII   |
| ÍNDICE DE ANEXOS .....                                                                   | X      |
| INTRODUCCIÓN .....                                                                       | 1      |
| <br>CAPITULO 1 .....                                                                     | <br>3  |
| 1. DESCRIPCION DEL PROCESO DE ADQUISICION.....                                           | 3      |
| 1.1 Descripción de la embarcación .....                                                  | 3      |
| 1.2 Antecedentes de la proficiencia del personal embarcado .....                         | 10     |
| 1.3 Procedimiento y características de la Plataforma Inercial PL 41.....                 | 16     |
| 1.4 Resumen de los resultados de las pruebas.....                                        | 28     |
| <br>CAPITULO 2 .....                                                                     | <br>37 |
| 2. ANALISIS DE LAS MEDICIONES REALIZADAS .....                                           | 37     |
| 2.1 Cálculo del Espectro del Mar.....                                                    | 37     |
| 2.2 Estimación de las frecuencias de Levantamiento, Cabeceo y Balance .....              | 45     |
| 2.3 Determinación de la densidad espectral de aceleración y energía de la respuesta..... | 52     |
| 2.4 Análisis Comparativo de la respuesta .....                                           | 60     |
| <br>CAPITULO 3 .....                                                                     | <br>65 |
| 3. ANALISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS MOVIMIENTOS .....                                    | 65     |
| 3.1 El mareo según la teoría del Conflicto Sensorial.....                                | 65     |
| 3.2 Evaluación del estado de la tripulación durante la prueba .....                      | 70     |
| 3.3 Discusión sobre la incidencia del mareo.. .....                                      | 75     |

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| CAPITULO 4 .....                                                                           | 88  |
| 4. COMPARACION DE LOS VALORES DE ACELERACION MEDIDOS CON<br>FORMULACIONES EXISTENTES ..... | 88  |
| 4.1 Descripción de la formulación de Savitsky .....                                        | 88  |
| 4.2 Resumen de valores registrados .....                                                   | 93  |
| 4.3 Discusión .....                                                                        | 96  |
| CONCLUSIONES .....                                                                         | 98  |
| RECOMENDACIONES .....                                                                      | 104 |
| ANEXOS .....                                                                               | 106 |
| ANEXO 1 .....                                                                              | 107 |
| ANEXO 2 .....                                                                              | 110 |
| ANEXO 3 .....                                                                              | 112 |
| BIBLIOGRAFÍA .....                                                                         | 116 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Curvas de los Regimenes de Velocidad para buques .....                                                                   | 6  |
| Figura 2. Distribución General de la Corbeta Misilera clase “Esmeraldas” .....                                                     | 8  |
| Figura 3. Plano de Líneas de Formas de la Corbeta Misilera. ....                                                                   | 9  |
| Figura 4. Embarque Efectivo del Personal de Prueba. ....                                                                           | 10 |
| Figura 5. Porcentaje de Susceptibilidad al Mareo del Personal de Prueba. .                                                         | 11 |
| Figura 6. Barras Agrupadas de Propensión al Mareo vs. Tiempo de Embarque. ....                                                     | 15 |
| Figura 7. Partes Constitutivas de la Plataforma Inercial PL 41 .....                                                               | 16 |
| Figura 8. Gráfico Funcional del Acelerómetro.....                                                                                  | 19 |
| Figura 9. Interacción del Campo Magnético.....                                                                                     | 20 |
| Figura 10. Esquema funcional del acelerómetro.....                                                                                 | 21 |
| Figura 11. Ubicación de los sensores de medición.....                                                                              | 23 |
| Figura 12. Rumbo y dirección de la embarcación, incluido el tren de olas. ..                                                       | 27 |
| Figura 13. Referencia Direccional para los movimientos del buque con respecto al tren de olas.....                                 | 39 |
| Figura 14. Espectro de Ola .....                                                                                                   | 45 |
| Figura 15. Movimientos característicos del Buque con respecto a los ejes ortogonales .....                                         | 45 |
| Figura 16. Periodo de Cabeceo en función de la relación Eslora-Desplazamiento .....                                                | 49 |
| Figura 17. Aceleraciones correspondientes a los movimientos de la Corbeta en Condición de Máxima Carga, 25 de Junio del 2007 ..... | 53 |
| Figura 18. Espectro de Energía de un solo lado .....                                                                               | 55 |
| Figura 19. Espectros de Energía de las Aceleraciones de la Corbeta en Condición de Máxima Carga, 25 de Junio del 2007 .....        | 57 |
| Figura 20. Comparación gráfica de los Espectros de Energía, Aceleración y Olas del buque .....                                     | 63 |
| Figura 21. Comparación gráfica de los Espectros de Energía, Aceleración y las del buque en condición de carga media .....          | 64 |
| Figura 22. Ubicación del Sistema Vestibular .....                                                                                  | 67 |
| Figura 23. Disposición del Aparato Auricular .....                                                                                 | 67 |

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 24. Estado de Mareo del personal antes y después de la prueba.<br>Estado de Mar 4.....             | 73 |
| Figura 25. Estado de Mareo del personal antes y después de la prueba.<br>Estado de Mar 3.....             | 74 |
| Figura 26. Curvas de límites de la reducción del confort, ISO 2631/3 .....                                | 78 |
| Figura 27. Curvas de límites de Reducción de Proficiencia-Fatiga, ISO 2631/1<br>.....                     | 80 |
| Figura 28. Curvas de aceleraciones verticales que predicen 10%, 20% y 40%<br>de incidencia de vomito..... | 82 |
| Figura 29. Curvas de Incidencia de vomito, BS 6841 .....                                                  | 83 |
| Figura 30. Índice de vomito (MSI) en función del tiempo de exposición .....                               | 87 |
| Figura 31. Comparación gráfica de los valores de aceleración Teórico vs.<br>Experimental. ....            | 95 |

## ÍNDICE DE FOTOS

|                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------|----|
| Foto1. Sensores utilizados durante las pruebas de medición. .... | 24 |
| Foto 2.- Disposición de los equipos de medición .....            | 26 |
| Foto 3.- Estados de Mar presentes durante las Pruebas .....      | 41 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1. Velocidad Promedio durante las Pruebas .....                                   | 5  |
| Tabla 2. Condición de Carga de Prueba.....                                              | 7  |
| Tabla 3. Tabla de Contingencia de Embarque Efectivo vs. Propensión al Mareo.....        | 12 |
| Tabla 4. Prueba de Medición Simétrica de Asociación.....                                | 14 |
| Tabla 5. Prueba de Medición Direccional de Asociación.....                              | 14 |
| Tabla 6. Tabla de condiciones meteorológicas durante la prueba.....                     | 29 |
| Tabla 7. Estadística de la Aceleración Vertical, %g, medida desde la Sala de Sonar..... | 30 |
| Tabla 8. Tabla de condiciones meteorológicas durante la prueba.....                     | 31 |
| Tabla 9. Estadística de la Aceleración Vertical medida desde la Sala de Sonar.....      | 31 |
| Tabla 10. Estadística de las Aceleraciones obtenidas con velocidad Avante 1.....        | 33 |
| Tabla 11. Estadística de las Aceleraciones obtenidas con velocidad Avante 3.....        | 33 |
| Tabla 12. Estadística de las Aceleraciones obtenidas con velocidad Avante 5.....        | 34 |
| Tabla 13. Estadística de las Aceleraciones obtenidas con velocidad Avante 1.....        | 35 |
| Tabla 14. Estadística de las Aceleraciones obtenidas con velocidad Avante 3.....        | 35 |
| Tabla 15. Estadística de las Aceleraciones obtenidas con velocidad Avante 5.....        | 36 |

|                                                                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 16. Longitud de Onda de los Estados de Mar para la Máxima Energía. ....                                              | 43 |
| Tabla 17. Periodo y frecuencia de Levantamiento para diferentes condiciones de carga .....                                 | 47 |
| Tabla 18. Rango de periodo y frecuencia de Cabeceo para diferentes condiciones de carga. ....                              | 50 |
| Tabla 19. Frecuencias del Balance para diferentes condiciones de carga. ....                                               | 52 |
| Tabla 20. Factores de intervalo de frecuencia .....                                                                        | 59 |
| Tabla 21. Frecuencias Comparativas del comportamiento del buque ...                                                        | 61 |
| Tabla 22. Tipos de movimientos y conflictos sensoriales .....                                                              | 70 |
| Tabla 23. Condiciones climatológicas de las pruebas de mar .....                                                           | 71 |
| Tabla 24. Resumen del Porcentaje de vómito colectivo, MSI. ....                                                            | 75 |
| Tabla 25. Resultados obtenidos de las relaciones empíricas y experimentales.....                                           | 84 |
| Tabla 26. Cuadro Comparativo de Parámetros de Aplicabilidad de buques planeadores .....                                    | 90 |
| Tabla 27. Características geométricas y carga de la Corbeta para el periodo de prueba del 25 al 30 de junio del 2007 ..... | 91 |
| Tabla 28. Resultados de las aceleraciones promedio en el C.G. y proa....                                                   | 92 |
| Tabla 29. Comparación de las aceleraciones teórica y experimental de las respuesta del buque, tomadas en sección Proa..... | 94 |

## ÍNDICE DE ANEXOS

|                                                                                                                                          |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ANEXO 1. Algoritmo y Programa del Proceso de Medición y Análisis de las Mediciones de la Respuesta de una Embarcación de Semiplaneo..... | 107 |
| ANEXO 2. Formato de la Encuesta para Evaluar Mareo y Fatiga.....                                                                         | 110 |
| ANEXO 3. Tablas de Contingencia para Evaluar el Estado del Personal durante las Pruebas .....                                            | 112 |

## INTRODUCCIÓN

La potencialidad de las embarcaciones semiplaneadoras son la rapidez y versatilidad que poseen para realizar operaciones navales de corto, mediano y largo alcance. El elemento humano, que tripula estas unidades, está expuesto a los diferentes movimientos del buque causados por las condiciones del mar, siendo los más relevantes el balanceo, cabeceo y levantamiento. La combinación de estos movimientos produce mareo en la tripulación, disminuyendo su proficiencia en el desempeño de sus funciones.

El cálculo de la respuesta de una embarcación a las olas es muy complicado y en el medio local no existen experiencias sobre cálculos ó mediciones de la respuesta hechas en embarcaciones rápidas. Esto evidencia una falta de experticia no solo en el manejo de la información recopilada sino también en los dispositivos de medición a emplearse.

El objetivo general de este trabajo es realizar mediciones de la respuesta de una embarcación semiplaneadora en olas y analizar su efecto en la proficiencia de la tripulación.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Describir un proceso de adquisición de datos de respuesta de la corbeta, en diferentes condiciones de carga, mar y velocidad.
- Analizar probabilísticamente las mediciones de respuesta de la corbeta en diferentes condiciones de carga, mar y velocidad.
- Analizar el efecto de los movimientos del buque sobre la proficiencia del personal.
- Comparar las mediciones de aceleración con formulaciones semiempíricas existentes.

Este trabajo permitirá disponer de información real del comportamiento Dinámico de una embarcación semiplaneadora en diferentes estados de mar. Además incorpora un método de medición que es novel en nuestro medio empleando las señales de salida de una Plataforma Inercial, equipo empleado para generar la señal de referencia a los sistemas de armas y gobierno, que contribuirá a la experticia en la recopilación de datos.

# CAPITULO 1

## 1. DESCRIPCION DEL PROCESO DE ADQUISICION

### 1.1 Descripción de la embarcación.-

La embarcación de prueba es una corbeta misilera clase “Esmeraldas” que pertenece al Escuadrón de Corbetas, actualmente en servicio para la Armada Nacional. Fue construida en Italia, exclusivamente para el Ecuador, por el Astillero “La Spezia” en la ciudad de Génova a inicios de los ochenta. Estas unidades se caracterizan por ser polivalentes, con capacidad de cumplir diferentes roles operativos como guerra antiaérea, antisubmarina y antisuperficie. El casco de la embarcación analizada está construido en acero naval con soldadura a tope, doble continua; la superestructura y las divisiones de los compartimientos sobre la cubierta 100 son de Aluminio con uniones bimetálicas para asegurar el anclaje. El casco tiene forma hidrodinámica, en V; la proa es afinada y el espejo es plano ligeramente inclinado. Estructuralmente es de configuración mixta, longitudinalmente posee esloras como miembros primarios e intercostales como secundarios y terciarios. Transversalmente está constituida por cuadernas (ordenadas) simples y bulárcamas de tal

manera que secciona al buque en diez compartimientos estancos, existiendo 125 cuadernas con una separación de 460 mm. Las principales dimensiones son:

|                              |         |
|------------------------------|---------|
| Eslora total                 | 62.3 m  |
| Eslora entre perpendiculares | 57.8 m  |
| Manga máxima                 | 9.30 m  |
| Puntal de diseño             | 5.05 m  |
| Desplazamiento de diseño     | 650 ton |
| Calado de diseño             | 2.50 m  |
| Desplazamiento ligero        | 521 ton |
| Calado ligero                | 2.21 m  |
| Calado con sonar activo      | 3.61 m  |
| Velocidad de diseño          | 30 kn   |

El armamento abordo es:

Sistema Antiaéreo Albatros

Cañón Otomelara de 76/62 mm

Ametralladora Breda-Bofors 40/70 mm

Lanzatorpedos

Helicóptero

El sistema propulsor está compuesto por cuatro líneas de ejes impulsadas por cuatro motores marca MTU modelo 20V 956 TB92 con sus respectivos reductores, y, que en conjunto poseen una potencia instalada de 20600 hp. Las hélices son de paso fijo, de cuatro palas cada una. Las velocidades que se desarrollan durante las pruebas son las siguientes:

| Velocidad<br>del<br>Buque | Velocidad de<br>máquinas<br>(RPM) | Nudos<br>(Kn) |
|---------------------------|-----------------------------------|---------------|
| Avante 5                  | 1100                              | ~21           |
| Avante 4                  | 950                               | ~18           |
| Avante 3                  | 800                               | ~16           |
| Avante 1                  | 650                               | ~12           |

Tabla 1.- Velocidad Promedio durante las Pruebas.

El rango de velocidad y eslora la sitúan dentro del régimen de buques de semidesplazamiento debido a la relación adimensional o número de Froude:

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{Lg}}$$

$F_n$  = Número de Froude

$V$  = Velocidad de diseño

$L$  = Eslora

$g$  = Aceleración de la Gravedad

Aplicando la fórmula presentada, se obtiene un valor de 0.65, el cual está dentro intervalo que caracteriza a las embarcaciones semiplaneadoras ( $0.39 < F_n < 0.89$ ), como se muestra en la figura 1.

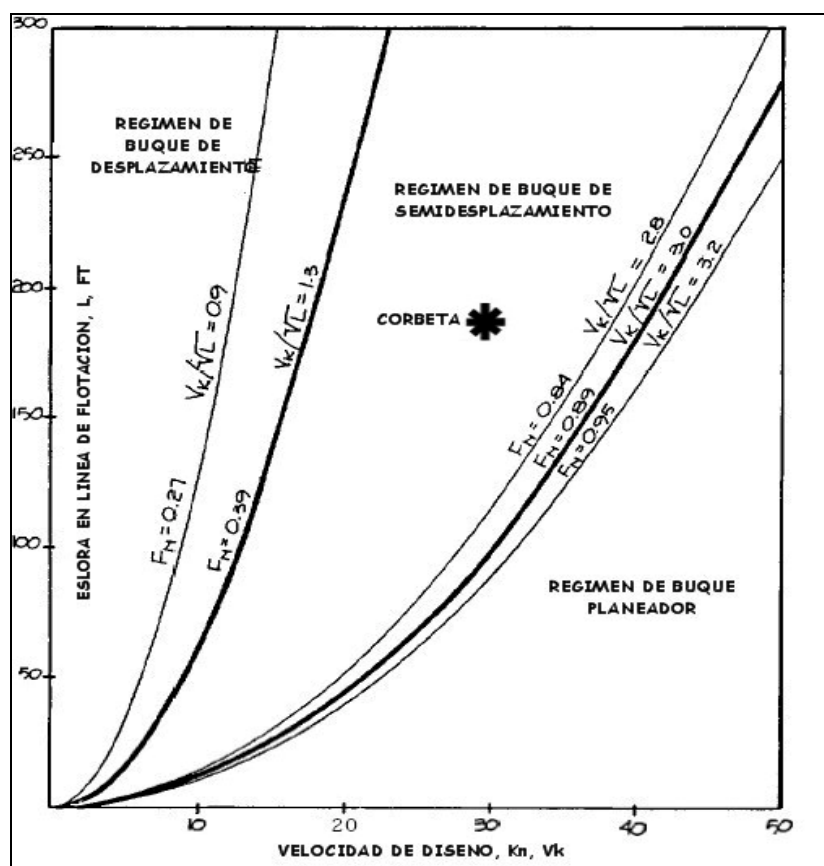


Figura 1.- Curvas de los Regímenes de Velocidad para buques, [1].

### Condiciones de Carga

El comportamiento dinámico del buque dependerá de su desplazamiento. La severidad de la respuesta ante la acción de una ola es inversamente proporcional a la masa, lo que hace imprescindible su registro, previo al inicio de cada prueba. Se espera que la unidad a su máximo desplazamiento opere durante periodos de tiempo más largos que en condición Media y Ligera. Al momento del zarpe, la corbeta, estará a un 95% de su capacidad máxima de cargas líquidas y sólidas; en el transcurso del periplo, el consumo de las mismas hará que el desplazamiento vaya disminuyendo paulatinamente. Entonces las condiciones de carga serán: Máxima, Media y Ligera; en cada una de ellas se establecerán diferentes rangos de velocidad en las que se registrarán los diferentes estados de mar. A continuación se presentan los datos de desplazamiento, calado medio y altura metacéntrica (GM) de cada condición:

| Condición de la Nave | Desplazamiento (t) | Calado medio (m) | Altura metacéntrica (m) |
|----------------------|--------------------|------------------|-------------------------|
| Ligera               | ~680               | 2.60             | ~1.02                   |
| Media                | ~725               | 2.70             | ~0.81                   |
| A plena carga        | ~750               | 2.76             | ~0.79                   |

Tabla 2.- Condición de Carga de Prueba.

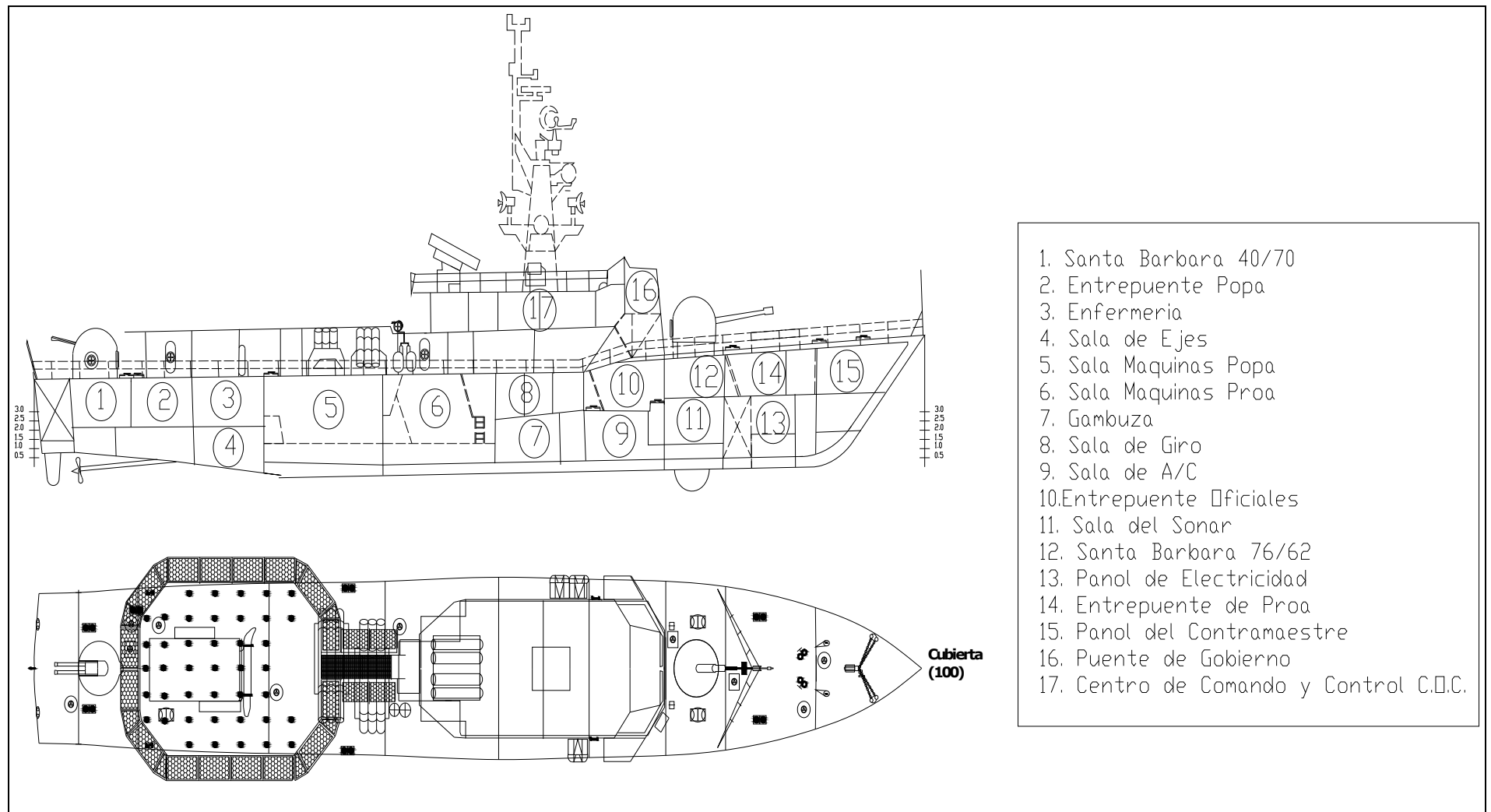


Figura 2.- Distribución General de la Corbeta Misilera clase “Esmeraldas”.

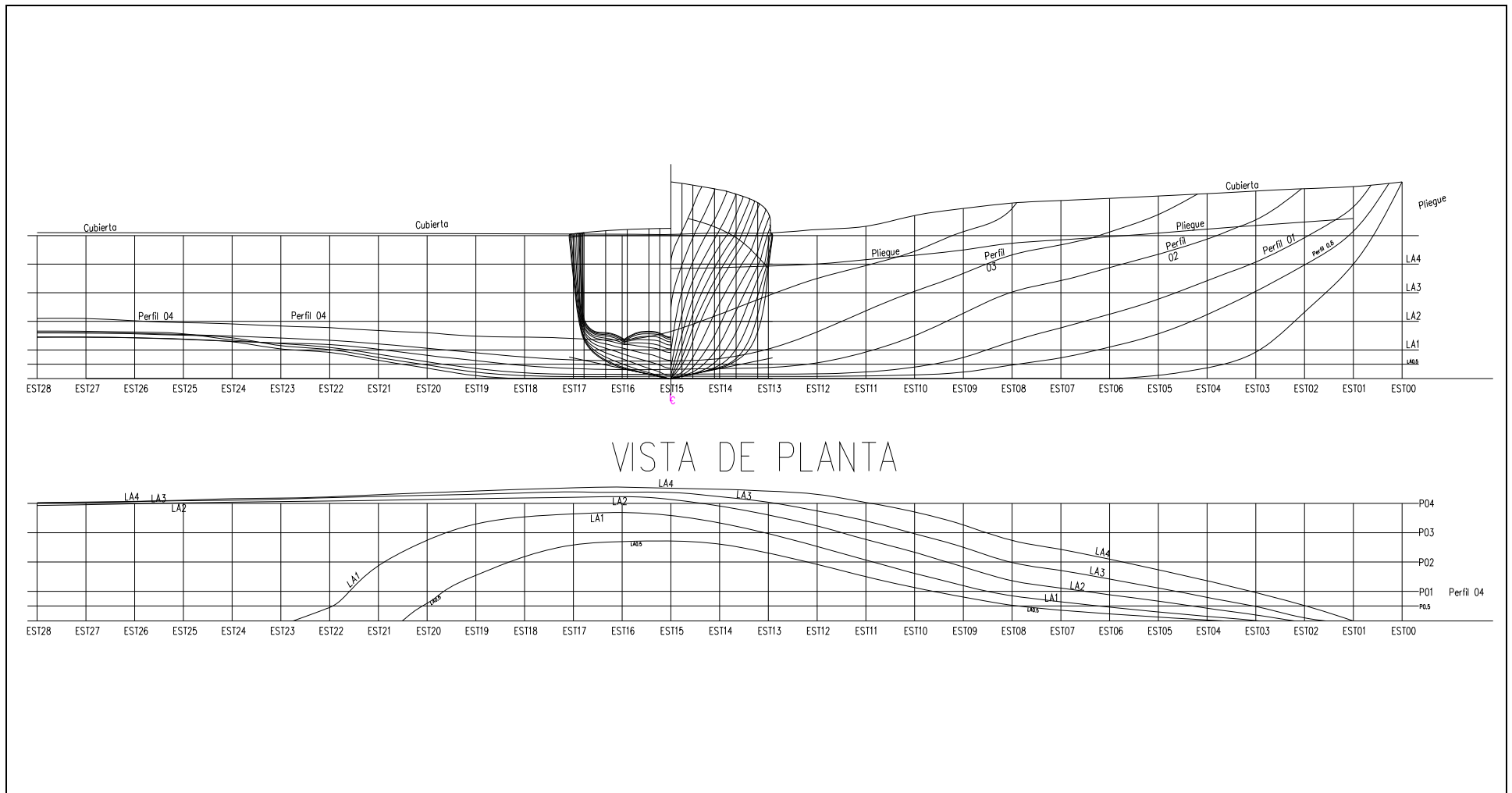


Figura 3.- Plano de Líneas de Formas de la Corbeta Misilera clase “Esmeraldas”.

## 1.2 Antecedentes de la proficiencia del personal embarcado.-

La corbeta, como unidad de combate, dispone de una dotación completa formada por oficiales y tripulantes debidamente entrenados para cumplir con las tareas asignadas. Esto significa que el personal debe poseer un alto nivel de proficiencia durante las navegaciones, sometidos constantemente a diferentes estados de mar y condiciones climatológicas adversas que hacen que el confort disminuya. Cabe mencionar la alta exigencia operacional que demandan estas misiones al personal, motivo por el cual el confort y el bienestar abordo de los buques de guerra se ha vuelto una imperiosa necesidad para asegurar no solo el éxito de la misión sino también la preservación de vidas humanas. Para la prueba se seleccionaron 55 sujetos entre oficiales y tripulantes que reportan un tiempo de embarque efectivo, a lo largo de su carrera profesional, como se muestra en la figura 4:

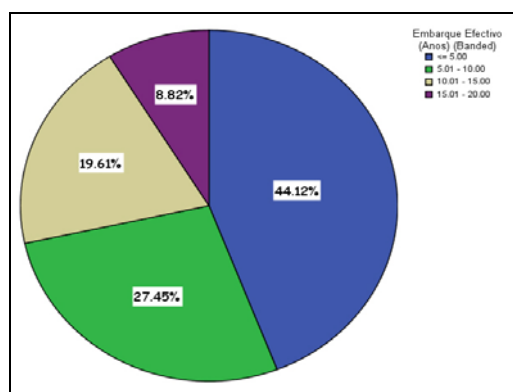


Figura 4.- Embarque Efectivo del Personal de Prueba.

Se puede apreciar que existe un intervalo amplio de tiempo de embarque efectivo, de aproximadamente 20 años, siendo evidente que la mayoría del personal tiene menos de 5 años. En la carrera naval este es un período relativamente corto de tiempo, lo que evidencia que el personal recién se inicia dentro de la profesión. Podría pensarse que el mayor porcentaje de individuos que son propensos al mareo se encuentran dentro de ese intervalo y aquellos que no sienten mareo son los que más tiempo de embarque tienen.

Para despejar esta incertidumbre, se realizó una encuesta en la que se preguntó el tiempo de embarque efectivo y la susceptibilidad al mareo que el individuo cree tener. Independiente al tiempo de embarque, la susceptibilidad al mareo que reportaron se muestra en la figura 5:

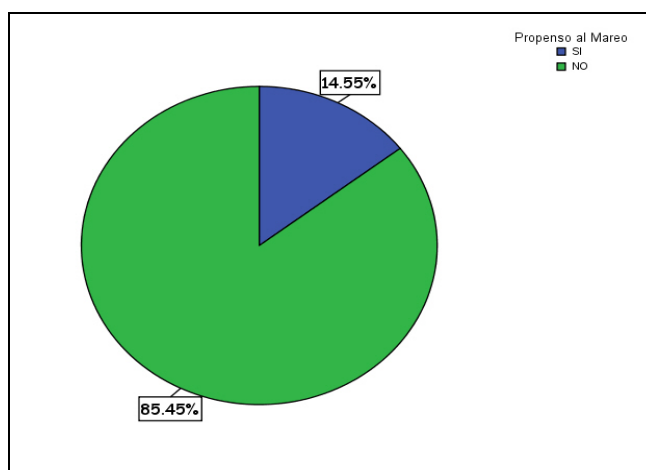


Figura 5.- Porcentaje de Susceptibilidad al Mareo del Personal de Prueba.

La mayoría del personal, 84.45%, reportó no sentir mareo durante las navegaciones mientras que el 14.55% está predispuesto a sentirlo, siendo muchas las causas que producen el mareo como la fisonomía, género y edad.

Mediante técnicas de estadística inferencial se puede determinar el grado de asociación o dependencia entre dos o más variables. Para este caso, se busca establecer si existe o no alguna dependencia entre el tiempo de embarque efectivo con la propensión al mareo, mediante el empleo de la tabla de contingencia o cruzada. Para esto se exponen las dos variables ordenadas tanto en filas como en columnas, con sus respectivos porcentajes parciales y totales como se muestra a continuación:

|                   |    |                   | Embarque Efectivo (Anos) |              |               |               | Total |
|-------------------|----|-------------------|--------------------------|--------------|---------------|---------------|-------|
|                   |    |                   | <= 5.00                  | 5.01 - 10.00 | 10.01 - 15.00 | 15.01 - 20.00 |       |
| Propenso al Mareo | SI | Count             | 7                        | 0            | 0             | 1             | 8     |
|                   |    | %dentro           |                          |              |               |               |       |
|                   |    | Propenso al Mareo | 87.5%                    | .0%          | .0%           | 12.5%         | 100%  |
|                   |    | % of Total        | 12.7%                    | .0%          | .0%           | 1.8%          | 14.5% |
|                   | NO | Count             | 19                       | 14           | 10            | 4             | 47    |
|                   |    | %dentro           |                          |              |               |               |       |
|                   |    | Propenso al Mareo | 40.4%                    | 29.8%        | 21.3%         | 8.5%          | 100%  |
|                   |    | % of Total        | 34.5%                    | 25.5%        | 18.2%         | 7.3%          | 85.5% |
| Total             |    | Count             | 26                       | 14           | 10            | 5             | 55    |
|                   |    | %dentro           |                          |              |               |               |       |
|                   |    | Propenso al Mareo | 47.3%                    | 25.5%        | 18.2%         | 9.1%          | 100%  |
|                   |    | % of Total        | 47.3%                    | 25.5%        | 18.2%         | 9.1%          | 100%  |

Tabla 3.- Tabla de Contingencia de Embarque Efectivo vs. Propensión al Mareo.

Aparentemente existe un porcentaje alto de tripulantes propensos al mareo, 87.5%, dentro de los 5 años de embarque. Se podría inferir entonces que a menor tiempo de embarque mayor es la susceptibilidad al mareo. Sin embargo, con respecto al total del personal, corresponde al 12.7%, que es un porcentaje pequeño comparado al 34.5% del personal que no es propenso al mareo. Mediante el programa SPSS, [2], se realizó la prueba de correlación. En las tablas 4 y 5 se muestran los resúmenes de los resultados obtenidos de las pruebas cuyos coeficientes más importantes son:

- Coeficiente de contingencia, cuando el valor siempre está comprendido entre 0 y 1; un valor de 0 indica que no hay asociación entre la fila y la columna y aquellos valores cercanos o iguales a 1 indican que hay gran relación entre las variables.
- Lambda, es la medida de asociación que refleja la reducción proporcional en el error cuando se utilizan los valores de la variable independiente para pronosticar los valores de la variable dependiente. Un valor igual a 1 significa que la variable independiente pronostica perfectamente la variable dependiente y cuando es 0 significa lo opuesto.

- Coeficiente de incertidumbre, indica la reducción proporcional del error cuando los valores de una variable se emplean para pronosticar valores de la otra variable.

|                      |                         | Value | Asymp. Std. Error <sup>a</sup> | Approx. T <sup>b</sup> | Approx. Sig.      |
|----------------------|-------------------------|-------|--------------------------------|------------------------|-------------------|
| Nominal by Nominal   | Phi                     | .367  |                                |                        | .060              |
|                      | Cramer's V              | .367  |                                |                        | .060              |
|                      | Contingency Coefficient | .345  |                                |                        | .060              |
| Interval by Interval | Pearson's R             | .212  | .139                           | 1.581                  | .120 <sup>c</sup> |
| Ordinal by Ordinal   | Spearman Correlation    | .266  | .129                           | 2.011                  | .049 <sup>c</sup> |
| N of Valid Cases     |                         | 55    |                                |                        |                   |

a. Not assuming the null hypothesis.  
b. Using the asymptotic standard error assuming the null hypothesis.  
c. Based on normal approximation.

Tabla 4.- Prueba de Medición Simétrica de Asociación.

|                    |                         |                                             | Value | Asymp. Std. Error <sup>a</sup> | Approx. T <sup>b</sup> | Approx. Sig.      |
|--------------------|-------------------------|---------------------------------------------|-------|--------------------------------|------------------------|-------------------|
| Nominal by Nominal | Lambda                  | Symmetric                                   | .000  | .000                           | . <sup>c</sup>         | . <sup>c</sup>    |
|                    |                         | Propenso al Mareo Dependent                 | .000  | .000                           | . <sup>c</sup>         | . <sup>c</sup>    |
|                    |                         | Embarque Efectivo (Anos) (Banded) Dependent | .000  | .000                           | . <sup>c</sup>         | . <sup>c</sup>    |
|                    | Goodman and Kruskal tau | Propenso al Mareo Dependent                 | .066  | .050                           |                        | .064 <sup>d</sup> |
|                    |                         | Embarque Efectivo (Anos) (Banded) Dependent | .066  | .026                           |                        | .013 <sup>d</sup> |
|                    | Uncertainty Coefficient | Symmetric                                   | .114  | .036                           | 2.823                  | .016 <sup>e</sup> |
|                    |                         | Propenso al Mareo Dependent                 | .226  | .051                           | 2.823                  | .016 <sup>e</sup> |
|                    |                         | Embarque Efectivo (Anos) (Banded) Dependent | .076  | .027                           | 2.823                  | .016 <sup>e</sup> |
|                    | Nominal by Interval     | Eta                                         | .367  |                                |                        |                   |
|                    |                         | Embarque Efectivo (Anos) (Banded) Dependent | .212  |                                |                        |                   |

a. Not assuming the null hypothesis.  
b. Using the asymptotic standard error assuming the null hypothesis.  
c. Cannot be computed because the asymptotic standard error equals zero.  
d. Based on chi-square approximation  
e. Likelihood ratio chi-square probability.

Tabla 5.- Prueba de Medición Direccional de Asociación.

Finalmente, observando los valores de los diferentes coeficientes se puede concluir que no existe una asociación lo suficientemente fuerte entre las variables para relacionarlas entre sí y que el tiempo de embarque efectivo del personal no determina el nivel de propensión al mareo. El gráfico de barras agrupadas de las tablas de contingencia, consiste en un grupo de barras que representan a cada de una de las variables como se muestra en la figura 6:

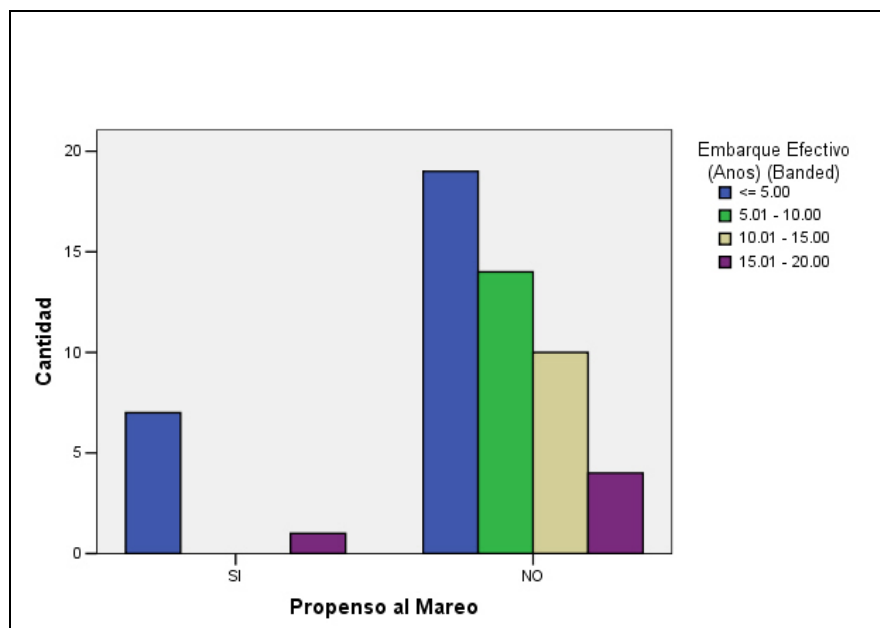


Figura 6.- Barras Agrupadas de Propensión al Mareo vs. Tiempo de Embarque.

### 1.3 Procedimiento y características de la Plataforma Inercial PL 41 para la adquisición de datos.-

La plataforma inercial PL 41 Mk. 3 es un sistema de navegación marina con referencia vertical<sup>1</sup>, que proporciona los siguientes datos: Rumbo, Cabeceo, Balanceo, Velocidad, Latitud, y Longitudinal, La información provista por la PL 41 es empleada en la navegación y estabilización de los sistemas de armas en los buques de guerra.

#### Descripción Mecánica

El sistema está compuesto por cuatro bloques principales, como se muestra en la figura 7:

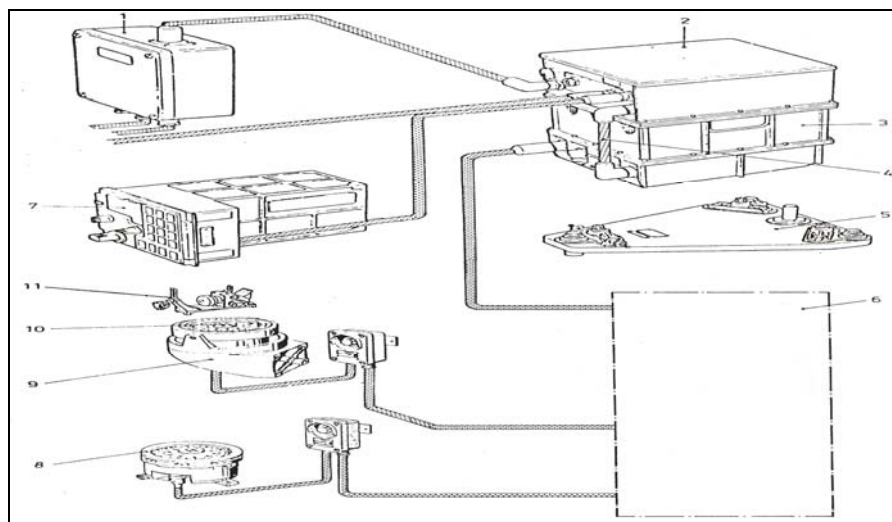


Figura 7.- Partes Constitutivas de la Plataforma Inercial PL 41, [9].

<sup>1</sup> Referencia vertical: Con respecto al eje de rotación de la tierra.

1. Unidad de Poder (PJB)
2. Unidad electrónica (EU)
3. Unidad plataforma (PU)
4. Cable W 23
5. Plato montado, base
6. Unidad de distribución principal
7. Unidad de Control y Pantalla (CDU)
8. Repetidor de compás (4 unidades)
9. Montaje estático fijo (2 unidades)
10. Repetidor de compás (2 unidades)
11. Alidada

#### Descripción Eléctrica

El sistema se pone en servicio en la unidad de control (CDU) a través del selector “MODE” en cualquiera de las tres posiciones:

- ◆ OFF
- ◆ G.C. (Giro Compás)
- ◆ IN (Inercial)

Cuando el selector se coloca en la posición G.C. o IN la plataforma se alinea con el horizonte o norte geográfico, en esta fase se llama modo de alineación y la realiza automáticamente el computador central cada vez que el sistema se pone en servicio. En el modo de giro compás (G.C) el sistema usa como referencia los datos entregados por la corredera<sup>2</sup>, en conjunto con los acelerómetros y giros para mantener el nivel de la plataforma y la alineación hacia el norte. En caso de falla de la corredera, el sistema automáticamente opera en modo inercial (IN), esto es, el sistema ignora la señal de la corredera y utiliza la información proporcionada únicamente por los acelerómetros y giros para mantener el nivel y la alineación de la plataforma con respecto al norte geográfico.

### Acelerómetros

Son dispositivos electrónicos que producen una señal electrónica proporcional a la aceleración de un determinado sistema. Su funcionamiento se basa en los principios físicos establecidos por Newton y consiste en un péndulo sujetado a un punto pivote, sobre el cual rota. Este dispositivo se encuentra dentro de una caja que está fijo sobre una base estática. En el momento que se produce un

---

<sup>2</sup> Dispositivo electrónico que mide la velocidad de avance del buque.

movimiento externo, la masa del péndulo, según la primera ley de Newton, permanece estática o reposo mientras la caja se desplaza hacia la dirección del movimiento. Cabe recalcar que este tipo de acelerómetros registran los desplazamientos en respuesta de aquellas fuerzas aplicadas paralelamente a la línea horizontal que atraviesa el punto pivote, como se muestra en la figura 8. Esta dirección de máxima sensibilidad se llama eje de entrada o sensibilidad.

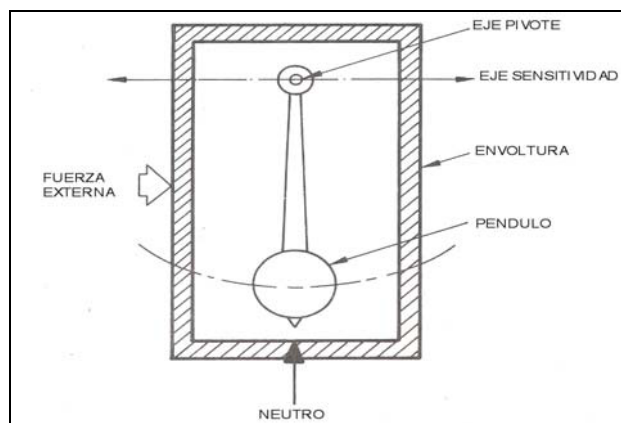


Figura 8.- Gráfico Funcional del Acelerómetro, [9].

La aceleración a lo largo del punto de soporte, produce un momento que tiende a sacar del reposo al péndulo. Esta rotación es registrada por un dispositivo fotoeléctrico que transmite una señal proporcional al amplificador restaurador, que demodula la señal recibida para generar una variación de voltaje proporcional al desplazamiento de la masa. Este flujo se define como corriente restauradora, cuyo propósito es

inducir un campo electromagnético alrededor de la masa (Figura 9). La interacción entre los campos electromagnéticos, producidos por el imán permanente y el péndulo, generan una fuerza electromagnética horizontal y opuesta al movimiento, que provoca que la masa vuelva a su posición de reposo.

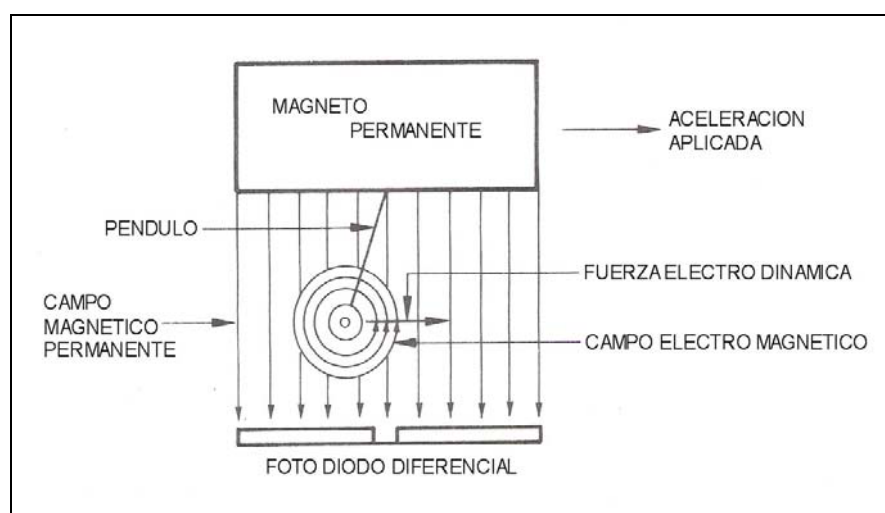


Figura 9.- Interacción del Campo Magnético, [9].

El acelerómetro B250 trabaja con una tensión de  $\pm 15$  VDC y mide la aceleración en una sola dirección, el montaje tiene dos dispositivos, alineados ortogonalmente con respecto a la línea de crujía (eje X) y línea transversal (eje Y) que censan el balanceo y cabeceo respectivamente. La cantidad de corriente requerida para mantener el equilibrio es directamente proporcional a la aceleración aplicada, y puede ser medida como un voltaje de corriente continua (VDC) a

través de una resistencia de precisión cuya sensibilidad es de 2 V/g, aplicando la Ley de Ohm, conectada en serie con el péndulo, como se muestra en la figura 10.

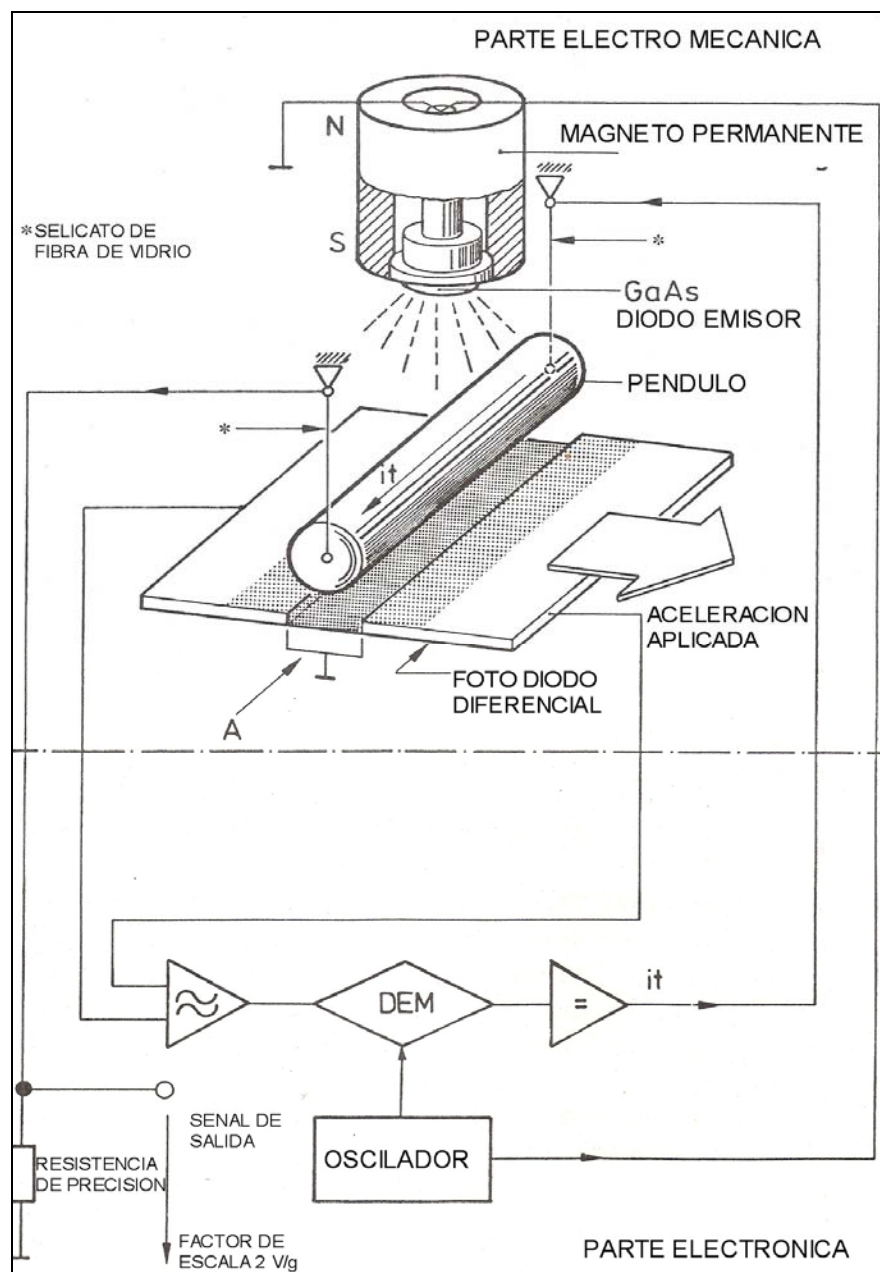


Figura 10.- Esquema funcional del acelerómetro, [9].

## Procedimiento para la adquisición de datos

La plataforma inercial genera seis señales, anteriormente mencionadas, que son enviadas hacia un computador central, ubicada en el C.O.C.<sup>3</sup>, en este punto la señal es almacenada y direccionada a los diferentes sistemas de armas y de gobierno. Mediante un programa de adquisición de datos desarrollado por el DINDES<sup>4</sup>, la señal es procesada para posteriormente ser presentada en una pantalla de control. Los intervalos de escaneo por segundo y el archivo de resultados son definidos previamente durante la programación, y en esta forma se obtendrán los ángulos de cabeceo y balanceo respectivos. Los datos adicionales que presenta el programa son aquellos relacionados con las condiciones meteorológicas, posición geográfica, rumbo - velocidad GPS y rumbo - velocidad de plataforma, algunos de estos son innecesarios para el presente trabajo. El computador central posee una tarjeta de adquisición de datos sincro-digital y transforma la señal sincrónica (400 Hz) de la plataforma en digital, que fácilmente se la puede procesar para ser distribuida a las diferentes estaciones de combate. Los acelerómetros de medición se encuentran integrados como dispositivos de la plataforma inercial ubicada en la cubierta 200, junto a la sala de giro, figura 11.

---

<sup>3</sup> Centro de Comando Operativo y Control

<sup>4</sup> Dirección de Investigación y Desarrollo de la Armada

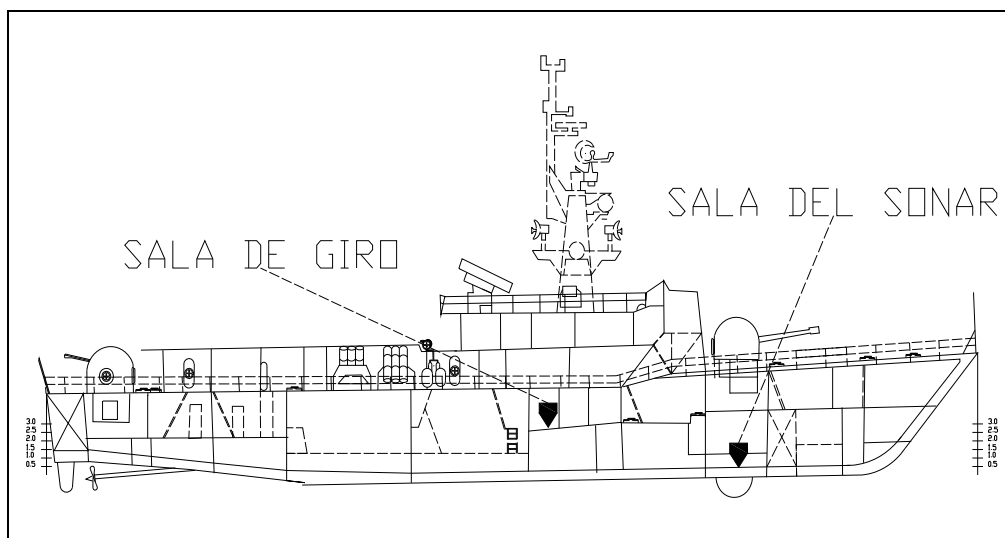


Figura 11.- Ubicación de los sensores de medición.

Cabe mencionar que durante las navegaciones de prueba, realizadas para avalizar el correcto funcionamiento del sistema, la Plataforma Inercial PL 41, presentó fallas en los módulos de amplificación de los movimientos de cabeceo y balanceo. Por lo que no se dispuso de este sistema para la recolección de datos durante los periodos de medición.

Las primeras mediciones fueron hechas durante el periodo del 28 de Diciembre del 2006 al 12 de Enero del 2007, abordo de la corbeta “Galápagos”, con un acelerómetro de marca Bruel & Kjaer, modelo 4370, con una sensibilidad de 80 mv/g, rango de frecuencia de trabajo de 5 Hz a 4.8 KHz y tiene una región de resonancia de 16 KHz con

polaridad positiva en movimientos perpendiculares con respecto a la superficie hacia fuera.

La segunda prueba se la realizó desde el 25 al 30 de Junio del 2007 y se utilizó, además del acelerómetro, un inclinómetro biaxial de marca Applied Geomechanics, modelo 900, con 2 canales de salida para las señales de cabeceo (X) y balanceo (Y), 2.5 VDC estándar, rango límite de medición  $\pm 25$  grados (50 grados expandible), factor de escala promedio 10 grados/V. En la foto 1 se muestra los sensores utilizados:

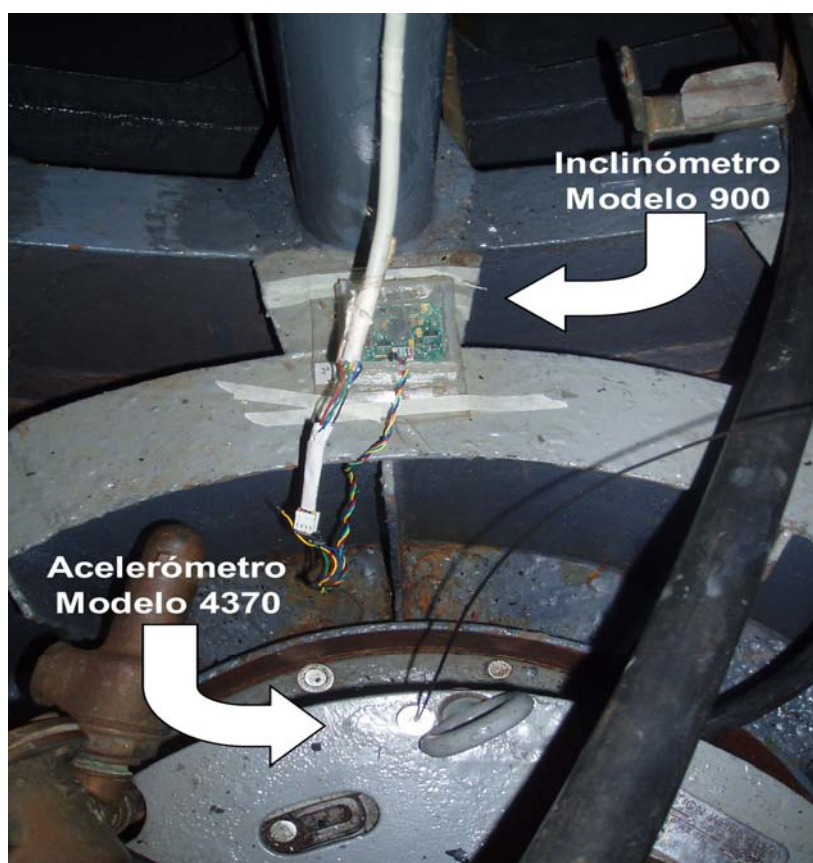


Foto1. Sensores utilizados durante las pruebas de medición.

Los sensores registran movimientos verticales y laterales mediante una diferencia de voltaje, la cual es proporcional al desplazamiento censado. Los voltajes son almacenados en un computador portátil usando una tarjeta de adquisición de datos, marca DAQP Series Card, modelo 308, para ser procesada posteriormente. Los voltajes del acelerómetro e inclinómetro son multiplicados por los factores de conversión respectivos para encontrar los valores de aceleración del movimiento vertical en gravedades y los ángulos de inclinación de los movimientos de cabeceo y balanceo en grados. Los ángulos de inclinación obtenidos deben ser transformados en términos de aceleración, mediante una doble diferenciación matemática,  $\left(\frac{\delta^2\theta}{dt^2}\right)$  en  $\text{rad/s}^2$  para finalmente almacenarlos, en conjunto con las mediciones del acelerómetro, en unas hojas de cálculo EXCEL y clasificarlos en archivos según la dirección, velocidad y condición de carga del buque.

En las fotos 2a y 2b se muestra la disposición de los sensores, en las dos pruebas realizadas, la primera entre 28 de diciembre del 2006 al 12 de enero del 2007 y la segunda desde 25 al 30 de junio del 2007 respectivamente. Este equipo se ubicó en la Sala del Sonar, cubierta 300, sección proa de la embarcación:

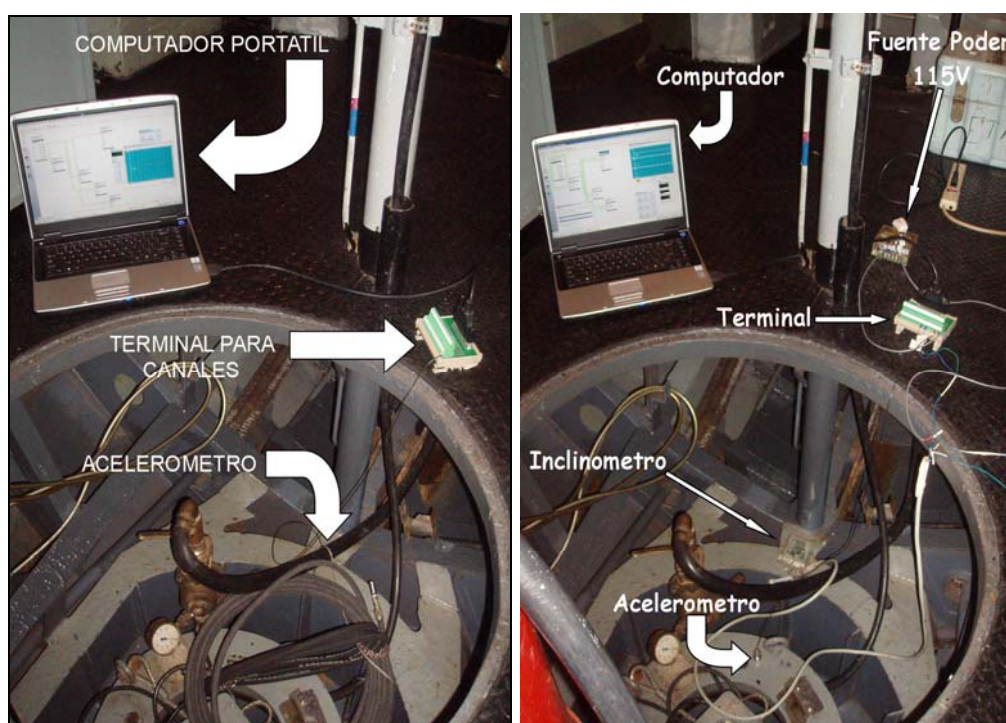


Foto 2.- Disposición de los equipos de medición: acelerómetro modelo 4370 en la prueba desde el 28/12/06 al 12/01/07 (a). Ubicación del inclinómetro y acelerómetro en la segunda prueba 25/06/07 al 30/06/07 (b).

La dirección de incidencia de la ola sobre el casco se determina con respecto a la dirección del viento verdadero; en cada una de las mediciones se registra la fuerza y dirección del viento, tanto el verdadero como el relativo. La diferencia que existe entre ellas es que el primero es medida con respecto al norte geográfico y el segundo con respecto a la proa de la embarcación. Para establecer la dirección de impacto de la ola se emplearán los datos de viento con respecto al norte geográfico. En la figura 12 se muestra el caso en que el buque estuviera navegando con rumbo  $285^\circ$ ; los sensores que miden la

fuerza y dirección del viento registran un viento verdadero por el  $215^{\circ}$  que corresponde a la misma dirección del tren de olas, haciendo referencia con la proa del buque en sentido antihorario, el tren de olas se aproxima a una marcación relativa del  $070^{\circ}$ . Cuando el buque encuentra la ola por proa, el ángulo de incidencia es de  $180^{\circ}$ , por la amura  $135^{\circ}$ , cuadra  $90^{\circ}$ , aleta  $45^{\circ}$  y popa  $000^{\circ}$ .

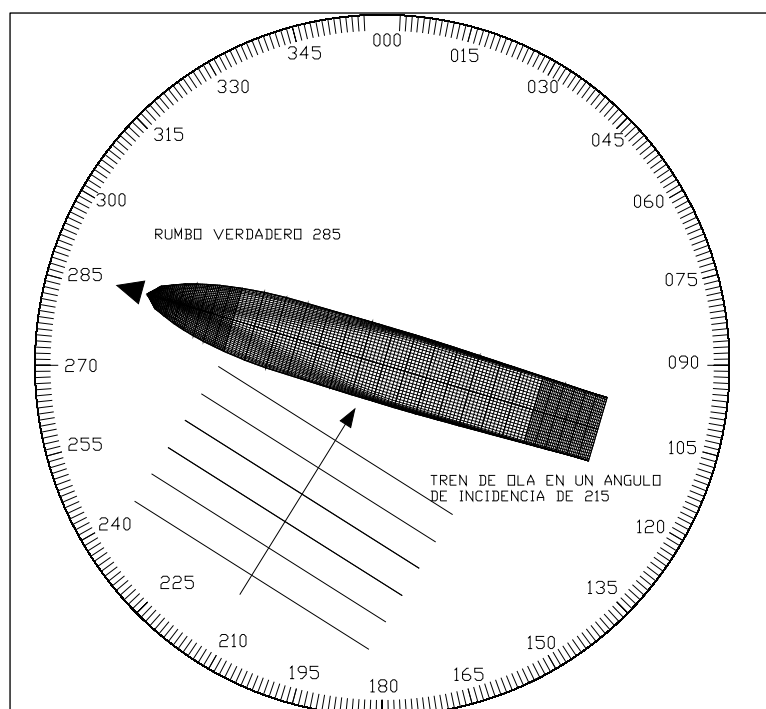


Figura 12.- Rumbo y dirección de la embarcación, incluido el tren de olas.

#### 1.4 Resumen de los resultados de las pruebas.-

##### Primera Prueba

La primera prueba se la realizó durante el periodo del 28 de diciembre del 2006 al 12 de enero del 2007. Durante estas mediciones se empleó únicamente el acelerómetro 4370, para registrar las aceleraciones verticales del levantamiento ( $\ddot{\xi}_3$ ) del buque. Los datos se almacenaron en un computador portátil con una razón de escaneo de 20 scan/seg para cada condición de carga reportada, durante un intervalo de 5 minutos, obteniéndose los siguientes resultados:

##### Máxima Carga

En esta condición la unidad tiene un desplazamiento aproximado de 750 ton, con una velocidad de viento promedio de 6 nudos provenientes del sur, que equivale a un Estado de Mar 2, como se muestra en el siguiente cuadro:

| RUMBO | VELOCIDAD |      |      | ANGULO DE INCIDENCIA ( $\mu$ ) | ESTADO DE MAR | NOMBRE DEL ARCHIVO |
|-------|-----------|------|------|--------------------------------|---------------|--------------------|
|       |           | RPM  | Kn   | Grados                         |               |                    |
| 270°  | Av 1      | 650  | 12.5 | 125°                           | 2             | DicxAV1            |
| 275°  | Av 3      | 800  | 16.5 | 122°                           | 2             | DicxAV3            |
| 285°  | Av 4      | 950  | 19   | 105°                           | 2             | DicxAV4            |
| 285°  | Av 5      | 1100 | 21.3 | 095°                           | 2             | DicxAV5            |

Tabla 6.- Tabla de condiciones meteorológicas durante la prueba.

La dirección de la ola es con respecto a la proa del buque, y guarda simetría con respecto al plano de longitudinal de crujía, el comportamiento será el mismo en cualquiera de las dos bandas siempre y cuando el ángulo de incidencia sea igual. A continuación se muestra la tabla resumen en el que se detallan los valores estadísticos de los resultados de la medición:

| Corbeta con Ola de encuentro con respecto a la proa |                       |                       |                       |                       |
|-----------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                                     | Amura<br>125°<br>(%g) | Amura<br>122°<br>(%g) | Banda<br>105°<br>(%g) | Banda<br>095°<br>(%g) |
| Pico                                                | 0.077                 | 0.094                 | 0.091                 | 0.087                 |
| Media                                               | 0.016                 | 0.018                 | 0.020                 | 0.017                 |
| RMS                                                 | 0.020                 | 0.022                 | 0.025                 | 0.022                 |
| 1/3                                                 | 0.030                 | 0.034                 | 0.036                 | 0.033                 |
| 1/10                                                | 0.043                 | 0.046                 | 0.048                 | 0.046                 |

Tabla 7.- Estadística de la Aceleración Vertical, %g, medida desde la Sala de Sonar.

### Carga Media

Para esta condición la unidad tiene un desplazamiento 725 ton, las condiciones de viento, en promedio, son las mismas que en la carga anterior y como resultado da un Estado de Mar 2. Las condiciones presentes durante esta prueba y los resultados obtenidos son:

| RUMBO | VELOCIDAD |      |      | ANGULO DE<br>INCIDENCIA<br>( $\mu$ ) | ESTADO<br>DE MAR | NOMBRE<br>DEL<br>ARCHIVO |
|-------|-----------|------|------|--------------------------------------|------------------|--------------------------|
|       |           | RPM  | Kn   | Grados                               |                  |                          |
| 195°  | Av 1      | 650  | 10.2 | 008°                                 | 2                | DicmAV1                  |
| 195°  | Av 3      | 800  | 15.4 | 007°                                 | 2                | DicmAV3                  |
| 195°  | Av 4      | 950  | 18.5 | 007°                                 | 2                | DicmAV4                  |
| 195°  | Av 5      | 1100 | 20.4 | 007°                                 | 2                | DicmAV5                  |

Tabla 8.- Tabla de condiciones meteorológicas durante la prueba.

| Corbeta con Ola de encuentro con respecto a la proa |                      |                      |                      |                      |
|-----------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                                                     | Proa<br>008°<br>(%g) | Proa<br>007°<br>(%g) | Proa<br>007°<br>(%g) | Proa<br>007°<br>(%g) |
| Pico                                                | 0.092                | 0.119                | 0.058                | 0.133                |
| Media                                               | 0.017                | 0.024                | 0.023                | 0.029                |
| RMS                                                 | 0.021                | 0.030                | 0.033                | 0.036                |
| 1/3                                                 | 0.029                | 0.046                | 0.041                | 0.055                |
| 1/10                                                | 0.039                | 0.062                | 0.052                | 0.075                |

Tabla 9.- Estadística de la Aceleración Vertical medida desde la Sala de Sonar.

## Segunda Prueba

Se la realizó desde el 25 al 30 de junio del 2007; se utilizó un inclinómetro biaxial marca Applied Geomechanics, modelo 900, además del acelerómetro, antes mencionado, y, se almacenó la información con la misma razón de escaneo de 20 scan/seg. Los valores registrados corresponden a los movimientos de cabeceo, balanceo y levantamiento. A continuación se presentan un resumen de las estadísticas de las aceleraciones obtenidas.

## Carga Máxima

En esta prueba el Estado de Mar presente es 4, con un desplazamiento aproximado de 754 toneladas, las mediciones realizadas corresponden a las aceleraciones de los movimientos de cabeceo ( $\ddot{\xi}_5$ ), balanceo ( $\ddot{\xi}_4$ ) y levantamiento ( $\ddot{\xi}_3$ ). Los nombres de los archivos de los resultados obtenidos se encuentran detallados en cada una de las tablas de resumen que se presentan a continuación:

| Corbeta con Ola de encuentro con respecto a la proa |                    |                    |                |                    |                    |                |                    |                    |                |
|-----------------------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|
|                                                     | Proa               |                    |                | Banda              |                    |                | Popa               |                    |                |
|                                                     | ProaxAV1           |                    |                | BandaxAV1          |                    |                | PopaxAV1           |                    |                |
|                                                     | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ |
|                                                     | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              |
| Pico                                                | 4.24               | 3.98               | 0.46           | 2.75               | 3.19               | 0.47           | 3.06               | 2.86               | 0.33           |
| Media                                               | 0.57               | 0.85               | 0.08           | 0.47               | 0.63               | 0.09           | 0.46               | 0.70               | 0.06           |
| RMS                                                 | 0.75               | 1.07               | 0.11           | 0.60               | 0.79               | 0.11           | 0.59               | 0.86               | 0.10           |
| 1/3                                                 | 1.11               | 1.62               | 0.16           | 0.90               | 1.19               | 0.17           | 0.88               | 1.30               | 0.14           |
| 1/10                                                | 1.64               | 2.24               | 0.23           | 1.28               | 1.65               | 0.23           | 1.23               | 1.74               | 0.20           |

Tabla 10.- Estadística de las Aceleraciones obtenidas con velocidad Avante 1.

| Corbeta con Ola de encuentro con respecto a la proa |                    |                    |                |                    |                    |                |                    |                    |                |
|-----------------------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|
|                                                     | Proa               |                    |                | Banda              |                    |                | Popa               |                    |                |
|                                                     | ProaxAV3           |                    |                | BandaxAV3          |                    |                | PopaxAV3           |                    |                |
|                                                     | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ |
|                                                     | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              |
| Pico                                                | 4.29               | 4.04               | 0.59           | 2.09               | 2.64               | 0.46           | 3.16               | 2.69               | 0.38           |
| Media                                               | 0.61               | 0.79               | 0.12           | 0.45               | 0.55               | 0.10           | 0.45               | 0.55               | 0.08           |
| RMS                                                 | 0.80               | 1.00               | 0.15           | 0.57               | 0.70               | 0.13           | 0.57               | 0.69               | 0.10           |
| 1/3                                                 | 1.19               | 1.52               | 0.23           | 0.85               | 1.06               | 0.19           | 0.86               | 1.04               | 0.15           |
| 1/10                                                | 1.77               | 2.12               | 0.31           | 1.18               | 1.49               | 0.26           | 1.20               | 1.44               | 0.21           |

Tabla 11. Estadística de las Aceleraciones obtenidas con velocidad Avante 3.

| Corbeta con Ola de encuentro con respecto a la proa |                    |                    |                |                    |                    |                |                    |                    |                |
|-----------------------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|
|                                                     | Proa               |                    |                | Banda              |                    |                | Popa               |                    |                |
|                                                     | ProaxAV5           |                    |                | BandaxAV5          |                    |                | PopaxAV5           |                    |                |
|                                                     | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ |
|                                                     | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              | Rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              |
| Pico                                                | 4.43               | 7.12               | 1.33           | 3.26               | 4.12               | 0.64           | 2.59               | 3.46               | 0.44           |
| Media                                               | 0.64               | 1.00               | 0.29           | 0.49               | 0.89               | 0.13           | 0.47               | 0.83               | 0.09           |
| RMS                                                 | 0.84               | 1.27               | 0.36           | 0.62               | 1.12               | 0.17           | 0.60               | 1.04               | 0.11           |
| 1/3                                                 | 1.25               | 1.91               | 0.55           | 0.93               | 1.68               | 0.25           | 0.90               | 1.56               | 0.16           |
| 1/10                                                | 1.86               | 2.68               | 0.75           | 1.29               | 2.32               | 0.35           | 1.26               | 2.13               | 0.23           |

Tabla 12.- Estadística de las Aceleraciones obtenidas con velocidad Avante 5.

### Carga Media

En esta condición de carga, el estado de mar presente fue de 3 y se registraron los movimientos correspondientes a cabeceo ( $\ddot{\xi}_5$ ), balanceo ( $\ddot{\xi}_4$ ) y levantamiento ( $\ddot{\xi}_3$ ). En esta ocasión solamente se midió la respuesta en las tres direcciones como se indica a continuación:

| Corbeta con Ola de encuentro con respecto a la proa |                    |                    |                |                    |                    |                |                    |                    |                |
|-----------------------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|
|                                                     | Proa               |                    |                | Banda              |                    |                | Popa               |                    |                |
|                                                     | ProamAV1           |                    |                | BandamAV1          |                    |                | PopamAV1           |                    |                |
|                                                     | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ |
|                                                     | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              |
| Pico                                                | 2.04               | 3.10               | 0.54           | 7.82               | 7.89               | 1.02           | 2.93               | 3.03               | 0.49           |
| Media                                               | 0.38               | 0.48               | 0.12           | 0.37               | 0.48               | 0.10           | 0.36               | 0.47               | 0.09           |
| RMS                                                 | 0.48               | 0.62               | 0.15           | 0.50               | 0.64               | 0.13           | 0.45               | 0.59               | 0.11           |
| 1/3                                                 | 0.72               | 0.93               | 0.23           | 0.71               | 0.92               | 0.19           | 0.68               | 0.89               | 0.16           |
| 1/10                                                | 1.01               | 1.36               | 0.31           | 1.01               | 1.32               | 0.27           | 0.95               | 1.25               | 0.23           |

Tabla 13.- Estadística de las Aceleraciones obtenidas con velocidad Avante 1.

| Corbeta con Ola de encuentro con respecto a la proa |                    |                    |                |                    |                    |                |                    |                    |                |
|-----------------------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|
|                                                     | Proa               |                    |                | Banda              |                    |                | Popa               |                    |                |
|                                                     | ProamAV3           |                    |                | BandamAV3          |                    |                | PopamAV3           |                    |                |
|                                                     | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ |
|                                                     | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              |
| Pico                                                | 2.54               | 3.53               | 0.51           | 7.82               | 7.40               | 0.91           | 2.12               | 3.45               | 0.34           |
| Media                                               | 0.38               | 0.49               | 0.11           | 0.36               | 0.47               | 0.10           | 0.39               | 0.50               | 0.08           |
| RMS                                                 | 0.49               | 0.65               | 0.14           | 0.49               | 0.62               | 0.12           | 0.49               | 0.65               | 0.10           |
| 1/3                                                 | 0.74               | 0.95               | 0.21           | 0.70               | 0.89               | 0.22           | 0.74               | 0.97               | 0.15           |
| 1/10                                                | 1.06               | 1.43               | 0.28           | 1.00               | 1.31               | 0.30           | 1.04               | 1.44               | 0.21           |

Tabla 14.- Estadística de las Aceleraciones obtenidas con velocidad Avante 3.

| Corbeta con Ola de encuentro con respecto a la proa |                    |                    |                |                    |                    |                |                    |                    |                |
|-----------------------------------------------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|--------------------|----------------|
|                                                     | Proa               |                    |                | Banda              |                    |                | Popa               |                    |                |
|                                                     | ProamAV5           |                    |                | BandamAV5          |                    |                | PopamAV5           |                    |                |
|                                                     | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ | $\ddot{\xi}_5$     | $\ddot{\xi}_4$     | $\ddot{\xi}_3$ |
|                                                     | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              | rad/s <sup>2</sup> | rad/s <sup>2</sup> | g              |
| Pico                                                | 2.37               | 2.81               | 0.83           | 2.24               | 3.70               | 0.54           | 2.60               | 3.23               | 0.48           |
| Media                                               | 0.37               | 0.49               | 0.13           | 0.38               | 0.50               | 0.12           | 0.38               | 0.47               | 0.13           |
| RMS                                                 | 0.48               | 0.63               | 0.17           | 0.49               | 0.66               | 0.15           | 0.48               | 0.61               | 0.16           |
| 1/3                                                 | 0.71               | 0.93               | 0.25           | 0.73               | 0.97               | 0.23           | 0.72               | 0.91               | 0.25           |
| 1/10                                                | 1.00               | 1.34               | 0.36           | 1.04               | 1.41               | 0.31           | 1.01               | 1.31               | 0.33           |

Tabla 15.- Estadística de las Aceleraciones obtenidas con velocidad Avante 5.

# CAPITULO 2

## 2. ANALISIS DE LAS MEDICIONES REALIZADAS

### 2.1 Cálculo del Espectro del Mar.-

El comportamiento del mar en función del tiempo es un proceso muy complejo debido a la naturaleza aleatoria del mismo. Para su descripción se han desarrollado modelos matemáticos que permiten predecir razonablemente dicho comportamiento. Estas formulaciones se basan en observaciones de los diferentes estados de mar para establecer su espectro. El Espectro del Mar es una medida de la energía contenida en un rango de frecuencia y está compuesta de las olas armónicas. En este trabajo se empleará la formulación propuesta por la ITTC<sup>5</sup>, [1]:

$$S(\omega_W) = \frac{A}{\omega_W^5} e^{-\frac{B}{\omega_W^4}} \left[ \text{cm}^2 \text{seg} \right] \quad (1)$$

---

<sup>5</sup> International Towing Tank Conference, 1980.

Donde:

$$A = 8.1 \times 10^{-3} \text{ g}^2$$

$$B = 3.11 \times 10^4 / H_{1/3}^2$$

$\omega_{\omega}$  = Frecuencia de la ola componente (rad/s)

El valor de la altura significativa<sup>6</sup>,  $H_{1/3}$  depende del estado de mar que se quiere analizar. Si la embarcación está desplazándose a una velocidad  $V_s$ , y su dirección forma un ángulo  $\mu$  con la de las olas, que viajan a una velocidad  $V_w$ , como se muestra en la figura 13, el buque encuentra las olas con una frecuencia:

$$\omega_e = \omega_{\omega} - \frac{\omega_{\omega}^2 V_s}{g} \cos \mu \quad (2)$$

Donde:

$\omega_e$  = Frecuencia de encuentro (rad/s)

$\omega_{\omega}$  = Frecuencia circular de la ola (rad/s)

$V_s$  = Velocidad de avance del buque (cm/s)

$g$  = gravedad ( $\text{cm/s}^2$ )

$\mu$  = ángulo de incidencia

---

<sup>6</sup> Valor promedio del 1/3 de las olas más grandes

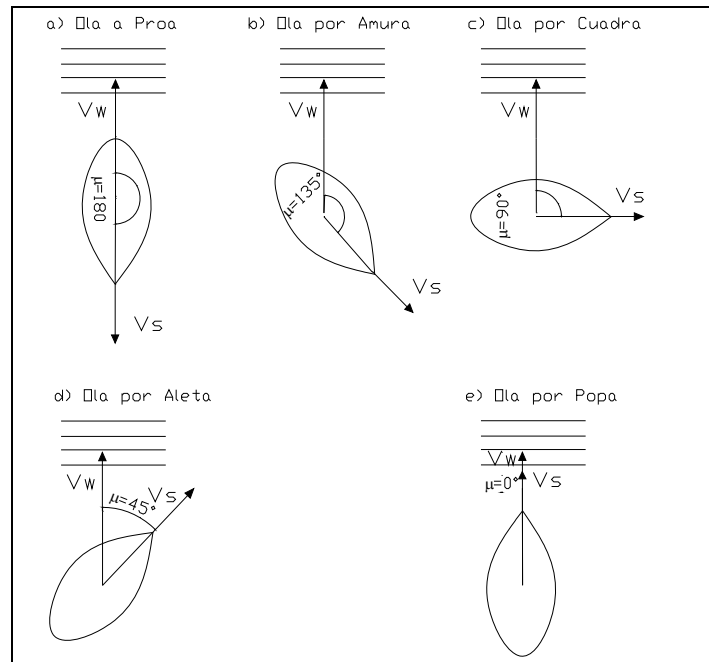


Figura 13.- Referencia Direccional para los movimientos del buque con respecto al tren de olas, [4].

Además, es necesario transformar el espectro del Mar en términos de frecuencia de encuentro, con esto la energía total del Estado de Mar no se altere y para ello se empleará la siguiente expresión, [4]:

$$S(\omega_e) = S(\omega_w) \frac{1}{1 - (2\omega_w V / g) \cos \mu} \quad (3)$$

En otras palabras la energía total y la altura significativa  $H_{1/3}$ , de un estado de mar en particular, permanece constante si se toma con respecto a la frecuencia circular de la ola ( $\omega_w$ ) o de encuentro ( $\omega_e$ ). De tal manera que satisfaga la siguiente ecuación:

$$\int S(\omega_e) \delta \omega_e = \int S(\omega_w) \delta \omega_w \quad (4)$$

## Estados de Mar

Los estados de mar clasifican el comportamiento del mismo según las condiciones de viento y altura significativa de la ola que presentan en un lugar en particular. Los estados de mar más frecuentes durante el año, en la región del Pacífico Septentrional son los siguientes:

- El Estado de Mar 2, presenta vientos de 4 a 6 nudos, sobre la superficie del mar. Tiene pequeñas olas cortas y pronunciadas; las crestas son de apariencia de espejo y no rompen. Se lo conoce como “Flojito” cuya altura significativa es menor a 30 centímetros, foto 3a.
- El Estado de Mar 3, tiene vientos de 7 a 10 nudos, las olas son mayores y sus crestas comienzan a romperse; la espuma no es blanca con apariencia de espejo, quizás moteada de blanco. Se denomina “Flojo”, con una altura significativa de entre 50 a 100 centímetros, foto 3b.
- El estado de Mar 4 es muy común en épocas de verano, en los aguajes. Se caracteriza por presentar vientos de 11 a 16 nudos provenientes del sur, con olas de 1.0 a 1.5 metros de altura y se lo llama “Bonancible”, Foto 3c.



Foto 3.- Estados de Mar presentes durante las Pruebas: El Estado de Mar 2, [7], (a). El Estado de Mar 3, tomado a bordo del BAE "Galápagos" el 30/12/2006 (b). El Estado de Mar 4, tomado a bordo del BAE "Galápagos" el 27/06/2007 (c).

## Espectro de Olas

Como ya se dijo antes, el espectro representa la energía contenida en un intervalo de frecuencia. En las figuras 14a, 14b y 14c se muestran los espectros correspondientes a los tres estados de mar, que comúnmente se presentan en las costas ecuatorianas, en las tres direcciones  $\mu = 180^\circ$ ,  $135^\circ$  y  $90^\circ$ . Es evidente que el espectro correspondiente a  $\mu = 090^\circ$  es el de mayor amplitud comparado con los demás espectros, y además coincide con el de la ola ya que  $\cos 90^\circ = 0$ , reemplazando en la ecuación (3) se obtiene:  $S(\omega_e) = S(\omega_w)$ . Nótese como disminuye el valor de la ordenada, según cambia el ángulo de incidencia,  $\mu$ , de tal manera que el área bajo la curva sea la misma entre el espectro de la ola y el de encuentro. También se puede ver que conforme va aumentando la severidad del mar, los rangos de frecuencia van disminuyendo y la cantidad de energía se distribuye; concentrándose en la región de bajas frecuencias. Cuando  $\mu = 180^\circ$ , el buque encuentra las olas por la proa y la energía, como se ve en los ejes de las ordenadas de las figuras, disminuye significativamente para satisfacer la ecuación (4), en este caso la energía se distribuye en un rango de altas frecuencias, [4]. Un caso especial es cuando el buque comienza a girar dejando las olas que lo alcancen por popa,  $\mu = 0^\circ$ . En ese momento las frecuencias de encuentro se hacen negativas debido

a que la velocidad de avance es mayor al de la ola,  $V > V_{\omega}$  y físicamente las olas alcanzan al buque por Popa. La longitud de ola ( $L_{\omega}$ ), es la distancia que existe entre crestas adyacentes y es útil para establecer el grado de severidad del impacto de las olas. Cuando un tren olas sucesivo que normalmente tiene una longitud de onda corta, la energía tiende a dispersarse a lo largo de esta perturbación haciendo que la amplitud decrezca; caso contrario sucede cuando la energía se agrupa en olas más espaciadas y con mayor amplitud. La fórmula de la longitud de ola en función de la frecuencia circular ( $\omega_{\omega}$ ) es, [4]:

$$L_{\omega} = \frac{2\pi g}{\omega_{\omega}^2} \quad (5)$$

Reemplazando la frecuencia estacionaria de cada estado de mar, se obtiene:

| Estado de Mar | $\omega_{\omega}$ |       | $g$     | $L_{\omega}$ |
|---------------|-------------------|-------|---------|--------------|
|               | Hz                | Rad/s | $m/s^2$ | m            |
| 2             | 0.37              | 2.29  | 9.8     | 11.71        |
| 3             | 0.23              | 1.42  | 9.8     | 30.54        |
| 4             | 0.18              | 1.10  | 9.8     | 50.93        |

Tabla 16.- Longitud de Onda de los Estados de Mar para la Máxima Energía.

En el estado de Mar 4, no solo es el que tiene mayor energía sino también el valor máximo y se presenta con la ola más larga.

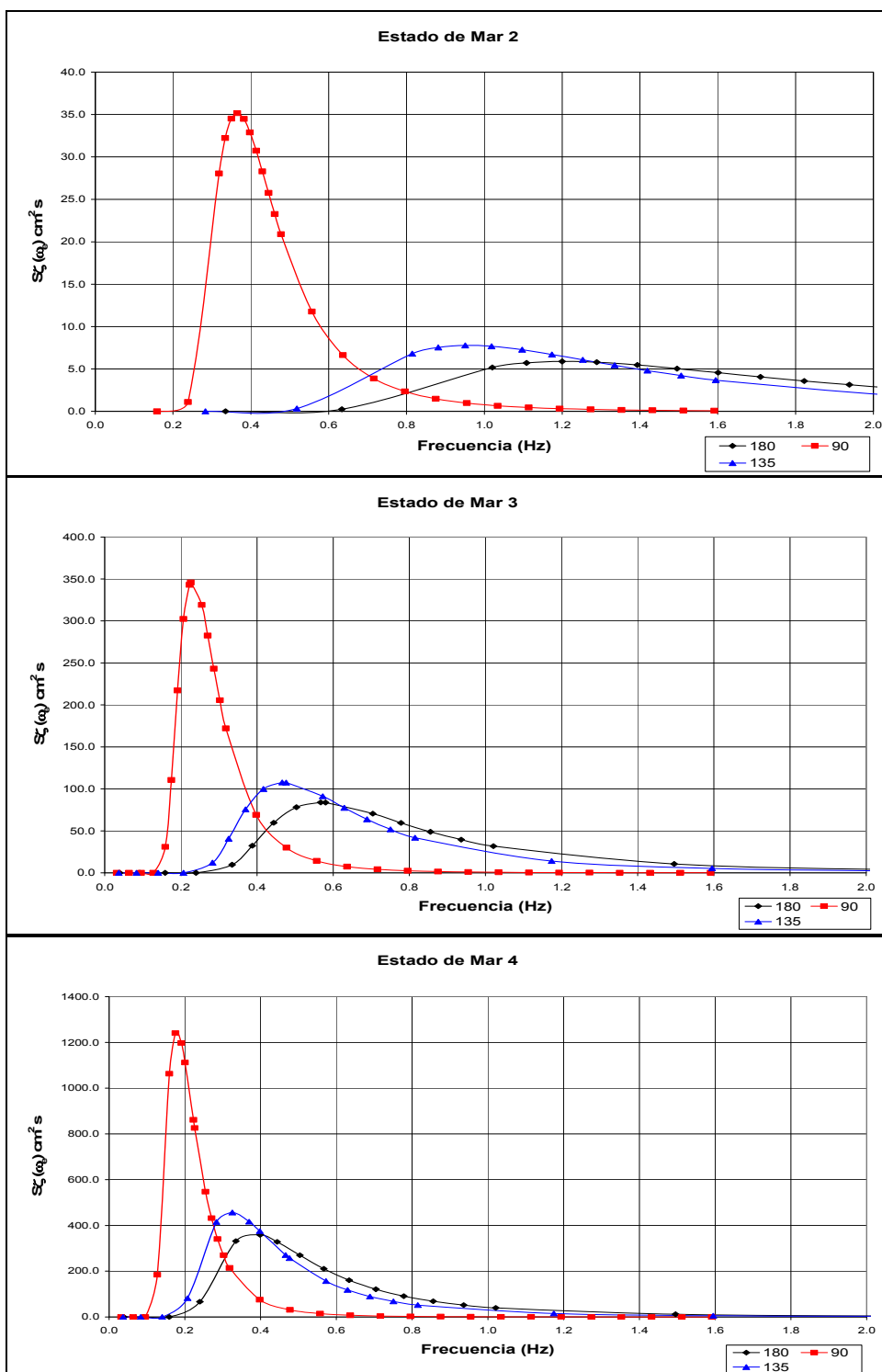


Figura 14a.- Espectro de Ola Mar 2. Figura 14b.- Mar 3. Figura 14c.- Mar 4.

## 2.2 Estimación de las frecuencias de Levantamiento, Cabeceo y Balance.-

El buque navegando está sujeto a las múltiples fuerzas de la naturaleza como: viento, olas, corriente, etc. Estas fuerzas producen movimientos, que se pueden clasificar en seis tipos: tres lineales y tres angulares con respecto a los ejes ortogonales principales (x, y, z). Solamente tres de estos movimientos son de carácter oscilatorio, debido a que actúa una fuerza restauradora, sobre el casco, cuando este es sacado de su equilibrio. Estos son: Levantamiento, Balance y Cabeceo como se muestra en la figura 15.

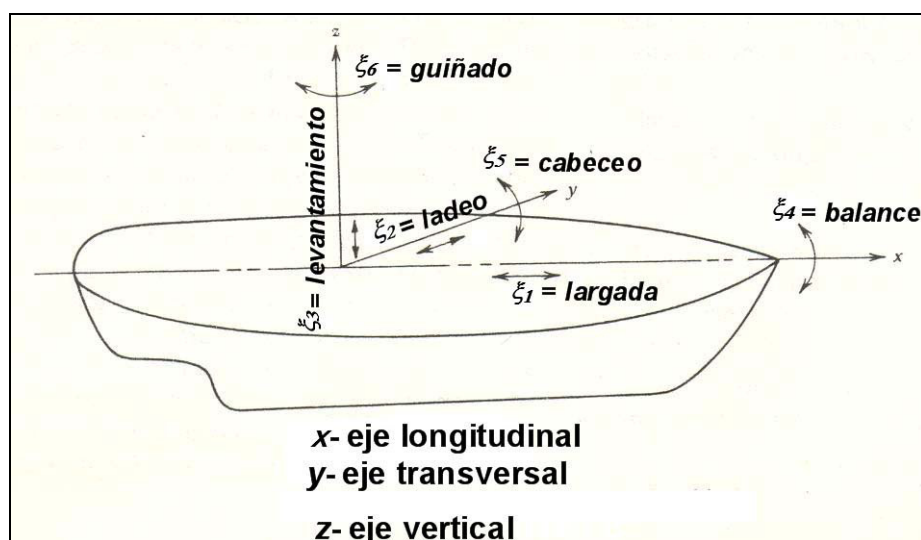


Figura 15.- Movimientos característicos del Buque con respecto a los ejes ortogonales, [4].

## Levantamiento

Es el movimiento vertical que experimenta el buque. El cálculo analítico del levantamiento de un buque en olas es complejo, y con el fin de obtener un valor de referencia para la frecuencia natural ( $T_z$ ), se empleará la formulación presentada en la referencia [4]:

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{a}{c}} \quad (3)$$

Donde:

$a$  = masa virtual (Ton)

$c$  = coeficiente de la fuerza restauradora (Ton/m)

La masa virtual ( $a$ ), es la suma del desplazamiento ( $\Delta$ ) del buque (*ton*) más la masa añadida ( $a_z$ ), que se asumirá el 90% del desplazamiento del navío ( $0.9 M$ ), [4]:

$$a = M + a_z = M + 0.9M = 1.9 \frac{\Delta}{g}, \text{ y,}$$

$$c = \rho g A_{WP}$$

Reemplazando en (3), en la que se empleó como coeficiente de bloque  $C_B = 0.467$  y coeficiente de plano de agua  $C_{WP} = 0.744$ , que se asume cambian según el calado:

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{1.9\Delta}{g\rho gLBC_{WP}}} = 2\pi \sqrt{\frac{1.9LBT C_B \times \rho g}{g\rho gLBC_{WP}}}$$

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{1.93T}{g}}$$

Finalmente se obtiene una expresión simplificada en función de una sola variable, el calado medio (T), cuya relación es directamente proporcional al cuadrado del periodo de oscilación. Entonces, para cada calado se tendrá un periodo diferente, según la condición de carga del buque como se muestra a continuación:

| Condición de carga | T<br>(m) | T <sub>z</sub><br>(s) | ω <sub>0</sub> |       |
|--------------------|----------|-----------------------|----------------|-------|
|                    |          |                       | Hz             | rad/s |
| Máxima             | 2.75     | 4.624                 | 0.216          | 1.360 |
| Media              | 2.70     | 4.582                 | 0.218          | 1.370 |
| Ligera             | 2.65     | 4.539                 | 0.220          | 1.382 |

Tabla 17.- Periodo y frecuencia de Levantamiento para diferentes condiciones de carga

Las frecuencias de levantamiento ( $\omega_0$ ), obtenidas corresponden al movimiento oscilatorio libre y sin amortiguamiento, es decir, no involucra la fuerza de excitación ni tampoco al coeficiente de amortiguamiento.

### **Cabeceo**

Se lo define como el movimiento angular con respecto a un eje que apunta en dirección transversal. Su estudio es importante desde el punto de vista de los efectos dinámicos que sufre una embarcación, por las siguientes implicaciones:

- Grado de incidencia sobre la proficiencia del personal, ("MSI").
- Embarque de agua por inmersión de la proa, ("Deck Wetness").
- Golpe súbito en la proa con la cresta de ola, ("Slamming").

El periodo natural del movimiento de Cabeceo es relativamente pequeño comparado con el de Levantamiento, y es importante minimizar estos efectos en el diseño de los buques. En la etapa inicial del proyecto de construcción, es recomendable diseñar popas con formas más redondeadas o llenas y proas finas con deflectores que amortigüen el movimiento; reduciendo de esta forma la posibilidad del

efecto de resonancia entre el periodo de oscilación de cabeceo con el de la ola de encuentro. En la referencia [4], el autor presenta algunas curvas de tendencia del periodo de cabeceo en función a la relación de eslora- desplazamiento, de algunas pruebas con modelos y buques reales como se muestra en la figura 16:

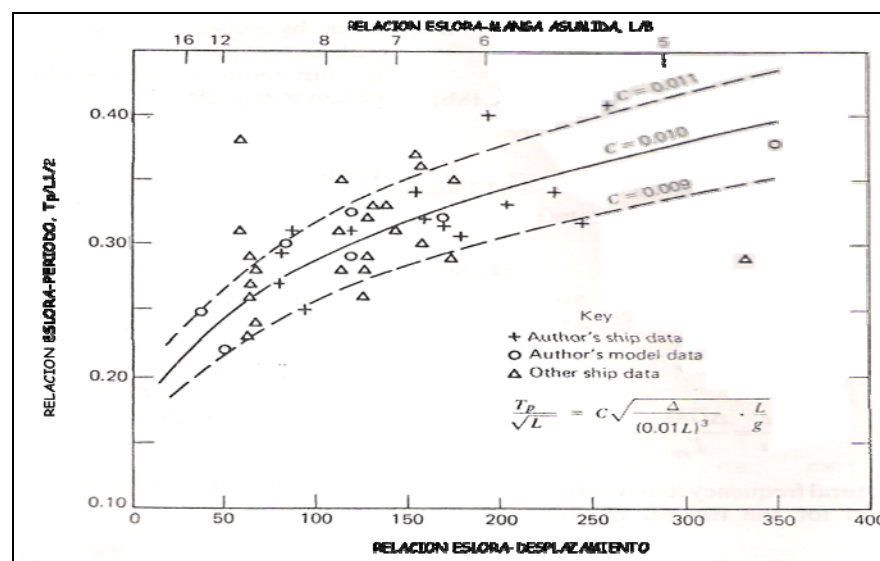


Figura 16.- Periodo de Cabeceo en función de la relación Eslora-Desplazamiento, [4].

y se obtiene la siguiente formulación:

$$\frac{T_p}{\sqrt{L}} = C \sqrt{\frac{\Delta}{(0.01L)^3} * \frac{L}{g}} \quad (4)$$

Donde:

$T_p$  = Periodo de Cabeceo (s)

$L$  = Eslora (ft)

$\Delta$  = Desplazamiento (Ton)

$C$  = Constante 0.009 – 0.011

El período del cabeceo ( $T_p$ ), está en función del desplazamiento ( $\Delta$ ) y la eslora ( $L$ ), por lo tanto para cada condición de carga, empleando un valor para  $C$  de 0.010, se obtiene las siguientes frecuencias de cabeceo ( $\omega_p$ ):

| Condición de Carga | $\Delta$<br>(Ton) | $L$<br>(ft) | $T_p$<br>(s) | $\omega_p$ |       |
|--------------------|-------------------|-------------|--------------|------------|-------|
|                    |                   |             |              | Hz         | rad/s |
| Máxima             | 750               | 189.6       | 3.52         | 0.284      | 1.784 |
| Media              | 725               | 189.6       | 3.45         | 0.282      | 1.772 |
| Ligera             | 680               | 189.6       | 3.35         | 0.298      | 1.872 |

Tabla 18.- Rango de periodo y frecuencia de Cabeceo para diferentes condiciones de carga.

## Balance

Es un movimiento oscilatorio angular con respecto a un eje longitudinal, muy parecido a los movimientos anteriormente descritos.

La experiencia indica que buques con una altura metacéntrica transversal ( $GM_T$ ) grande son menos confortables que aquellos que tienen un  $GM_T$  pequeño. Existe una relación inversamente proporcional entre la altura metacéntrica y el periodo de oscilación, lo que hace que el buen confort esté ligado con periodos largos, esto es,  $GM_T$  pequeños. La referencia [4], presenta la siguiente formulación para calcular el Periodo de Balance ó Rolido:

$$T_\phi = 2\pi \sqrt{\frac{I'_{xx}}{\Delta GM_T}} \quad (5)$$

donde:

$T_\phi$  = Periodo de Balance

$I'_{xx}$  = Momento virtual de inercia con respecto al eje x

$GM_T$  = Altura Metacéntrica transversal

El momento de inercia virtual de masa ( $I'_{xx}$ ) para el balance es igual al de el desplazamiento virtual ( $\Delta'$ ), por el radio de giro respecto de un eje longitudinal, al cuadrado. La masa virtual corresponde a la suma del desplazamiento del buque y la masa añadida que en este caso se asume como del 20% del desplazamiento inicial. El radio de giro del buque con respecto al eje x se expresa como una fracción de la

manga y normalmente se encuentran en el rango de  $0.33 \leq k_{xx} \leq 0.45$ , y, asumiendo el límite inferior y se tiene:

$$I'_{xx} = \frac{\Delta'}{g} k_{xx}^2 \quad (6)$$

$$\Delta' = 1.2 \Delta$$

$$K_{xx} = 0.33B$$

$$B = \text{Manga (m)}$$

| Condición de Carga | T    | $\Delta$ | $GM_T$ | $I'_{xx}$                 | $\omega_\phi$ |       |
|--------------------|------|----------|--------|---------------------------|---------------|-------|
|                    | m    | Ton      | m      | Ton $\times m \times s^2$ | Hz            | rad/s |
| Máxima             | 2.75 | 750      | 0.79   | 865                       | 0.132         | 0.829 |
| Mediana            | 2.7  | 725      | 0.81   | 836                       | 0.133         | 0.836 |
| Liviana            | 2.6  | 680      | 1.02   | 784                       | 0.150         | 0.942 |

Tabla 19.- Frecuencias del Balance ( $\omega_\phi$ ), para diferentes condiciones de carga.

### 2.3 Determinación de la densidad espectral de aceleración y energía de la respuesta.-

Las señales obtenidas de los movimientos de la corbeta están en función del tiempo y representan la amplitud de la respuesta, como se muestra en la figura 17. Estas pueden expresarse en unidades de aceleración como: gravedades (%g), para los desplazamientos, y,  $\text{rad/s}^2$  las rotaciones. Para analizar este tipo de señales, que están en

el dominio del tiempo<sup>7</sup>, tienen que convertirse en el dominio de la frecuencia, para determinar el rango de máxima de energía.

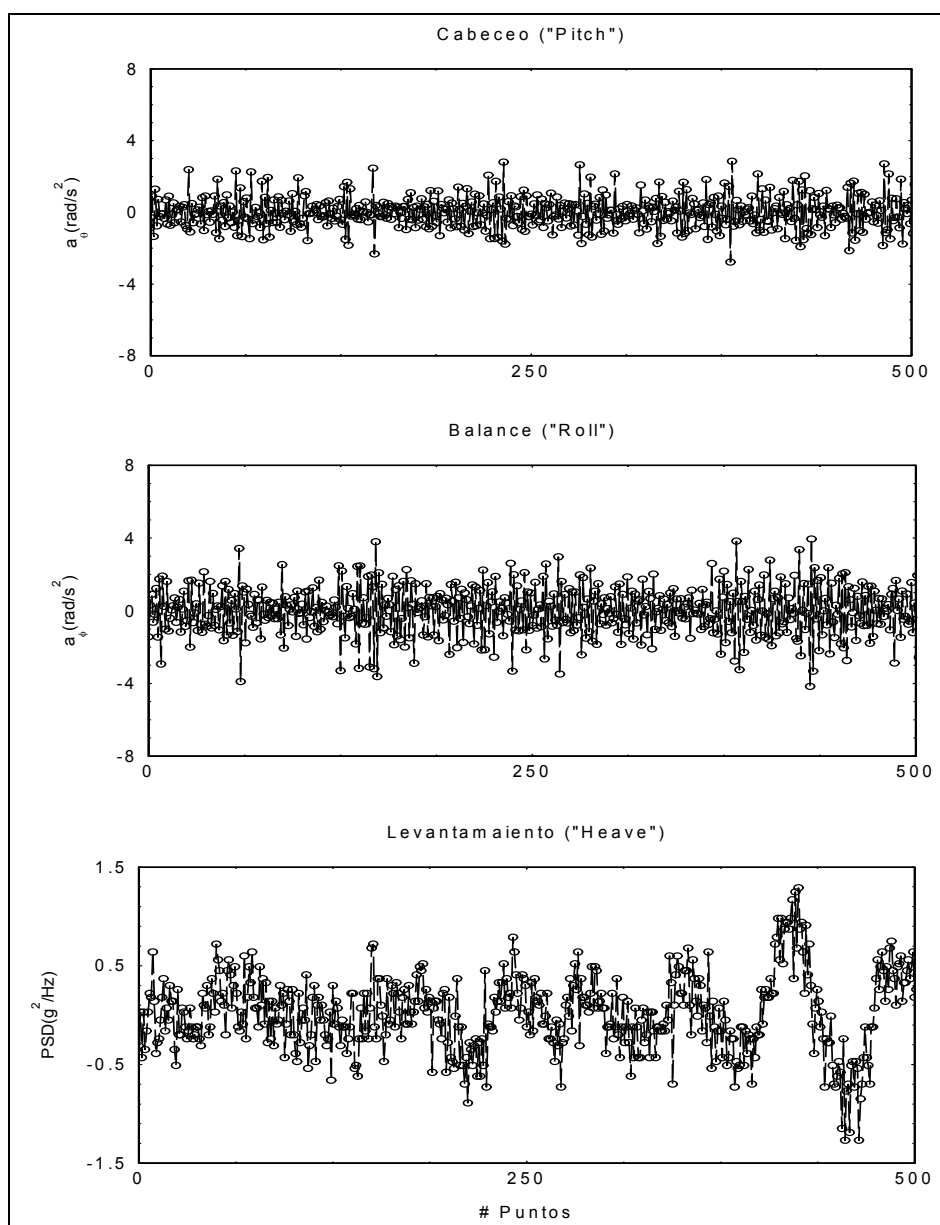


Figura 17.- Aceleraciones correspondientes a los movimientos de la Corbeta en Condición de Máxima Carga, 25 de Junio del 2007.

<sup>7</sup> Función aleatoria de tipo oscilatoria que esta sujeta al tiempo, [14].

## Espectro de Energía

El Espectro de Energía o Potencia, “Power Spectral Density”, es una herramienta muy utilizada para determinar la distribución de energía de una señal aleatoria en función de la frecuencia. Suponga que la señal que se analizará,  $y(t, \zeta)$ , corresponde a un proceso estacionario<sup>8</sup> y ergódico<sup>9</sup>, cuya función de autocorrelación es, [14]:

$$R(\tau) = E\{y(t, \zeta)y(t + \tau, \zeta)\} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y_i(t)y_i(t + \tau)dt \quad (7)$$

donde:

$t$  = tiempo

$\zeta$  = amplitud de la señal

$y(\zeta, t+\tau)$  = Señal con desfase

$\tau$  = desfase de tiempo

Cuando el desfase ( $\tau$ ) es igual a 0, la expresión (7) se reduce al valor medio cuadrado que equivale a la varianza:

$$R(0) = \overline{x^2} = \sigma^2 \quad (8)$$

---

<sup>8</sup> Conjunto de señales cuyo promedio no difiere del promedio de cada muestra cuando se incrementan los tiempos ( $t_1$ ) y ( $t_1 + \tau$ ), [19].

<sup>9</sup> Promedios en el tiempo del conjunto es igual al promedio de cada muestra, [19].

Con la función de autocorrelación,  $R(\tau)$ , el Espectro de energía (PSD) se define como la transformada de Fourier de dicha función, [18]:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau. \quad (9)$$

Despejando  $R(\tau)$ , se tiene:

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega. \quad (10)$$

Cuando  $\tau = 0$ , e igualando (7) con (10), se obtiene:

$$S(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2\pi} \left| \int_{-T}^T y(t, \zeta_k) e^{-i\omega t} dt \right| \quad k = 0, \dots, N/2 \quad (11)$$

Esta expresión se la conoce como Espectro de Energía (PSD) y cubre el rango de frecuencia de  $(-\infty < \omega < \infty)$ . Como la señal es simétrica con respecto al origen, solamente se grafica el lado positivo, figura 18.

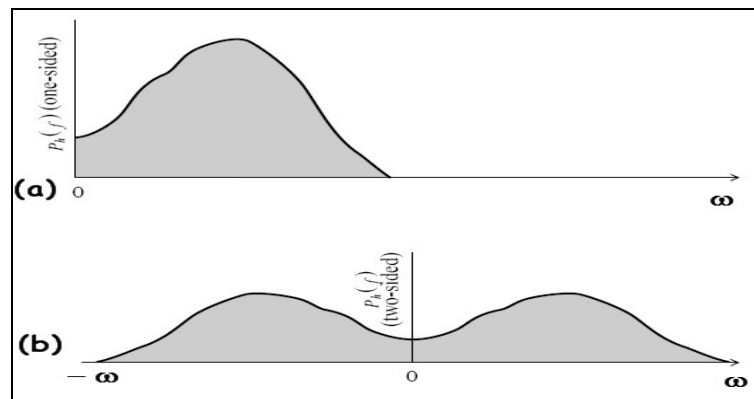


Figura 18.- Espectro de Energía de un solo lado, sumada el área del lado negativo, (a). Espectro original con ambos lados  $(-\omega, \omega)$ , [18].

Algunas de las propiedades del espectro  $S(\omega)$  de una función  $y(\zeta, t)$ , son:

- $S(\omega)$  es una función par y real, siempre y cuando  $R(\zeta)$  sea real y par.
- Las unidades en que se expresa son:  $\text{g}^2/\text{Hz}$ ,  $(\text{rad/s}^2)^2/\text{Hz}$ ,  $(\text{m/s}^2)^2/\text{s}^{-1}$
- El espectro es siempre positivo:  $S(\omega) \geq 0$
- La varianza de un proceso aleatorio puede calcularse a partir de su respectivo espectro:

$$\sigma^2 = (\text{RMS})^2 = R(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega \quad (12)$$

En el presente trabajo se realizó un algoritmo y su implementación en un programa llamado, “Signal Analyses”, en lenguaje Visual Fortran (Anexo 1), que utiliza las subrutinas “SPCTRM” y “FOUR1” que se encuentran en la referencia [14]. En la figura 19 se muestra los espectros de energía de las aceleraciones correspondientes a las señales de la figura 17.

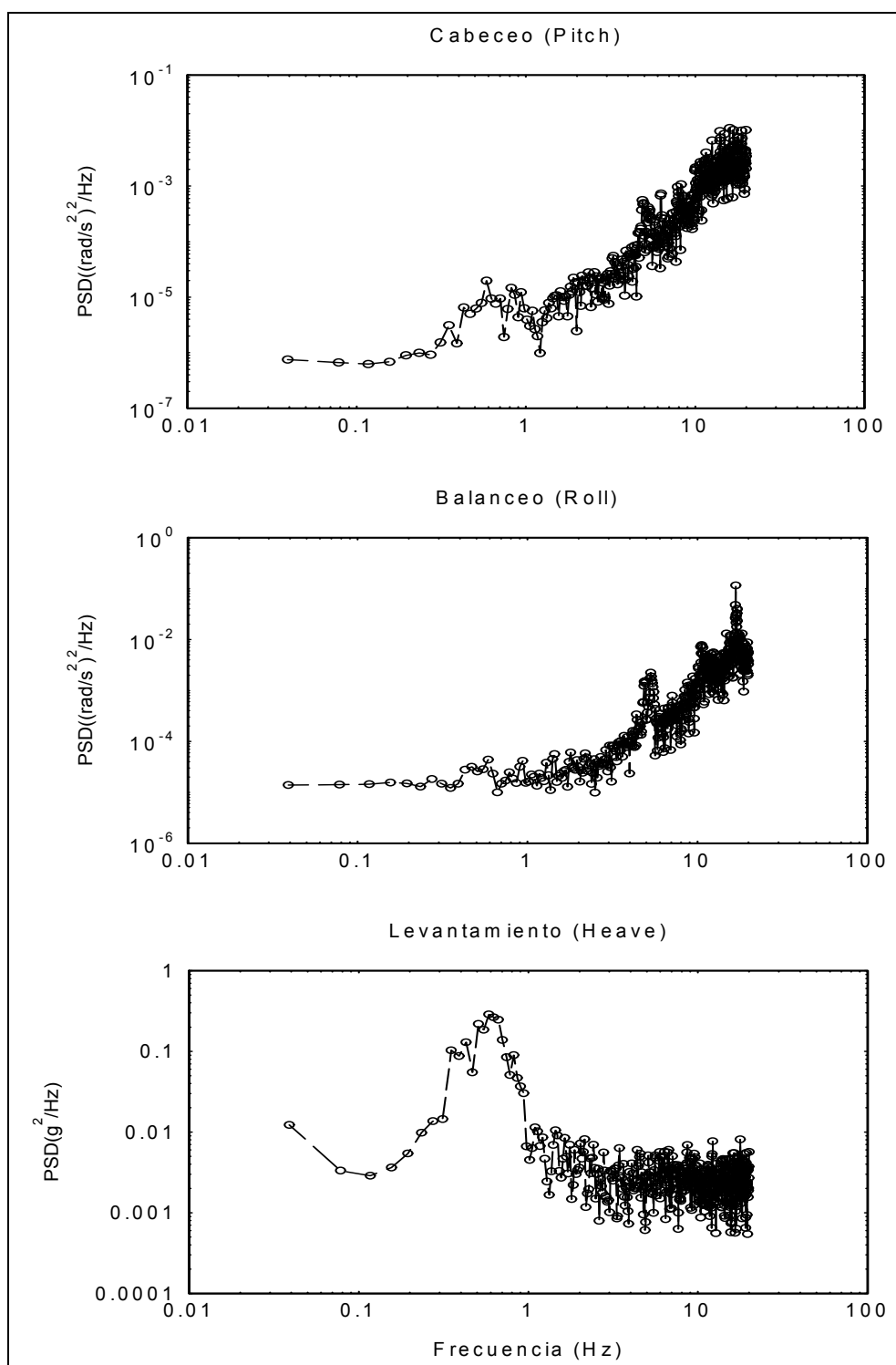


Figura 19.- Espectros de Energía de las Aceleraciones de la Corbeta en Condición de Máxima Carga, 25 de Junio del 2007.

## Espectro de Aceleración

El Espectro de Aceleración “Acceleration Spectral Density”, se describe como el área bajo la curva del Espectro de Energía (PSD) y define el valor promedio RMS de la aceleración de máxima energía de la respuesta. Análogamente la cantidad de energía total, E, de la respuesta, es igual a la siguiente fórmula:

$$\sigma^2 = E = \int_0^{\infty} \frac{g^2}{\omega} d\omega \Rightarrow \sigma' = \sqrt{E} = \text{RMS } g \quad (13)$$

Donde:

$\sigma^2$  = Varianza

E = Energía de la Respuesta

$\frac{g^2}{\omega}$  = Valor de la Ordenada del PSD,  $g^2/\text{Hz}$

La energía total es igual a la varianza ( $\sigma^2$ ), en magnitud, y la raíz cuadrada de la misma equivale al promedio de la aceleración en gravedades (RMS g), que numéricamente es igual a la desviación estándar del proceso aleatorio ( $\sigma$ ). Este valor corresponde al promedio

RMS  $g$  del ancho de banda<sup>10</sup> completo y es una constante. Para evaluar la aceleración en un intervalo de frecuencia ( $\Delta f$ ) específico, se debe descomponer el ancho de banda en múltiplos de octava y octavas parciales. La constante  $\alpha$  determina como el ancho de banda completo es dividido en octavas como se muestra en la tabla 20:

| INTERVALO DEL ANCHO DE BANDA | FACTOR                           |
|------------------------------|----------------------------------|
| 1 OCTAVA                     | $\alpha = 2$                     |
| 1/3 OCTAVA                   | $\alpha = \sqrt[3]{2} = 1.25992$ |
| 10 LOG                       | $\alpha = 10^{1/10} = 1.25895$   |

Tabla 20.- Factores de intervalo de frecuencia, [11].

La relación entre frecuencias sucesivas  $\omega_i$ , límite inferior y  $\omega_{i+1}$  límite superior es simple:

$$\omega_{i+1} = \alpha \omega_i \quad (14)$$

El  $\omega_i$  para este análisis es 0.05 Hz, límite inferior recomendado por el ITTC, [7]. La energía que se concentra en un octavo esta dado por:

$$E_1 = \int_{\omega_1}^{2\omega_1} \frac{g^2}{\omega} d\omega \quad (15)$$

<sup>10</sup> Intervalo de frecuencia que va desde 0 hasta la frecuencia de Nyquist, [14].

Si este se subdivide en 1/3 de la octava, se obtiene:

$$E_1 = \underbrace{\int_{\omega_1}^{1.26\omega_1} \frac{g^2}{\omega} \partial\omega}_{E_{1/3}} + \underbrace{\int_{1.26\omega_1}^{1.59\omega_1} \frac{g^2}{\omega} \partial\omega}_{E_{1/3}} + \underbrace{\int_{1.59\omega_1}^{2\omega_1} \frac{g^2}{\omega} \partial\omega}_{E_{1/3}} \quad (16)$$

Donde  $E_{1/3}$  representa la energía concentrada en el 1/3 de octava con los límites de frecuencia que se detallan en la tabla 20. El producto de esta integración se denomina espectro de densidad de aceleración “Acceleration Spectral Density”, se aplica en los análisis vibracionales que involucran la proficiencia del personal. Se recomienda emplear el 1/3 del octavo del ancho de banda debido a la relación con la respuesta fisiológica del cuerpo humano y además es una medida más precisa para determinar los niveles de aceleración, [11]. En las figuras 16 y 17 se muestra un ejemplo de estos Espectros.

## 2.4 Análisis Comparativo de la respuesta.-

De los seis movimientos del buque, el de mayor impacto sobre la proficiencia del personal, es el levantamiento o aceleración vertical ( $a_z$ ). A continuación se analizan los espectros de energía que corresponden a las dos condiciones de carga: máxima y media; a

continuación se muestra en la tabla 21, el resumen comparativo de las frecuencias del buque:

| Condición de Carga | Frecuencia natural, $\omega_0$ (Hz) | Frecuencia de encuentro, $\omega_e$ (Hz) | Frecuencia de respuesta, $\omega_r$ (Hz) |
|--------------------|-------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
| Máxima             | 0.216                               | 0.399                                    | 0.557                                    |
| Media              | 0.218                               | 0.567                                    | 0.442                                    |

Tabla 21.- Frecuencias Comparativas del comportamiento del buque.

Es evidente que la frecuencia natural ( $\omega_0$ ), en la condición de Máxima Carga es menor con respecto a la Carga Media, debido a las fuerzas inerciales del buque. Según la fórmula (3), el periodo de levantamiento es directamente proporcional al calado por lo que en esta condición, con un desplazamiento de 750 ton y calado de 2.75 m hace que el periodo del levantamiento sea mayor, es decir que el tiempo en recuperar su posición de equilibrio es mayor que aquel empleado, por el buque, en la Condición Media. Además cuando el desplazamiento del buque comienza a disminuir, la respuesta vertical se incrementa, y el buque se hace menos confortable. En el presente caso la diferencia en el desplazamiento entre las dos condiciones es pequeña, alrededor de las 30 toneladas por tal motivo las frecuencias naturales están muy

cercanas entre si. Como se muestra en las figuras 20 y 21, las frecuencias de encuentro ( $\omega_e$ ), en la primera condición en un Estado de Mar 4, y la frecuencia de máxima energía tiende a concentrarse en las bajas regiones, en este caso es 0.399 Hz a diferencia de la segunda condición que es igual a 0.567 Hz. Es notorio que conforme disminuye el Estado de Mar, la curva del espectro de ola tiende a desplazarse hacia la derecha, como el caso de Mar 3. Cabe mencionar que las velocidades se mantienen casi constantes, para ambos casos, 21 nudos (Avante 5). Pero el aspecto que impone la diferencia entre los dos espectros es el estado de mar. Las fuerzas de impacto de las olas sobre el casco hacen que este se acelere en las tres direcciones ortogonales con sus respectivas rotaciones. En la figura 20, el estado de mar 4 hace que la respuesta tenga una mayor amplitud con respecto al estado de Mar 3, como se muestra en la figura 21. Existe una pequeña diferencia en los límites inferiores de frecuencia entre los dos estados, debido a la pequeña diferencia entre las condiciones de carga al momento de las mediciones, como se mencionó anteriormente.

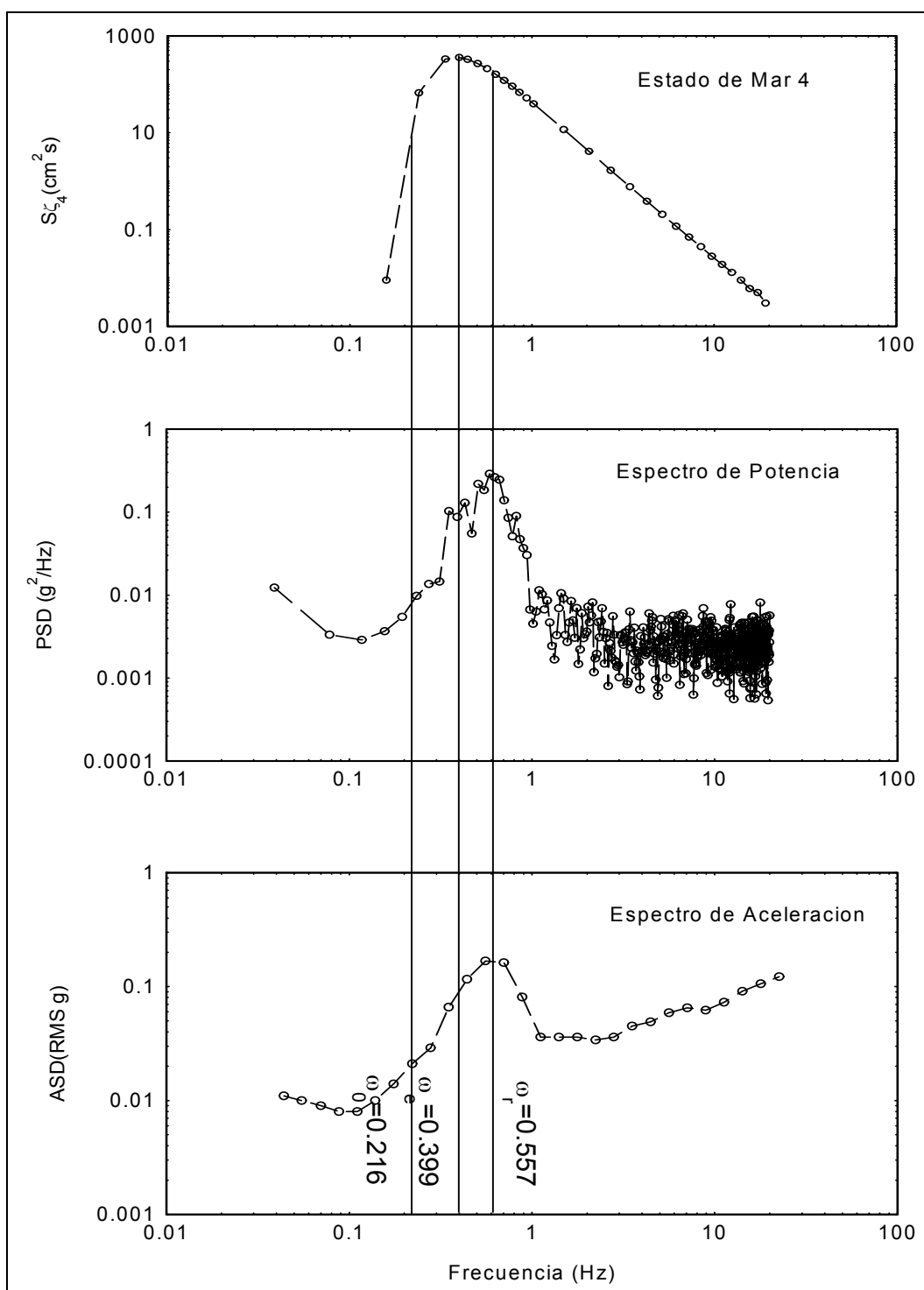


Figura 20.- Comparación gráfica de los Espectros de Energía, Aceleración y Olas del buque en condición de carga máxima, velocidad AV 5 con olas en proa, 27/06/07.

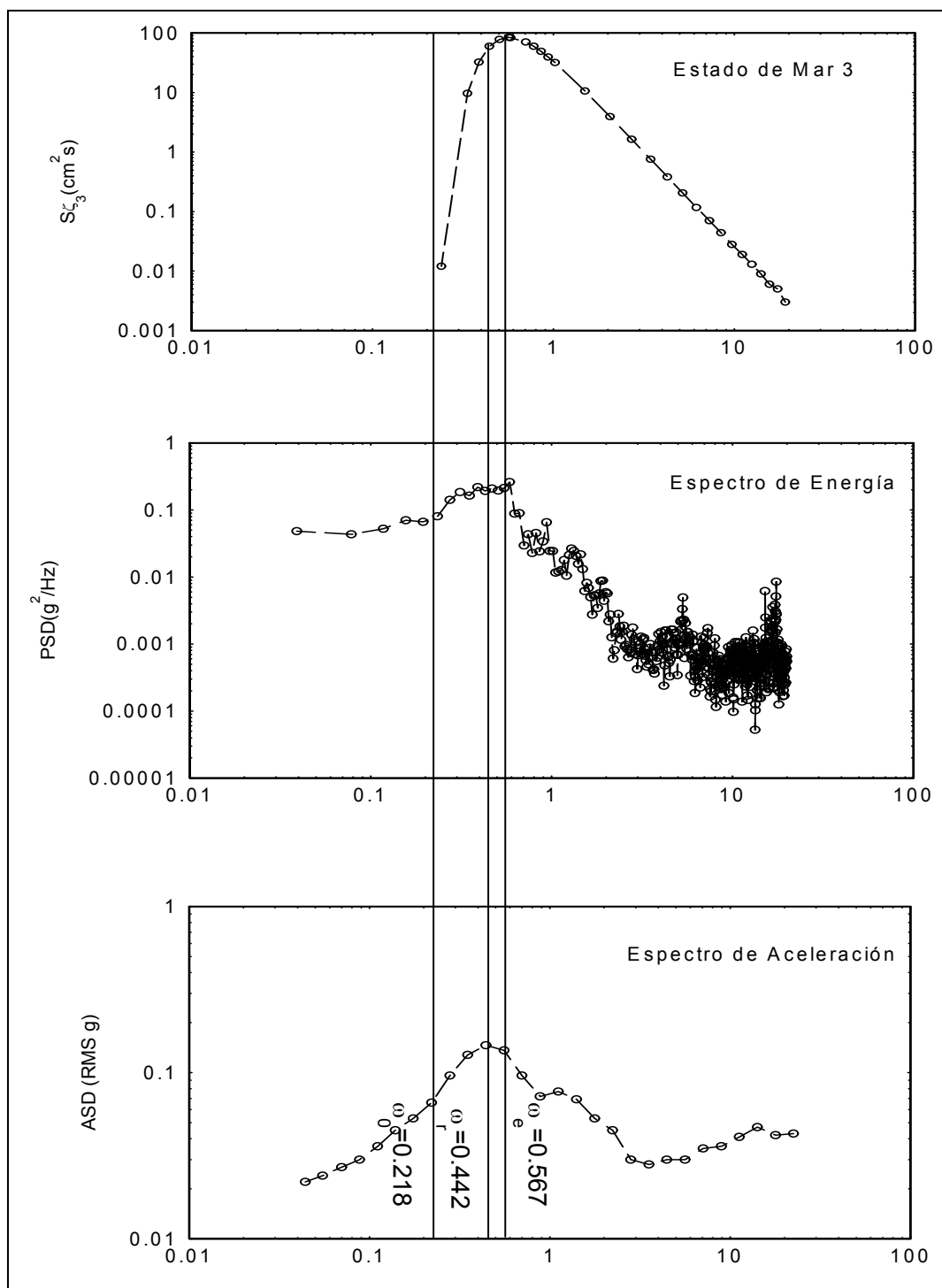


Figura 21.- Comparación gráfica de los Espectros de Energía, Aceleración y Olas del buque en condición de carga media, velocidad AV 5 con olas en proa, 29/06/07.

## CAPITULO 3

### 3. ANALISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS MOVIMIENTOS

#### 3.1 El mareo según la teoría del Conflicto Sensorial.-

El aspecto fisiológico, en la tripulación, es uno de los más importantes en el efecto del mareo. El mecanismo orgánico primario, responsable de la sensación de náuseas es el aparato vestibular o vestíbulo, localizado en el oído interno, cuya función primordial es la de detectar el movimiento del cuerpo y la cabeza, con respecto a la superficie de la tierra. La influencia que este órgano tiene en el mareo fue descubierto por Benson [15], en un estudio realizado con personas inmunes al mareo que padecían de ciertas enfermedades en el oído interno. El vestíbulo o sistema vestibular está ubicado en una pequeña cavidad en el interior de cada oído, y en su interior se encuentran los sensores receptores conocidos como: otolitos y canales semicirculares. La membrana otolítica se puede comparar con un sensor de aceleración lineal, que detecta los movimientos lineales como: horizontales y verticales. Está compuesto por el utrículo y sáculo, órganos cerosos, cuya densidad varía con el movimiento del cuerpo, produciendo una deflexión sobre los capilares microscópicos

llamados ciliares [5]. El cerebro recibe los impulsos eléctricos, producidos por los ciliares, de donde las señales son procesadas e interpretadas por el hombre como movimientos o cabeceos. Según la referencia [15], todas las especies, excepto las más primitivas, han desarrollado receptores capaces de detectar los movimientos lineales. Se cree que el principio básico de estos receptores es la de detectar el sentido y dirección de la gravedad, cuando se realiza un movimiento traslacional. Existen tres canales semicirculares dentro del oído y están ubicados en forma ortogonal. Su función es la de detectar las aceleraciones angulares en las tres direcciones: longitudinal, lateral y vertical muy parecida a la membrana otolítica. Estos movimientos circulares desplazan un fluido dentro de los canales, deflectando el órgano receptor transmitiendo un pulso eléctrico al cerebro. En las figuras 22 y 23 se muestran la orientación y la estructura del sistema vestibular.

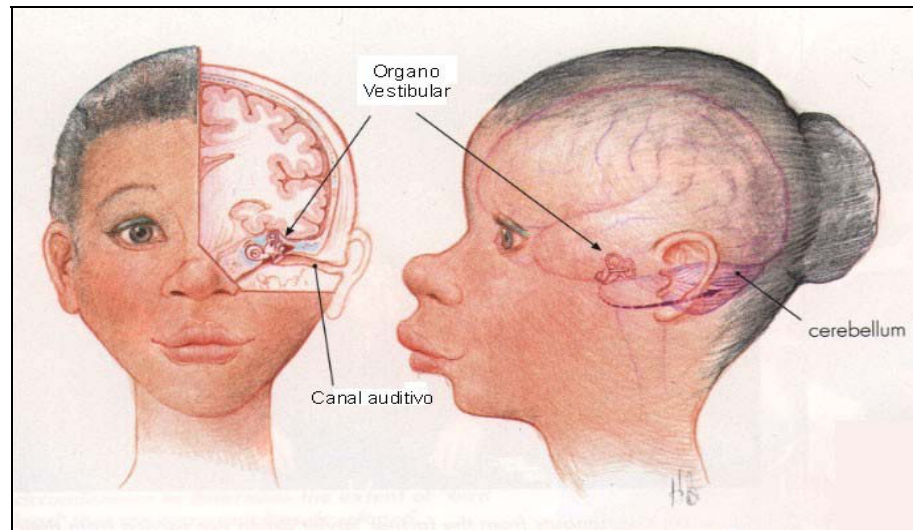


Figura 22.- Ubicación del Sistema Vestibular, [5].

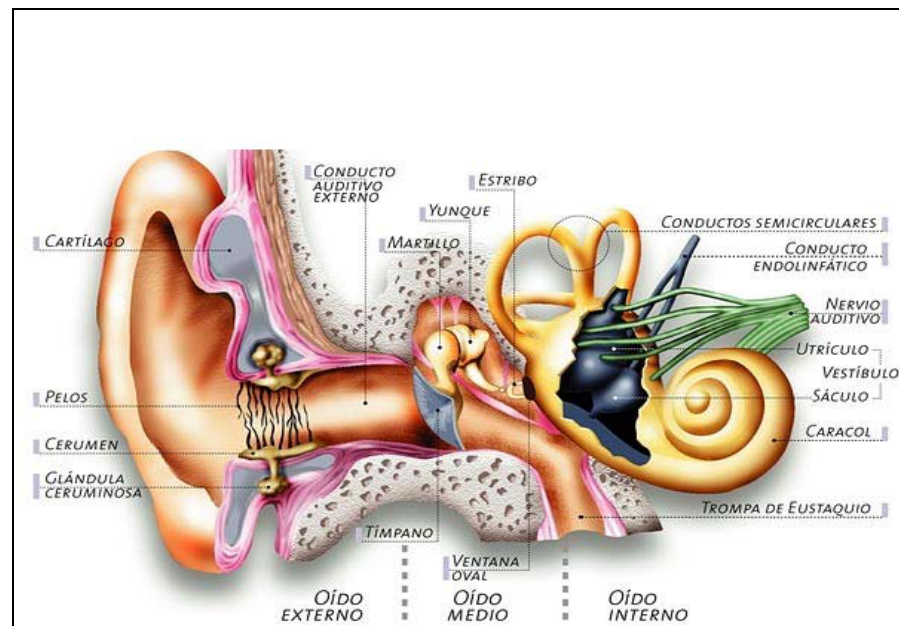


Figura 23.- Disposición del Aparato Auricular, [5].

Ciertos estudios realizados dentro de simuladores demostraron que los síntomas del mareo no dependen, necesariamente, del movimiento

sino de la incompatibilidad de la información enviada por los sentidos. Por ejemplo, la teoría del Conflicto Sensorial establece que el aparato vestibular, provee al cerebro de alguna información real del movimiento que en ese momento está experimentando el individuo, que no coincide con la información, que la vista entrega. Un caso típico de este fenómeno es aquel experimentado dentro cabinas o camarotes cerrados, sin accesos hacia cubierta o el exterior. El vestíbulo del individuo que está en el interior, registra las aceleraciones verticales y angulares, mientras que la vista no lo hace. En ese instante ocurre el conflicto sensorial. Una posible solución para este problema es el de proveer de una claraboya o visor dentro de la cabina, para que la información recibida por el cerebro sea coherente entre los sentidos.

La teoría del Conflicto Sensorial se divide en dos categorías: intersensorial e intrasensorial. El primero consiste en la discordancia en la información entre dos órganos sensoriales complementarios, por ejemplo: vista y vestíbulo. A su vez se divide en dos tipos:

- Tipo 1: Cuando existe incompatibilidad de información entre el sistema visual y vestibular con respecto al movimiento.
- Tipo 2: Cuando existe ausencia de información de cualquiera de los dos sistemas.

El conflicto intrasensorial consiste en la discrepancia de información que existe entre los órganos internos pertenecientes al sistema vestibular (canal semicircular u otolitos). Por ejemplo: Los sensores de aceleración lineal (Otolitos) registran movimientos diferentes que aquellos registrados por los de aceleración angular (canales semicirculares). Se dividen en dos tipos:

- Tipo 1: Cuando existe incompatibilidad de información entre los otolitos y canales semicirculares con respecto al movimiento.
- Tipo 2: Cuando existe ausencia de información de cualquiera de los dos órganos.

A continuación en la tabla 22, se ilustra un resumen de las diferentes clases y tipos de conflicto existentes:

| Tipo de Conflicto                                                            | Categoría de Movimientos                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                              | Intersensorial<br>(Visual [A]-Vestibular [B])                                                                                                                                                                                                                                     | Intrasensorial<br>(Canales semicirculares [A] – Otolitos [B])                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Tipo 1<br>A y B<br>simultáneamente<br>entregan<br>información<br>discordante | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Observando olas desde un buque.</li> <li>• Uso de binoculares sobre un vehiculo en movimiento.</li> <li>• Movimiento de cabeza con un dispositivo óptico que distorsiona la visión.</li> <li>• Estimulación “Seudo Coriolis”.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Movimiento de cabeza lineales acompañado de rotaciones (Coriolis o estimulación cruzada).</li> <li>• Movimiento de cabezas en un ambiente con aceleración anormal que puede ser constante (hiper o hipo gravedad) o variable (oscilación lineal).</li> <li>• Desordenes en el vestíbulo.</li> </ul> |

|                                                     |                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                          |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo 2a<br>Señales A en<br>ausencia de<br>señales B | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mareo de Cineramas.</li> <li>• Mareo de Simuladores.</li> </ul>                                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Efectos del alcohol.</li> <li>• Estimulación calórica de los canales semicirculares.</li> <li>• Desordenes en el vestíbulo.</li> </ul>                          |
| Tipo 2b<br>Señales B en<br>ausencia de<br>señales A | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Observando dentro de un vehículo sin referencias visuales externas (debajo de cubierta en un bote).</li> <li>• Lectura en un transporte en movimiento.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Oscilaciones traslacionales de baja frecuencia (<math>&lt;0.5</math> Hz).</li> <li>• Movimiento circular con aceleración angular (asadero barbecue).</li> </ul> |

Tabla 22.- Tipos de movimientos y conflictos sensoriales, [15].

### 3.2 Evaluación del estado de la tripulación durante la prueba.-

Durante la navegación en la que se registraron los movimientos del buque, se realizaron dos encuestas al personal embarcado, para determinar el grado de incidencia que el mareo tiene en el personal. Se escogieron en cada condición de carga la respuesta más severa. Estas pruebas se realizaron en las siguientes fechas:

| Fecha    | Dirección de la ola | Velocidad de avance (Kn) | Fuerza del Viento (Kn) | Estado de Mar |
|----------|---------------------|--------------------------|------------------------|---------------|
| 27/06/07 | Proa                | 21.2                     | 15                     | 4             |
| 29/06/07 | Proa                | 20.8                     | 8                      | 3             |

Tabla 23.- Condiciones climatológicas de las pruebas de mar.

El formato de la encuesta (Anexo 2), se divide en dos partes. El objetivo de ambas partes es la de establecer el estado anímico del personal sujeto al mareo antes y después las pruebas. La evaluación se la hizo en la peor condición, con ola en proa y con las condiciones detalladas en la tabla anterior.

El mareo se relaciona con los niveles de aceleración de la respuesta del buque para un estado de mar en particular. Para encontrar el grado de asociación entre el Mareo y el Estado de Mar, se utilizó el programa SPSS [3]. Como se vio en el primer capítulo, el mareo no depende solo del tiempo de embarque efectivo que tenga un tripulante en especial, sino de muchas causas y factores fisiológicos. De la encuesta, se extrajo la sección “Sujeto al mareo”, que tiene las siguientes opciones:

- Presenta algunos de los siguientes síntomas:

1. Perfectamente Normal.
2. Ligeramente Normal, no tiene síntomas.
3. Ligera Sensación de náuseas.
4. Intermitente Sensación de náuseas.
5. Definitiva Sensación de vómito.
6. Cerca del vómito
7. Vómito

En las tablas de contingencia (Anexo 3), se encuentran detallados dos categorías que son: Estados de Mar 3 y 4. Y a su vez estos se subdividen en dos eventos:

- Presenta algún síntoma antes de la prueba.
- Presenta algún síntoma después del primer intervalo de prueba.

Para cada Estado de Mar, los dos eventos contienen el número de tripulantes con sus síntomas respectivos, el programa SPSS los ordena y agrupa en forma descendente desde el “Sentirse Perfectamente Normal” hasta llegar al “Vómito”. Posteriormente hace la intersección entre estos subconjuntos y determina el porcentaje de las personas que reportaron un cambio en su estado de salud o

ánimo. En la primera prueba, realizada el 27 de junio del 2007, el buque se encontraba navegando con la proa hacia las olas, máxima velocidad de 21.5 nudos (AV5) y condición de máxima carga, 750 ton. La encuesta estaba dirigida para evaluar el estado del personal en los 5 primeros minutos y en términos generales, se pudo apreciar que el estado del personal era relativamente normal, salvo el caso del síntoma, “intermitente sensación de náuseas”, que representa un porcentaje bajo de 1.82% del total. Después del intervalo de prueba, aparecieron otros síntomas como: vómito y cerca del vómito. Lo curioso es que algunas personas que reportaron sentirse en perfectas condiciones y hasta ligeramente normal, de repente manifestaron experimentar vómito que corresponde al 7.28% del personal.

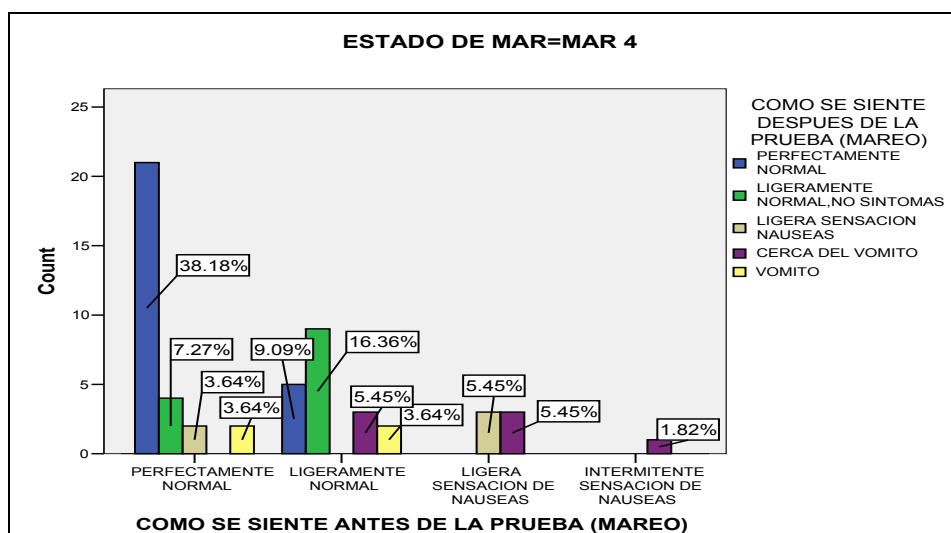


Figura 24.- Estado de Mareo del personal antes y después de la prueba. Estado de Mar 4.

Para la segunda prueba, que se la realizó en condiciones similares a la primera, salvo el menor desplazamiento (Carga Media) y tuvo lugar dos días después (29 de junio del 2007). El estado de mar presente fue 3 y la tripulación se encontraba navegando más de 3 días consecutivos. En la figura 25, se evidencia el nivel de adaptación que el personal alcanzó durante la navegación. La disminución significativa de los síntomas, comparados con la anterior encuesta, disminuyeron significativamente

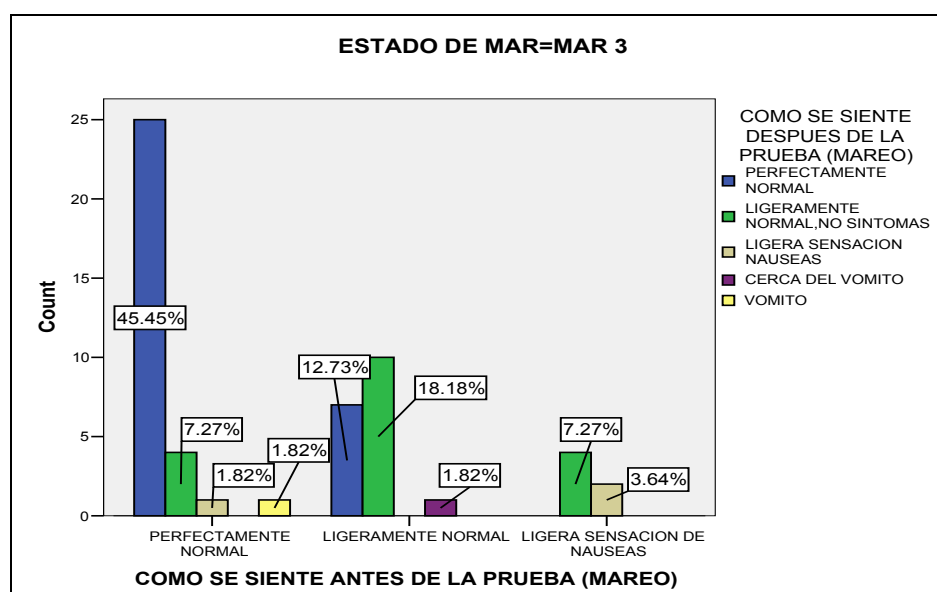


Figura 25.- Estado de Mareo del personal antes y después de la prueba. Estado de Mar 3.

Finalmente, la conclusión a que se llega es que los síntomas de mareo no tienen un orden de precedencia, es decir que no hay un síntoma previo al vómito. En las encuestas recopiladas es notorio que hay un

alto porcentaje de personas, que a pesar de tener bastante tiempo de embarque y sentirse bien antes de las pruebas, sienten los síntomas de mareo en forma aguda, llevándolos al vómito inminente.

En este trabajo, no se empleará mucha de la información recolectada debido a que el alcance está limitado a establecer el índice de mareo (MSI) que significa el porcentaje de personas que experimentan sensación de vómito durante los experimentos. A continuación se muestra la tabla resumen del porcentaje de personas que experimentaron el vómito:

| Fecha    | Condición | Tiempo de Exposición (min) | Estado de Mar | MSI (%) |
|----------|-----------|----------------------------|---------------|---------|
| 25/06/07 | Máxima    | 5                          | 4             | 7.28    |
| 27/06/07 | Media     | 5                          | 3             | 1.82    |

Tabla 24.- Resumen del Porcentaje de vómito colectivo, MSI.

### 3.3 Discusión sobre la incidencia del mareo.-

Las oscilaciones externas, provenientes de una fuente, que reciben las personas o el cuerpo humano pueden afectar subjetivamente el

confort, la proficiencia, o producir mareos. Existen muchos métodos para medir estos efectos fisiológicos y definir los límites de exposición a los que una persona puede someterse, muchos de los cuales no son aceptados universalmente. A pesar de esto, existen estudios recientes, [5] que sugieren ciertos rangos de frecuencia que deben ser evitados, desde 0.1 a 1 Hz por los efectos de malestar que producen en el cuerpo humano. En lo referente a la oscilación general del cuerpo, es conveniente clasificarla en movimientos de baja frecuencia, inducidos por las olas que afectan al buque en su conjunto y tienen una mayor influencia sobre el confort del personal. En cambio las vibraciones de alta frecuencia originadas de las máquinas, hélices, ejes y demás sistemas auxiliares tienden a producir ciertas incomodidades. Sin embargo, también existen movimientos de alta frecuencia que son inducidos por el movimiento del buque como la inmersión súbita de la proa en el agua “slamming”, en condiciones severas de mar, que tienen efectos directos sobre el confort. Es importante definir los rangos de frecuencia en los que el cuerpo humano y sus órganos se sienten afectados, [5]:

- 0.5 - 80 Hz tienen un efecto significativo en el cuerpo humano.
- Órganos o miembros individuales del cuerpo tienen su propia frecuencia natural y no vibran como masas independientes sino en

conjunto causando una amplificación o atenuación de la respuesta, en ciertas partes del cuerpo, cuando alcanzan niveles de resonancia.

- Las frecuencias, que alcanzan niveles de resonancia, más comunes en el cuerpo humano están en el rango de 4 - 8 Hz.
- Vibraciones entre 2.5 y 5 Hz genera una fuerte resonancia en la columna vertebral desde el cuello hasta la región lumbar con una amplificación sobre los 240%.
- Vibraciones entre 20 y 30 Hz producen una resonancia en el área de la cabeza y los hombros con amplificaciones superiores al 350%.

La Organización Internacional de Estandarización en el tratado ISO 2631, [9], establece los parámetros de confort, fatiga y límite de exposición a las que un ser humano puede soportar. Así como la ISO, la British Standard (BS) emplea las mismas curvas características, con ciertas variantes, que sirven para definir las regiones donde disminuye el confort o proficiencia en función del tiempo. Las líneas tienen forma de trapecios invertidos ("bucket shape") y están linealizadas a lo largo del eje cartesiano, relacionando aceleración versus frecuencia. La región delimitada por estas líneas se conoce como la región de mareo o fatiga.

## Región de Mareo

El criterio de mareo, de acuerdo a la parte 3 de dicho estándar, es la más comúnmente usada para evaluar el confort de los pasajeros, y en él se definen los límites o regiones en que una persona experimenta el vómito en base a las aceleraciones promedio (RMS) en función del 1/3 de Octava de frecuencia. El rango de mareo establecido por la norma es de 0.1 - 0.63 Hz.

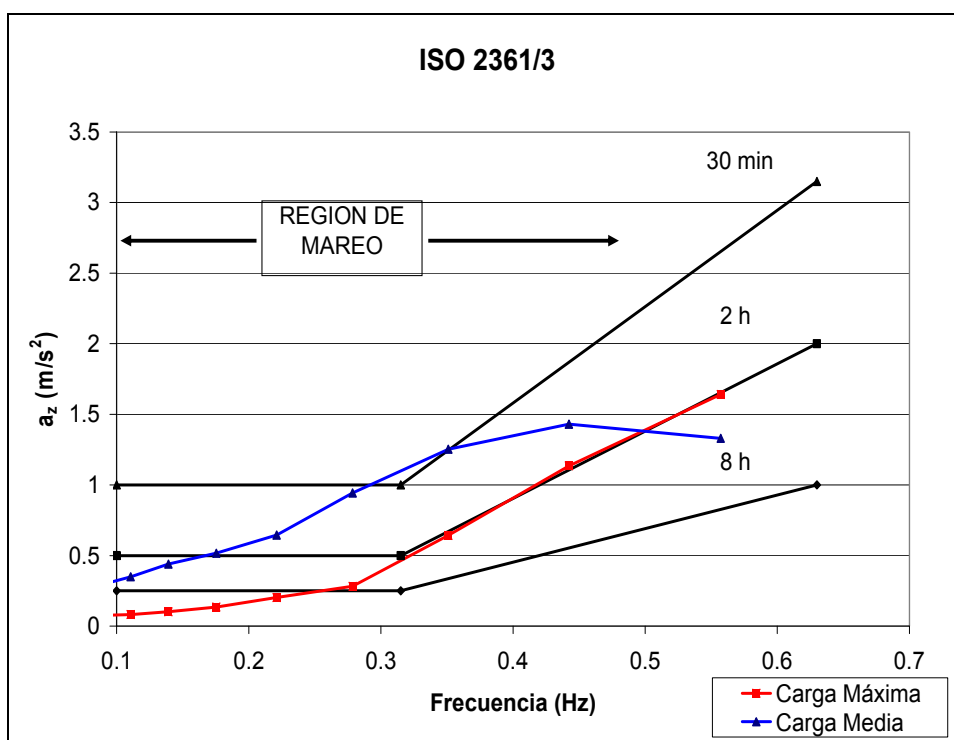


Figura 26.- Curvas de límites de la reducción del confort, ISO 2631/3, [9].

En la figura 26, preparada en base al estándar ISO 2631/3, [9], se muestra las curvas de las aceleraciones de las respuestas obtenidas en las pruebas de mar y corresponden a las condiciones en que se realizaron las encuestas. En la condición de Máxima Carga, el buque en bajas frecuencias ( $f < 0.3$  Hz) tiene un movimiento vertical casi imperceptible, ni siquiera ingresa a la región de las 8 horas. Para una frecuencia superior a los 0.3 Hz, el buque tiende acelerarse en forma gradual hasta quedar en límite de la región de las 2 horas, en este punto alcanza la máxima aceleración de  $1.642 \text{ m/s}^2$ . En la condición de Carga Media, se ve un aumento en la respuesta y alcanza incluso la región de mareo de los 30 minutos, esto ocurre cuando la frecuencia es menor a 0.35 Hz. Bajo estas circunstancias en particular se espera que el personal opere un periodo no mayor a 30 minutos, antes de sentir algún síntoma de mareo.

#### Región de Reducción de Proficiencia-Fatiga

En la primera parte de la norma, se encuentran las curvas límites de la fatiga y reducción de la proficiencia, con un rango de análisis de 1 hasta 80 Hz. Normalmente el ser humano tolera rangos mayores de frecuencia, provenientes de fuentes vibratorias de tipo continuo, en periodos de tiempo más largos. Sin embargo, el estar expuesto por

periodos largos a un movimiento oscilatorio, produce un efecto directo en la proficiencia del personal, aumenta la fatiga y disminuye la eficiencia en las tareas que realiza la tripulación.

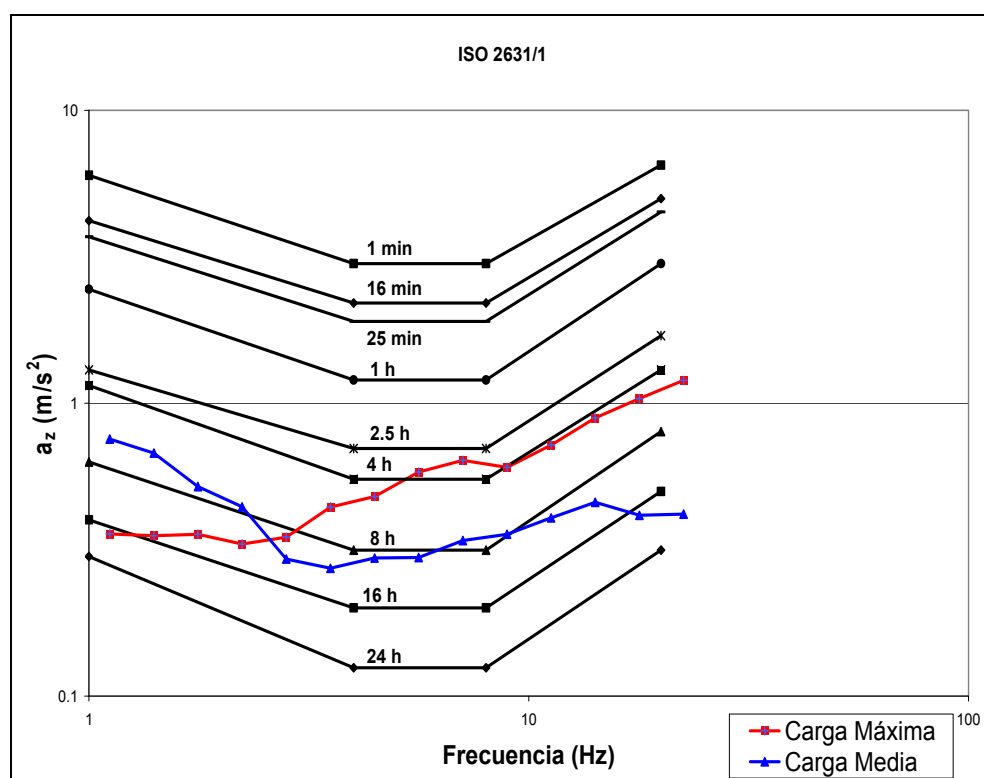


Figura 27.- Curvas de límites de Reducción de Proficiencia-Fatiga, ISO 2631/1, [9].

Como se ve en la figura 27, la curva de máxima carga tiene una pendiente positiva y va incrementándose en forma proporcional a la frecuencia; sin embargo su crecimiento no llega a rebasar el límite de

las 4 horas. En cambio en la condición de Carga Media, el comportamiento se ajusta más a lo que prevé la norma, observándose que la mayor aceleración se aparece cuando la frecuencia es igual a 1.115 Hz e indica que el tiempo de exposición en esta condición es de 8 horas.

Las normas ISO 2631, permiten evaluar la reducción de la proficiencia, en base al tiempo de exposición a una vibración oscilatoria específica pero no la cantidad de personas que sufren estos efectos. Para ello existen las normas BS 6841, que utilizan modelos matemáticos que permiten predecir, con cierto grado de exactitud, la cantidad de personas que llegan a vomitar. Esta norma centra sus estimaciones en el movimiento oscilatorio vertical, conocido como levantamiento, con un rango de aplicación de 0.4 -0.5 Hz, conocido como el valor de dosis de mareo ("Motion Sickness Dose Value, MSDV"). El MSDV expresa el porcentaje de personas que vomitaran cuando estén sujetos a un movimiento en particular.

El valor de dosis de mareo (MSDV) está dado por, [15]:

$$\text{MSDV}_Z = \left( \int_0^T a_z^2(t) dt \right)^{1/2} \quad (17)$$

Donde  $a_z$  es la aceleración ponderada vertical (z) en  $\text{m/s}^2$  y  $T$  es el periodo de exposición en segundos. Utilizando la ecuación (17), con una aceleración vertical en particular en un lapso de 2 horas se obtienen las siguientes curvas:

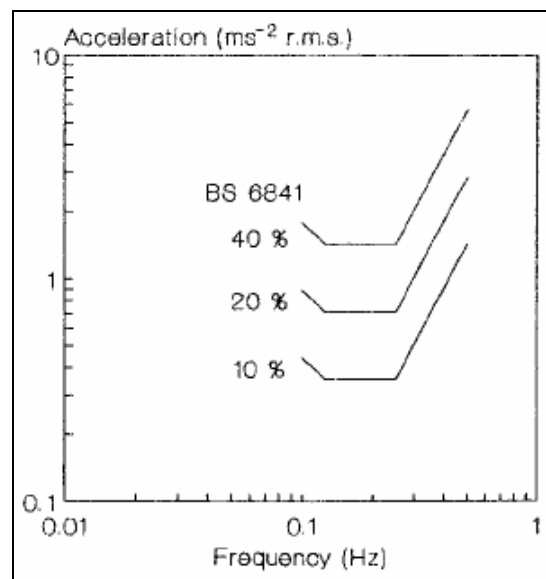


Figura 28.- Curvas de aceleraciones verticales que predicen 10%, 20% y 40% de incidencia de vomito durante 2 horas de exposición, British Standard 6841, ISO 2631, [15].

Traslapando estas curvas sobre las obtenidas en las pruebas, se tiene:

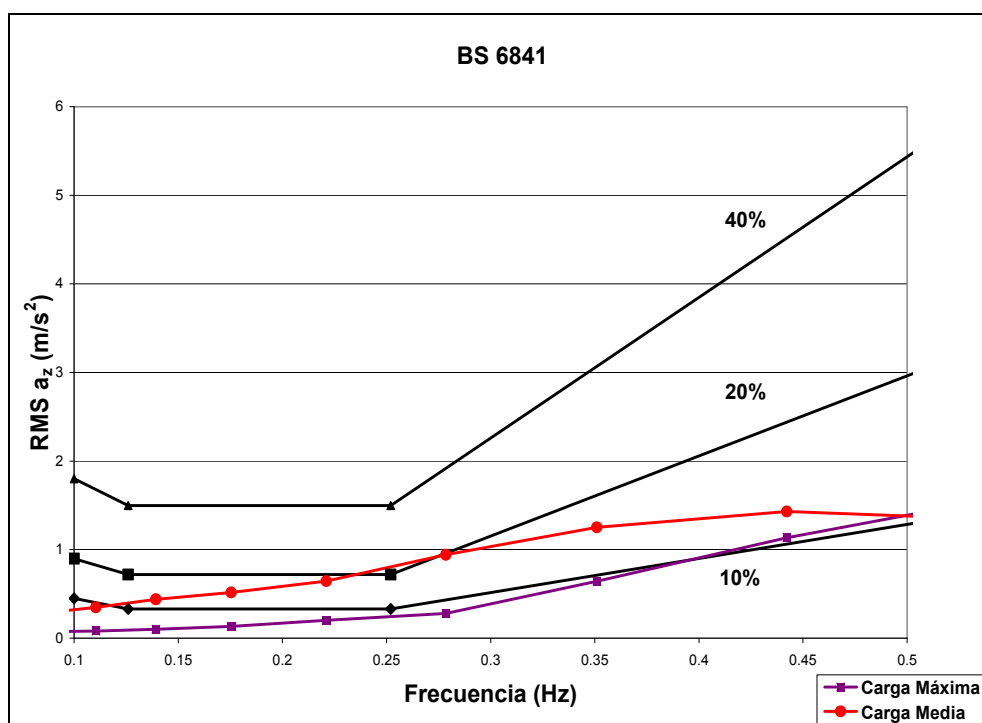


Figura 29.- Curvas de Incidencia de vomito, BS 6841, [15].

Como ya se dijo, estas curvas representan el porcentaje de individuos que vomitan en un periodo de 2 horas; si el tiempo de exposición aumentara en cuatro veces, la magnitud y el porcentaje de incidencia sería el doble, [15]. Para evaluar el comportamiento del personal de la corbeta, hay que enfatizar que el periodo de exposición, al momento de la encuesta, fue de 5 minutos y el tiempo total de estas, en diferentes direcciones fue de 1 hora 45 minutos. En las que el personal estuvo expuesto a las diferentes respuestas y por ende algunos de ellos ya presentaban ciertos síntomas antes de las encuestas, como se mencionó en el subcapítulo anterior. De la figura 29, la condición de

carga que presenta un menor porcentaje colectivo de vómito, de 10%, es el de máximo desplazamiento. Esto se debe a las fuerzas inerciales que el embate de las olas debe vencer son mayores, produciendo menor aceleración. En cambio el porcentaje aumenta hasta un 20% cuando el desplazamiento disminuye debido al consumo de las cargas líquidas y pertrechos, lo que lleva a una mayor respuesta de la embarcación a las olas.

Finalmente la comparación es importante para emitir un juicio de valor entre las estimaciones o métodos predictivos aquí presentados con las encuestas realizadas en las pruebas. A continuación se presenta el resumen de los resultados:

| Condición de Carga | Reducción del Confort ISO 2631/3 | Reducción de la Proficiencia-Fatiga ISO 2631/1 | Vomito MSI BR 6841 | Encuesta MSI | Diferencia Porcentual |
|--------------------|----------------------------------|------------------------------------------------|--------------------|--------------|-----------------------|
| Máxima             | 8 h                              | 8 h                                            | 10%                | 7.28%        | 2.72%                 |
| Media              | 2 h                              | 4 h                                            | 10%                | 1.82%        | 8.18%                 |

Tabla 25.- Resultados obtenidos de las relaciones empíricas y experimentales.

En la tabla 25, es notoria la diferencia porcentual que existe entre ambas condiciones de carga. Según las normas, el buque a plena

carga experimental, teóricamente, aceleraciones moderadas que permiten exposiciones al personal de periodos mayores con respecto a la segunda condición de carga. De alguna manera le permite al planificador estimar el tiempo óptimo de trabajo, en que la tripulación pueda ejecutar tareas sin que esto afecte a su eficiencia laboral.

El porcentaje de las personas que experimentaron el vómito, durante la primera navegación, comparado con el valor que establece la norma BS 6841 es ligeramente menor, con una diferencia porcentual del 2.72%. Caso contrario sucedió en la segunda navegación, en teoría, el porcentaje de incidencia de mareo tuvo que ser del 10% pero el reportado fue del 1.82% dando una diferencia porcentual del 8.18%. Pudiendo ser una causa de esta disminución, la adaptabilidad que experimentó la tripulación durante los días de navegación. Los modelos matemáticos parten de datos ya conocidos y probados, pero quedan algunos factores de la naturaleza que no se pueden considerar debido a la complejidad de sus características que hacen imposible medirlos. Los modelos expuestos anteriormente no consideran los siguientes factores:

- Se basan en datos experimentales con fuentes vibratorias de una sola frecuencia.

- Los efectos del mejoramiento en los individuos por habituación o adaptación debido a largos periodos de exposición no son considerados.
- La predicción del índice de vómito (MSI) no es necesariamente la mejor medida para evaluar la eficiencia del personal.

La adaptación de que ocurre durante el tiempo de exposición y esto hace que el confort mejore y los síntomas de mareo desaparezcan en algunos casos, como se ve en la figura 26 tomado de la referencia [15]. La capacidad de adaptación es propia de cada persona y depende mucho de la susceptibilidad, problemas fisiológicos y psicológicos, [5]. Por tal razón la primera encuesta se la realizó en los primeros días de la navegación, cuando las condiciones de mar eran buenas y el personal en su mayoría no presentaba ningún síntoma. Durante la navegación las condiciones de mar fueron severas, Mar 4, y el buque tuvo respuestas muy pronunciadas en algunas direcciones con respecto a la ola. Era lógico que el personal se sintiera mal e incómodo hasta el punto de alcanzar el vómito; situación contraria ocurrió en la segunda prueba realizada 2 días después. A pesar de que la respuesta registrada era mayor, el porcentaje de vómito disminuyó en forma significativa debido a la adaptación que ellos manifestaron sentir. A continuación se muestra la curva de adaptación

que se usa como referencia para analizar el confort, que indica el índice de incidencia del mareo (MSI) luego de 3 días de exposición.

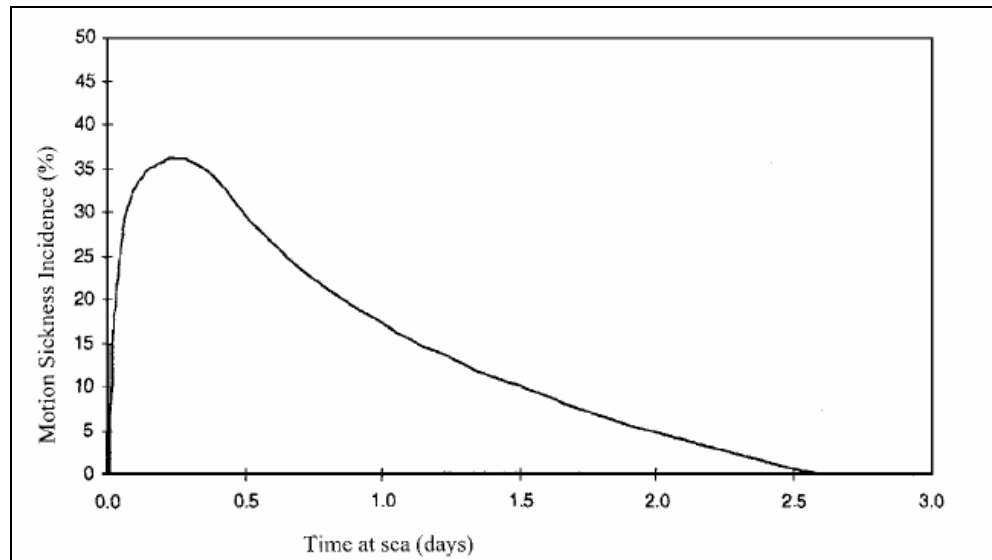


Figura 30.- Índice de vomito (MSI) en función del tiempo de exposición al movimiento del buque de una tripulación (Crossland 1998), [15].

## CAPITULO 4

### 4. COMPARACION DE LOS VALORES DE ACELERACION MEDIDOS CON FORMULACIONES EXISTENTES

#### 4.1 Descripción de la formulación de Savitsky.-

Las fórmulas que presenta la referencia [9] sobre las aceleraciones promedio en dirección vertical, del centro de gravedad y de la proa, son aplicables a embarcaciones planeadoras en diferentes Estados de Mar. Estas formulaciones son producto de los promedios de varias mediciones hechas en cascos de prueba, tomando los valores máximos positivos de las aceleraciones, para así determinar la fórmula de aceleración promedio ( $\bar{n}$ ), como se muestra a continuación:

Aceleración Vertical Promedio del C.G. en porcentajes de g:

$$\bar{n}_{CG} = 0.0104 \left( \frac{H_{1/3}}{b} + 0.084 \right) \frac{\tau}{4} \left( \frac{5}{3} - \frac{\beta}{30} \right) \left( V_K / \sqrt{L} \right)^2 \frac{L/b}{C_{\Delta}} \quad (18)$$

Aceleración Vertical Promedio en la Proa, en porcentajes de g:

$$\bar{n}_{proa} = \bar{n}_{CG} \left[ 1 + \frac{3.8(L/b - 2.25)}{V_K / \sqrt{L}} \right] \quad (19)$$

donde:

$H_{1/3}$  = Altura Significativa de la Ola, pies.

$b$  = Manga, pies.

$\tau$  = Asiento dinámico, grados.

$\beta$  = Ángulo de Astilla Muerta, grados.

$V_K/\sqrt{L}$  = Relación Velocidad-Eslora, Nudos/pie<sup>1/2</sup>

$L/b$  = Relación Eslora-Manga

$C_\Delta$  = Coeficiente estático Carga-Manga =  $\nabla/B_{PX}^3$

$B_{PX}$  = Manga Máxima en China, pie

$i_e$  = Semi ángulo de entrada del plano de flotación, grados

Las ecuaciones (18) y (19) son semi empíricas, válidas en un rango de las variables involucradas. A continuación se va a determinar el grado de aplicabilidad de las relaciones mencionadas, de acuerdo a las características de la embarcación analizada.

| PARAMETRO                                 | RANGO DE APLICABILIDAD | CORBETA | CUMPLE |
|-------------------------------------------|------------------------|---------|--------|
| $\Delta_{LT}/(0.01L)^3$                   | 100 - 250              | 113     | SI     |
| L/b                                       | 3 - 5                  | 6       | NO     |
| Asiento ( $\tau$ ), grados                | 3 - 7                  | 2.1     | NO     |
| Angulo astilla muerta ( $\beta$ ), grados | 10 - 30                | 9       | NO     |
| $H_{1/3}/b$<br>Estado Mar 4               | 0.2 - 0.7              | 0.3     | SI     |
| $V_K/\sqrt{L}$<br>$V_K = 21$ nudos        | 2 - 6                  | 1.5     | NO     |

Tabla 26.- Cuadro Comparativo de Parámetros de Aplicabilidad de buques planeadores, [16].

De la tabla anterior se deduce que, el buque de prueba solamente cumple con uno de los requisitos de aplicabilidad de las fórmulas. Sin embargo dada la limitación en el medio de otras formulaciones, se las va aplicar, para establecer ciertas referencias. El sistema de unidades que emplea la referencia original es el inglés, por tal razón los cálculos se desarrollan en este ámbito y para no causar conflictos en el entendimiento de este trabajo, las respuestas serán convertidas al Sistema Internacional. El análisis se lo realizará en las dos condiciones de carga: Máxima (750 ton) y Media (725 ton), para la navegación comprendida entre el 25 al 30 de junio del 2007.

| Parámetro | Máxima Carga |                   | Media Carga |                   |
|-----------|--------------|-------------------|-------------|-------------------|
| $\Delta$  | 750          | Ton               | 725         | Ton               |
| $L_{wl}$  | 189.58       | pies              | 189.58      | pies              |
| $B_x$     | 30.5         | pies              | 30.5        | pies              |
| $B_{PX}$  | 29.2         | pies              | 29.2        | pies              |
| $\beta$   | 9            | grados            | 9           | grados            |
| $i_e$     | 35           | grados            | 35          | grados            |
| $T$       | 9.05         | pies              | 8.86        | pies              |
| $C\Delta$ | 1.06         |                   | 1.02        |                   |
| $\nabla$  | 26250        | pies <sup>3</sup> | 25375       | pies <sup>3</sup> |

Tabla 27.- Características geométricas y carga de la Corbeta para el periodo de prueba del 25 al 30 de junio del 2007.

Una vez implementada, en una hoja de cálculo EXCEL, las fórmulas de las aceleraciones y características del buque ya mencionadas, con las condiciones de mar en las que se realizaron las encuestas, se obtuvieron los siguientes resultados:

| ESTADO DE MAR 4/CARGA MAXIMA |                           |       |       |       |
|------------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|
| $H_{1/3}$                    | pies                      | 4.1   | 4.1   | 4.1   |
| $V$                          | pies/s                    | 20.27 | 27.02 | 35.47 |
| $F_n \nabla$                 |                           | 0.66  | 0.87  | 1.15  |
| $V_k$                        | nudos                     | 12    | 16    | 21    |
| $\tau$                       | grados                    | 0.28  | 0.44  | 0.77  |
| $V_k/L^{1/2}$                | nudos/pies <sup>0.5</sup> | 0.87  | 1.16  | 1.53  |
| $\eta_{cg}$                  | gravedades                | 0.001 | 0.003 | 0.011 |
| $\eta_{proa}$                | gravedades                | 0.02  | 0.05  | 0.11  |
| ESTADO DE MAR 3/CARGA MEDIA  |                           |       |       |       |
| $H_{1/3}$                    | pies                      | 2.46  | 2.46  | 2.46  |
| $V$                          | pies/s                    | 20.27 | 27.02 | 35.47 |
| $F_n \nabla$                 |                           | 0.66  | 0.88  | 1.15  |
| $V_k$                        | nudos                     | 12    | 16    | 21    |
| $\tau$                       | grados                    | 0.28  | 0.44  | 0.77  |
| $V_k/L^{1/2}$                | nudos/pies <sup>0.5</sup> | 0.87  | 1.16  | 1.53  |
| $\eta_{cg}$                  | gravedades                | 0.001 | 0.003 | 0.008 |
| $\eta_{proa}$                | gravedades                | 0.02  | 0.04  | 0.09  |

Tabla 28.- Resultados de las aceleraciones promedio en el C.G. y proa obtenidas empíricamente por las formulaciones de Savitsky, [16].

Los ángulos de asiento dinámicos,  $\tau$  se tomaron de las pruebas de entrega/recepción originales de la embarcación.

#### **4.2 Resumen de valores registrados.-**

Los valores registrados y almacenados en el computador corresponden a las aceleraciones de los movimientos de Levantamiento, Balance y Cabeceo, de los cuales solo se analizarán las mediciones de levantamiento obtenidos durante la segunda navegación comprendida en el periodo del 25 al 30 de junio del 2007.

Las formulaciones de Savitsky, [16], sirven para aproximar las aceleraciones promedio en el Centro de Gravedad y en Proa de una embarcación planeadora. De las tablas 10 a la 15 se extraen los valores promedios de las aceleraciones correspondientes al movimiento vertical del buque, cuando este encuentra las olas por la proa en las siguientes velocidades: Avante 1 (12 nudos), Avante 3 (18 nudos) y Avante 5 (21 nudos), para ambas Condiciones de Carga. Los promedios de los valores registrados equivalen a la media aritmética de los 6000 puntos o aceleraciones en valor absoluto, de tal manera que evalúa las magnitudes en toda su amplitud. Recuerde que el signo negativo indica cambio de sentido de la aceleración más no de la magnitud.

En la tabla 29 se muestran las aceleraciones registradas y las calculadas con el método de Savitsky para el periodo de navegación antes mencionado, con los Estados de Mar 4 y 3 que corresponden a las condiciones de Carga Máxima y Media respectivamente. Estas mediciones se las efectuaron en la Sala del Sonar, ubicado en sección Proa, cubierta 300, figura (5), con el buque encontrando las olas por la Proa.

| Estado de Mar |              | Condición de Carga  | AV1<br>(12 nudos) | AV3<br>(18 nudos) | AV5<br>(21 nudos) |
|---------------|--------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 4             | Experimental | Máxima<br>(750 ton) | 0.08              | 0.12              | 0.29              |
|               | Teórico      |                     | 0.02              | 0.05              | 0.11              |
| 3             | Experimental | Media<br>(725 ton)  | 0.12              | 0.11              | 0.13              |
|               | Teórico      |                     | 0.02              | 0.04              | 0.09              |

Tabla 29.- Comparación de las aceleraciones teórica y experimental de las respuesta del buque, tomadas en sección Proa.

Como es evidente, las aceleraciones teóricas son mucho más bajas que las registradas durante las navegaciones. Estas diferencias se piensa que son el resultado de que la corbeta no está dentro del rango de aplicabilidad por lo que existe un bajo grado de asociación entre ellas. El uso de estas formulaciones, para este caso no está completamente justificado. En la figura 31 se puede apreciar

visualmente, la diferencia que existe entre los valores calculados y registrados, principalmente la curva de aceleración del buque en Estado de Mar 3, cuya pendiente cambia de signo cuando la velocidad es igual a 16 nudos. Sin embargo también es evidente correlación en pendiente que existe entre las aceleraciones calculadas y medidas para el estado de Mar 4, en condición de Carga máxima.

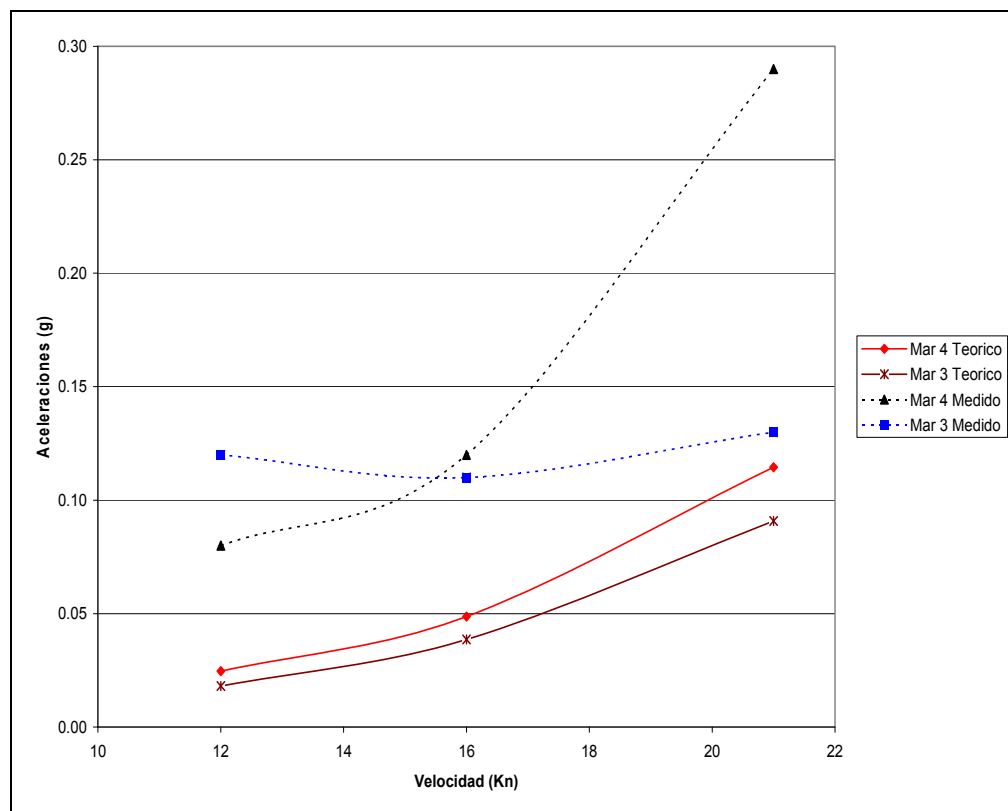


Figura 31.- Comparación gráfica de los valores de aceleración Teórico vs. Experimental.

### 4.3 Discusión.-

Un aspecto que cabe mencionar en la comparación de las aceleraciones obtenidas durante las pruebas con las obtenidas utilizando las formulaciones de Savitsky, es que la embarcación analizada está fuera del rango de aplicabilidad de las fórmulas. Salvo por dos parámetros de los seis que definen el rango de aplicabilidad, la formulación no se ajusta a los valores de la corbeta analizada. Sin embargo, dada la falta de otro método, fue necesario aplicarlo.

Como resultado del hecho resaltado en el párrafo anterior, la formulación semiempírica de Savitsky, produce resultados muy diferentes de los obtenidos experimentalmente. Nótese en la tabla 29, las grandes diferencias entre valores registrados y calculados aplicando la formulación ya mencionada.

A pesar de que los valores absolutos son muy diferentes como se observa en la figura 31, debe rescatarse el paralelismo en ciertas condiciones. Por ejemplo en la respuesta al estado de Mar 4, en condición de carga Máxima, las curvas de aceleración calculada y medida, son bastante paralelas entre sí. En cambio en el caso de la respuesta en estado de Mar 3, los valores registrados a bordo lucen inconsistentes, porque es de

esperarse que conforme se incrementa la velocidad del buque, se incremente la aceleración vertical, relación que no se observa en la curva mencionada.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló una metodología para realizar mediciones a bordo de una Corbeta Misilera, empleando dispositivos de medición propios del buque y proporcionados por la Facultad de Marítima. Luego se los procesó y se aplicó formulaciones para determinar la influencia en la proficiencia del personal. También se compararon los resultados de las mediciones con estimaciones dadas por una de las referencias revisadas. De la experiencia acumulada se concluyó lo siguiente:

Durante el proceso de medición se registraron las aceleraciones y ángulos de inclinación con una razón de muestreo ("scan rate") de 20 puntos por segundo en un intervalo de tiempo de 5 minutos, para cada ángulo de incidencia de la ola con respecto a la proa del buque. Debido a las limitaciones de almacenamiento y procesamiento que tiene una hoja de cálculo EXCEL, se redujo el número de datos y razón de escaneo a 6000 puntos y 20 puntos por segundo respectivamente. Esto además de ahorrar espacio en la memoria permite un fácil manejo de la información, para calcular los parámetros estadísticos ya antes mencionados. Se cree que estas razones de medición fueron razonables, si se considera que con 10 puntos, se podría describir adecuadamente frecuencias de hasta 2

ciclos/segundo, esto es, períodos de 0.5 segundos. Este período es bastante menor que los típicos de oscilación de buques de este tamaño.

La selección de una baja razón de escaneo y cortos periodos de medición tiene un costo en la baja discriminación de la información registrada. Por ejemplo la señal que es grabada con una razón de escaneo de 410 puntos por segundo, muestra una presentación más amplia y completa que la utilizada en este trabajo. Sin embargo, manejar esta cantidad de datos requiere de procesadores y programas computacionales más eficientes que reduzcan el tiempo y costo en el procesamiento de las señales. Además es importante implementar un algoritmo de filtraje, para que elimine ruidos o señales espurias que son propios de la naturaleza de los dispositivos electrónicos, de tal manera de obtener datos depurados que reflejen la real respuesta del buque. Por ejemplo en las figuras 20 y 21 en las curvas que pertenecen al Espectro de Energía (PSD), se observa que a partir de 1 Hz en adelante, los puntos convergen entre si formando una interferencia, y no se puede discriminar la información en estos rangos.

El cálculo de los Espectros de Energía y aceleración de la respuesta mediante el uso de programas computacionales simplifica considerablemente el tiempo de trabajo facilitando el análisis permitiendo

establecer los rangos de frecuencia donde se concentra la máxima energía de la respuesta. En las figuras 20 y 21 se observa que la frecuencia de máxima energía de ambas respuestas está próxima a las frecuencias de encuentro de los espectros de ola respectivos. Esto es lógico debido a que normalmente el cuerpo que es acelerado por una fuente oscilatoria como es el mar, tiende a oscilar a una frecuencia parecida a la frecuencia de excitación. En ninguna de las dos condiciones de carga se presenta zonas de resonancia, a pesar que las frecuencias naturales del Levantamiento están próximas al de las respuestas. Si cualquiera de las condiciones aumentase como velocidad de avance o estado de mar es muy posible que el buque entre en una situación resonante, aumentando la respuesta a niveles elevados produciendo una degradación en el estado del personal. Sería adecuado en el futuro comprobar las formulaciones simplificadas utilizadas en este trabajo para estimar las frecuencias naturales de oscilación del buque en analizado.

Las encuestas hechas al personal de tripulación durante las pruebas efectuadas en el periodo de navegación comprendido desde el 25 al 30 de junio del 2007, han permitido establecer el porcentaje de incidencia al mareo (MSI), en función a cada condición de carga y estado de mar, cuyos resultados no sobrepasan el 10% de las personas que experimentan el vómito. Esta observación es para el rango de frecuencia

de 0.1 a 1Hz, como se muestra en la tabla 25. Durante la primera prueba realizada el 27 de junio, el buque tenía un desplazamiento de 750 toneladas, Máxima Carga, y con un Estado de Mar 4. El porcentaje de vómito (MSI) registrado fue del 7.28% con una aceleración promedio vertical de 0.29g, que es mucho mayor al 0.13g registradas durante la segunda prueba, cuando el buque se encontraba a Media Carga, y, el MSI fue de 1.82%. Esta diferencia entre los porcentajes de incidencia al mareo, no solo se debe al decrecimiento en la intensidad del oleaje y el viento, haciendo que la respuesta decrezca, sino a la adaptabilidad alcanzada por la tripulación, como se muestra en la figura 26. Si una persona se somete a un movimiento oscilatorio continuo en periodos largos de exposición, tiende a habituarse al mismo de tal forma que los posibles síntomas de mareo o vómito que se manifiestan en un inicio tienden a desaparecer conforme pasa el tiempo.

Los Estándares Internacionales como ISO ("International Standard Organization") y BS ("British Standard") establecen normas empleando modelos matemáticos que ayudan a predecir los índices de mareo y fatiga con cierto grado de confiabilidad. Estos estándares están basados en experimentaciones y datos históricos en los cuales no se consideran los factores que intervienen en el mareo en su totalidad, siendo uno de ellos la adaptabilidad. Como se muestra en la quinta columna de la tabla 25,

los porcentajes MSI según las encuestas disminuyeron de un 7.28% a 1.82%, es decir que en tan solo dos días de navegación el personal adquirió un nivel de adaptabilidad adecuado para la navegación. Por estas circunstancias el porcentaje de vómito se redujo considerablemente. También en la tabla mencionada, en la cuarta columna, se muestran los porcentajes teóricos del MSI según el BS 6841. Para la primera condición existe una correlación aceptable entre el MSI teórico y encuestado, apenas una diferencia del 2.72%, caso contrario ocurre con los índices de la segunda prueba, con la diferencia porcentual de 8.18%, es obvio que el modelo no considera el factor de adaptabilidad.

Las formulaciones de Savitsky son útiles para establecer una referencia numérica en lo que respecta aceleraciones verticales promedio, aplicables para embarcaciones planeadoras. A pesar que la Corbeta es un buque que opera dentro del rango de los semiplaneadores, se esperaba encontrar una correlación aceptable entre los valores teóricos obtenidos de Savitsky y las mediciones almacenadas. Pero evidentemente las diferencias son considerables, como se muestra en la tabla 29; esto se debe al que el rango recomendado de aplicabilidad es para embarcaciones que operan sobre un número de Froude mayor a 2, y apenas la Corbeta alcanza un valor de 0.65 con velocidad máxima de 30 nudos. Los parámetros de velocidad, número de Froude, ángulo de

asiento y eslora son decisivos para definir el rango de operación de una embarcación. La Corbeta es demasiado larga con respecto a las velocidades que desarrolla, por tal motivo se mantiene como semiplaneador.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda gestionar la adquisición de nuevos equipos y sensores de medición para optimizar y mejorar los procesos de medición del comportamiento de embarcaciones, indispensable para complementar la instrucción teórica recibida en esta Institución. Esto aseguraría el éxito de futuras mediciones a bordo de cualquier unidad sea naval o tipo comercial.

Si se planea seguir realizando este tipo de trabajos, se debe implementar un algoritmo para filtrar las señales eléctricas de baja y alta frecuencia, recopiladas por los acelerómetros e inclinómetros durante los procesos de medición para eliminar señales espurias como estática, variaciones de voltaje, etc. Esto implica no solamente implementar los algoritmos, sino lograr un grado aceptable de uso eficiente.

En base a la información aquí presentada, y con ayuda del Convenio Armada-Espol, se debe programar la realización de futuras mediciones, utilizando como dispositivo principal de medición la Plataforma Inercial PL 41, para avalizar la información recopilada por los sensores de la Facultad de Marítima.

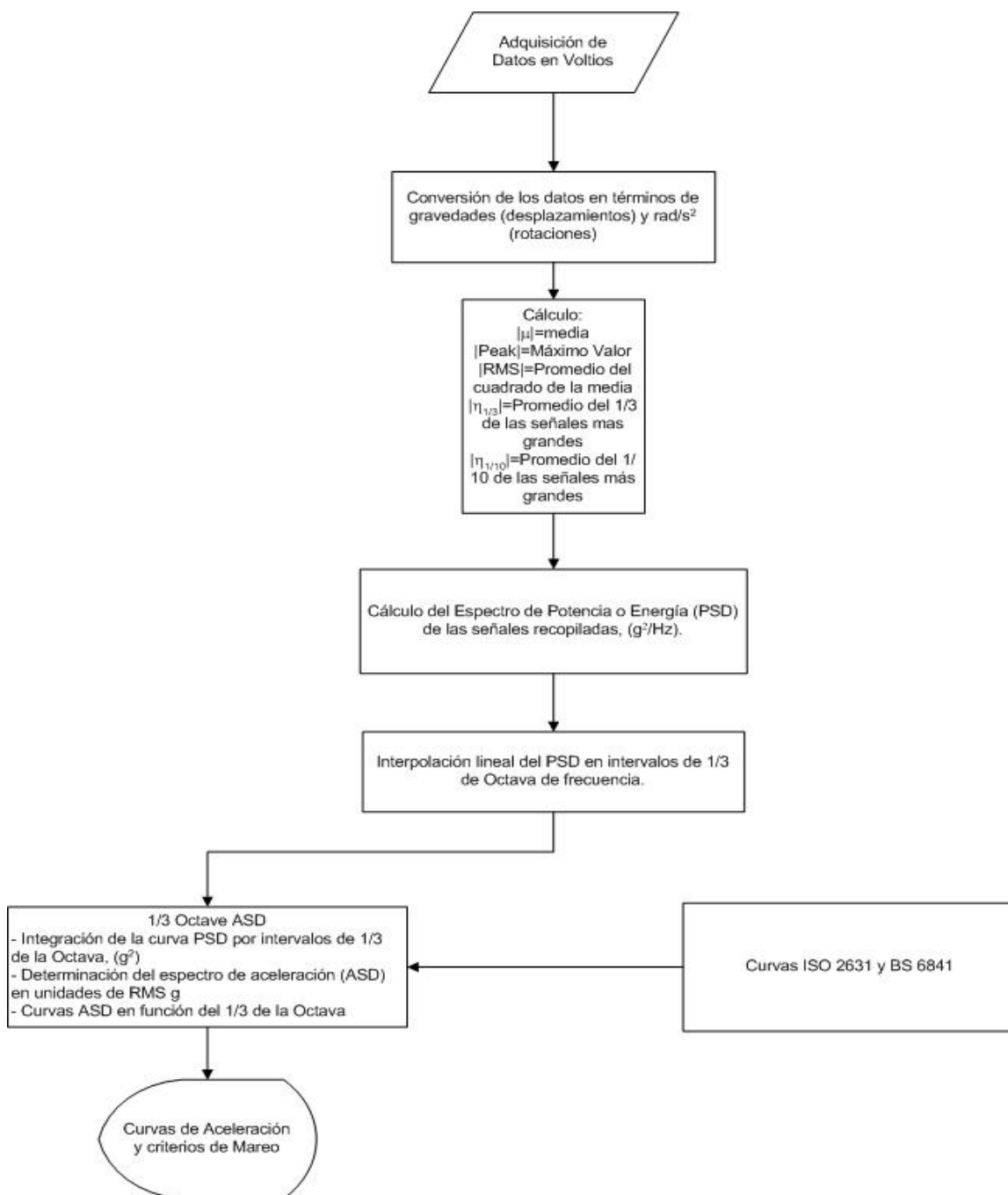
Es importante complementar la educación con el entrenamiento y trabajo en campo mediante la capacitación del alumnado en lo que respecta a la recopilación, organización, procesamiento y ejecución de datos y procesos de medición.

Se recomienda que para futuras encuestas, el formato incluya los puestos de trabajo o guardia que ocupa el personal durante las navegaciones. Esto permitirá una mayor discriminación para identificar la influencia del entorno del área de trabajo sobre el mareo y fatiga de la tripulación.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1

### Algoritmo y Programa del Proceso de Medición y Análisis de las Mediciones de la Respuesta de una Embarcación de Semiplaneo.



## Programa Principal

```

program lectura
! Este programa te lee datos de dos formas
! 1.      Si se conoce el numero de datos que vas a leer
!          lo ingresas por pantalla o puede estar en el archivo
! 2.      Si no conoces el número de datos, los enumera primero y luego los lee
use dflib
implicit none

! Definición de variables
real, dimension(:) :: X      ! Vector donde se almacena los números leídos
real, dimension(:) :: p, w1, w2
Real(8)           :: Y,sum,prm,rms,rma,may,min ! Variable intermedia de uso interno
allocatable       :: X, p, w1, w2             ! Propiedad dinámica del vector X
integer(4)        :: i,N,m,k                 ! Variables internas: i es un contador, N
número de datos
logical overlap
character (len = 25)      :: ArchDat, ArchRes    ! Variable donde se almacena el nombre del
archivo de datos
Character (len = 2)       :: Resp, Res !Variable donde se almacena la respuesta de tener o
no el
! número de datos

! Pide la información básica por pantalla
Write(*,'(1x,A,/)' )'LECTURA DE UN ARCHIVO DE DATOS, (Números Reales)'
! Pregunta el nombre del archivo de datos
write(*,'(1x,A)', advance = 'no')'Nombre del archivo de datos: '
read(*,*)archdat
write(*,'(1x,A,/)' )'Nombre del archivo de resultados: '
read(*,*)archres
! Pregunta si conocemos el número de datos que se va a leer,
! *****OJO***** , LA RESPUESTA ES EN minúsculas
Write(*,'(1x,A)', advance = 'no')'Conoce el número de datos? (si/no): '
Read(*,*)Resp

! Abre el archivo que contiene la información
open (9, file = ArchDat)
open (2, file = ArchRes)
! De acuerdo a tu respuesta, usa una de las formas, conociendo el número de datos
! o sin conocerlo

Select Case (Resp)
! Si conocemos el número de datos que se va a leer, lo almacena en el vector X
Case ('si')
    Write(*,'(1x,A)',advance = 'no')'Número de datos: '
    Read(*,*)N
    Allocate(x(N))
    sum=0
    rms=0
    do i = 1,N
        read(9,*)X(i)
        sum=sum+X(i)
        prm=sum/N
        rma=(rms+X(i)**2)/N
        rms=SQRT(rma)
    End Do

```

```

! Si no conocemos el número de datos que se va a leer, los almacena en el vector X
Case ('no')
    N = 0

    Do
        N = N+1
        Read(9,*)y
        If (EOF(1)) exit
    End Do
    Allocate(X(N))
    Rewind (1)
    sum=0
    rms=0
    do i = 1,N
        read(9,*)X(i)
        sum=sum+X(i)
        prm=sum/N
        rma=(rms+X(i)**2)/N
        rms=SQRT(rma)
        may=max(X(i))
        min=DMIN1(X(i))
    End Do
!
!
End Select
write(*,*) 'Desea calcular el espectro de la senal'
read(*,*) res

select case (res)
case ('si')
    overlap=.false.
    k=2
    m=N/4*k
    call spctrm(p,m,k,overlap,w1,w2)
case ('no')
    stop
end select
! Escritura de la información básica para verificar lectura
Write(*, '(1x,A,i5,A)') 'Se leyeron: ',N,' valores'
Write(*, '(1x,A,1x,e18.12/,1x,A,1x,e18.12)') 'Primer valor: ',X(1),'Último valor: ',X(N)
write(*, '(1x,A,1x,e18.12)') 'Suma Total es: ',sum
write(*, '(1x,A,1x,e18.12)') 'Promedio: ',prm
write(*, '(1x,A,1x,e18.12)') 'RMS: ',rms

! Fin del programa
End

```

## ANEXO 2

### Formato de la Encuesta para Evaluar Mareo y Fatiga

FECHA \_\_\_\_\_ HORA \_\_\_\_\_  
 EDAD \_\_\_\_\_ TIEMPO DE EMBARQUE \_\_\_\_\_  
 CARGO \_\_\_\_\_

#### SUJETO A FATIGA

(INDIQUE COMO SE SIENTE AHORA.)

1. \_\_\_\_\_ MUY ALERTA; BIEN DESPIERTO; EXTREMADAMENTE ATENTO  
 -----
2. \_\_\_\_\_ DESPIERTO; PREDISPUERTO, PERO NO AL MAXIMO  
 -----
3. \_\_\_\_\_ BIEN; ALGO DESPIERTO  
 -----
4. \_\_\_\_\_ UN POCO CANSADO; MENOS DESPIERTO  
 -----
5. \_\_\_\_\_ MODERADAMENTE CANSADO; DECAIDO  
 -----
6. \_\_\_\_\_ BASTANTE CANSADO; DIFICIL DE CONCENTRARSE  
 -----
7. \_\_\_\_\_ COMPLETAMENTE CANSADO;  
 IMPOSIBILITADO  
 PARA TRABAJAR  
 EFECTIVAMENTE  
 -----

COMENTARIO \_\_\_\_\_

#### SUJETO A MAREO

(INDIQUE COMO SE SIENTE AHORA.)

1. \_\_\_\_\_ PERFECTAMENTE NORMAL  
 -----
2. \_\_\_\_\_ LIGERAMENTE NORMAL, NO TIENE  
 SINTOMAS  
 -----
3. \_\_\_\_\_ LIGERA SENSACION DE  
 NAUSEAS  
 -----
4. \_\_\_\_\_ INTERMITENTE SENSACION DE NAUSEAS  
 -----
5. \_\_\_\_\_ DEFINITIVA SENSACION DE  
 VOMITO  
 -----
6. \_\_\_\_\_ CERCA DEL VOMITO  
 -----
7. \_\_\_\_\_ VOMITO

## INTERVALO #1

LA PRUEBA DURANTE LOS ULTIMOS DIEZ MINUTOS FUE:

- \_\_\_\_\_ MUY CONFORTABLE
- \_\_\_\_\_ CONFORTABLE
- \_\_\_\_\_ ALGO CONFORTABLE
- \_\_\_\_\_ NEUTRAL
- \_\_\_\_\_ ALGO INCONFORTABLE
- \_\_\_\_\_ INCONFORTABLE
- \_\_\_\_\_ MUY INCONFORTABLE

(POR FAVOR SELECCIONE UNA RESPUESTA)

**MAREO**

(INDIQUE COMO SE SIENTE AHORA.)

- 1. PERFECTAMENTE NORMAL  
-----
  - 2. LIGERAMENTE NORMAL, NO TIENE SINTOMAS  
-----
  - 3. LIGERA SENSACION DE NAUSEAS  
-----
  - 4. INTERMITENTE SENSACION DE NAUSEAS  
-----
  - 5. DEFINITIVA SENSACION DE VOMITO  
-----
  - 6. CERCA DEL VOMITO  
-----
  - 7. VOMITO  
-----
-

## **ANEXO 3**

### **Tablas de Contingencia para Evaluar el Estado del Personal durante las Pruebas**

Las pruebas de correlación efectuadas para las encuestas calculan coeficientes de correlación y confiabilidad y los más importantes son: Coeficiente de contingencia, cuando el valor siempre está comprendido entre 0 y 1; un valor de 0 indica que no hay asociación entre la fila y la columna y aquellos valores cercanos o iguales a 1 indican que hay gran relación entre las variables. Lambda, es la medida de asociación que refleja la reducción proporcional en el error cuando se utilizan los valores de la variable independiente para pronosticar los valores de la variable dependiente. Un valor igual a 1 significa que la variable independiente pronostica perfectamente la variable dependiente y cuando es 0 significa lo opuesto. Coeficiente de incertidumbre, indica la reducción proporcional del error cuando los valores de una variable se emplean para pronosticar valores de la otra variable. La prueba chi cuadrado indica el grado de confiabilidad, cuando se acerca a 0 quiere decir, que existe correlación entre las variables analizadas, en este caso son: Estado de Mar, índice de mareo. Por ejemplo si el Estado de Mar aumenta de 3 a 4, entonces el porcentaje MSI lo hará en la misma proporción.

MO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) \* COMO SE SIENTE DESPUES DE LA PRUEBA (MAREO) \* ESTADO DE MAR Crosstabulati

| ESTADO DE MAR |                                           |                                                             |                                                             | COMO SE SIENTE DESPUES DE LA PRUEBA (MAREO) |                                 |                          |                  |                  | Total            |
|---------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|------------------|------------------|------------------|
|               |                                           |                                                             |                                                             | PERFECTAMENTE NORMAL                        | LIGERAMENTE NORMAL, NO SINTOMAS | LIGERA SENSACION NAUSEAS | CERCA DEL VOMITO | VOMITO           |                  |
| MAR 3         | COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) | PERFECTAMENTE NORMAL                                        | Count<br>% within COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) | 25<br><br>80.6%                             | 4<br><br>12.9%                  | 1<br><br>3.2%            | 0<br><br>.0%     | 1<br><br>3.2%    | 31<br><br>100.0% |
|               |                                           | LIGERAMENTE NORMAL                                          | Count<br>% within COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) | 7<br><br>38.9%                              | 10<br><br>55.6%                 | 0<br><br>.0%             | 1<br><br>5.6%    | 0<br><br>.0%     | 18<br><br>100.0% |
|               |                                           | LIGERA SENSACION DE NAUSEAS                                 | Count<br>% within COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) | 0<br><br>.0%                                | 4<br><br>66.7%                  | 2<br><br>33.3%           | 0<br><br>.0%     | 0<br><br>.0%     | 6<br><br>100.0%  |
|               |                                           | Total                                                       | Count<br>% within COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) | 32<br><br>58.2%                             | 18<br><br>32.7%                 | 3<br><br>5.5%            | 1<br><br>1.8%    | 1<br><br>1.8%    | 55<br><br>100.0% |
|               |                                           |                                                             |                                                             |                                             |                                 |                          |                  |                  |                  |
| MAR 4         | COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) | PERFECTAMENTE NORMAL                                        | Count<br>% within COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) | 21<br><br>72.4%                             | 4<br><br>13.8%                  | 2<br><br>6.9%            | 0<br><br>.0%     | 2<br><br>6.9%    | 29<br><br>100.0% |
|               |                                           | LIGERAMENTE NORMAL                                          | Count<br>% within COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) | 5<br><br>26.3%                              | 9<br><br>47.4%                  | 0<br><br>.0%             | 3<br><br>15.8%   | 2<br><br>10.5%   | 19<br><br>100.0% |
|               |                                           | LIGERA SENSACION DE NAUSEAS                                 | Count<br>% within COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) | 0<br><br>.0%                                | 0<br><br>.0%                    | 3<br><br>50.0%           | 3<br><br>50.0%   | 0<br><br>.0%     | 6<br><br>100.0%  |
|               |                                           | INTERMITENTE SENSACION DE NAUSEAS                           | Count<br>% within COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) | 0<br><br>.0%                                | 0<br><br>.0%                    | 0<br><br>.0%             | 1<br><br>100.0%  | 0<br><br>.0%     | 1<br><br>100.0%  |
|               |                                           |                                                             |                                                             |                                             |                                 |                          |                  |                  |                  |
|               | Total                                     | Count<br>% within COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) | 26<br><br>47.3%                                             | 13<br><br>23.6%                             | 5<br><br>9.1%                   | 7<br><br>12.7%           | 4<br><br>7.3%    | 55<br><br>100.0% |                  |

## Directional Measures

| ESTADO DE MAR |                    |                         |                                                       | Value | Asymp. Std. Error <sup>a</sup> | Approx. $\tau^b$ | Approx. Sig.      |
|---------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------|-------|--------------------------------|------------------|-------------------|
| MAR 3         | Nominal by Nominal | Lambda                  | Symmetric                                             | .319  | .135                           | 2.024            | .043              |
|               |                    |                         | COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) Dependent   | .333  | .144                           | 1.950            | .051              |
|               |                    |                         | COMO SE SIENTE DESPUES DE LA PRUEBA (MAREO) Dependent | .304  | .166                           | 1.561            | .119              |
|               |                    | Goodman and Kruskal tau | COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) Dependent   | .260  | .088                           |                  | .000 <sup>c</sup> |
|               |                    |                         | COMO SE SIENTE DESPUES DE LA PRUEBA (MAREO) Dependent | .254  | .082                           |                  | .000 <sup>c</sup> |
|               |                    | Uncertainty Coefficient | Symmetric                                             | .276  | .069                           | 3.564            | .000 <sup>d</sup> |
|               |                    |                         | COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) Dependent   | .284  | .072                           | 3.564            | .000 <sup>d</sup> |
|               |                    |                         | COMO SE SIENTE DESPUES DE LA PRUEBA (MAREO) Dependent | .268  | .070                           | 3.564            | .000 <sup>d</sup> |
|               |                    | Lambda                  | Symmetric                                             | .309  | .121                           | 2.237            | .025              |
|               |                    |                         | COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) Dependent   | .346  | .143                           | 2.037            | .042              |
|               |                    |                         | COMO SE SIENTE DESPUES DE LA PRUEBA (MAREO) Dependent | .276  | .124                           | 1.950            | .051              |
|               |                    | Goodman and Kruskal tau | COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) Dependent   | .313  | .088                           |                  | .000 <sup>c</sup> |
|               |                    |                         | COMO SE SIENTE DESPUES DE LA PRUEBA (MAREO) Dependent | .245  | .062                           |                  | .000 <sup>c</sup> |
| MAR 4         | Nominal by Nominal | Uncertainty Coefficient | Symmetric                                             | .337  | .061                           | 4.798            | .000 <sup>d</sup> |
|               |                    |                         | COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) Dependent   | .395  | .064                           | 4.798            | .000 <sup>d</sup> |
|               |                    |                         | COMO SE SIENTE DESPUES DE LA PRUEBA (MAREO) Dependent | .295  | .059                           | 4.798            | .000 <sup>d</sup> |
|               |                    | Lambda                  | Symmetric                                             | .309  | .121                           | 2.237            | .025              |
|               |                    |                         | COMO SE SIENTE ANTES DE LA PRUEBA (MAREO) Dependent   | .346  | .143                           | 2.037            | .042              |
|               |                    |                         | COMO SE SIENTE DESPUES DE LA PRUEBA (MAREO) Dependent | .276  | .124                           | 1.950            | .051              |

a. Not assuming the null hypothesis.

b. Using the asymptotic standard error assuming the null hypothesis.

c. Based on chi-square approximation

d. Likelihood ratio chi-square probability.

### Chi-Square Tests

| ESTADO DE MAR |                                 | Value               | df | Asymp. Sig.<br>(2-sided) |
|---------------|---------------------------------|---------------------|----|--------------------------|
| MAR 3         | Pearson Chi-Square              | 28.675 <sup>a</sup> | 8  | .000                     |
|               | Likelihood Ratio                | 29.084              | 8  | .000                     |
|               | Linear-by-Linear<br>Association | 4.347               | 1  | .037                     |
|               | N of Valid Cases                | 55                  |    |                          |
| MAR 4         | Pearson Chi-Square              | 46.496 <sup>b</sup> | 12 | .000                     |
|               | Likelihood Ratio                | 44.274              | 12 | .000                     |
|               | Linear-by-Linear<br>Association | 13.580              | 1  | .000                     |
|               | N of Valid Cases                | 55                  |    |                          |

a. 11 cells (73.3%) have expected count less than 5. The minimum expected count is .11.

b. 17 cells (85.0%) have expected count less than 5. The minimum expected count is .07.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Meter, J. Mantle, Air Cushion Craft Development, DTNSRDC-80/012, January 1980.
  
- [2] American, Society, Naval, Engineer, Naval Engineers Journal, Vol. 97. No. 2, February 1985, pp 83-111.
  
- [3]. Apache, Software, Foundations, SPSS 13.0 Version for Windows, 2004
  
- [4]. Bhattacharyya, Rameswar, Dynamics of Marine Vehicles. Ocean Engineering, John Wiley&Sons, Inc., June 1978.
  
- [5]. Dobie, Thomas, G., M.D., Critical Significance of Human Factors in Ship Design. Proceedings of the 2003 RVOC Meeting, U. Minnesota, Oct., 2003.
  
- [6]. Haupt, Kelly, High-Speed Craft Motions: a Case Study. Naval Surface Warfare Center, Carderock Division, April 1996.
  
- [7]. Instituto Oceanográfico de la Armada, Escala Beafourt. Armada del Ecuador, Mayo 2002.
  
- [8]. International Towing Tank Conference, Testing and Extrapolation Methods High Speed Marine Vehicles, Excerpt of ISO 2631, Seasickness and Fatigue, 1-5 pgs., 1999.
  
- [9]. International Organization for Standardization, ISO 2631, Human Response to Whole Body Vibration standard, 1989.

- [10]. Karon, Stuart, Easy Plot, Version 4.0.4, 32 bit-exec., Spiral Software & MIT, Copyright 1989-1999.
  
- [11]. March, Roberth, Palo, Paul, Dr., Lighterage Seasickness Parametric Study, Naval Facilities Engineering Service Center, December 1998.
  
- [12]. Neuhoff, R., Technical Manual PL41V, Marine Navigation System, Part 1, Description, Litef-Freiburg- W. Germany, 1982.
  
- [13]. Omega, DaqEZ ® Professional, Version 1.17, 2000.
  
- [14]. Press, Flannery, Teukolsky, Vetterling, Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing (Fortran Version), Cambridge University Press, 1989.
  
- [15]. Samson, C. Stevens, Parsons, Michael, G., Effects of Motion at Sea on Crew Performance: A Survey, Marine Technology, SNAME, Vol. 39, No. 1, January 2002, pp. 29-47.
  
- [16]. Savitsky, Brown, y, Ward, Procedures for Hydrodynamic Evaluation of Planing Hulls in Smooth and Rough Water, MT, SNAME, Oct. 1976.
  
- [17]. Serridge, Mark, y, Torben, R. Licht, Piezoelectric Accelerometer and Vibration Preamplifier Handbook, Bruel&Kjaer, October 1986.
  
- [18]. Techet, A.H., Prof, Design Principles for Ocean Vehicles, Notes of Class 13.42, Spring, MIT, 2005.
  
- [19]. Thomson, T., William, Teoría de Vibraciones, Aplicaciones, Prentice-Hall, Inc., Enlewood Cliffs, N.J. 07632, 1981.