



# CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

DOCUMENTO N°: **CRIBAV-01-04**

*Fecha:* **18/06/1998**

*Código SubProyecto:*

## TÍTULO DEL DOCUMENTO **EVALUACION**

**Autores:**

J. M. de la Cruz

# CRIBAV

---

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

DOCUMENTO N°: **CRIBAV-01-04**

*Fecha:* **3/04/2000**

*Código SubProyecto:*

TÍTULO DEL DOCUMENTO

**EVALUACIÓN**

**Autores:**

J.M. de la Cruz

**Grupo:** ISA-UCM

**Responsable del Grupo:** J.M. de la Cruz

**Responsable del Informe:** J.M. de la Cruz

*SubProyecto:*

*Version:* 01

**Lista y Filiación de Autores:**

jmacruz@dacya.ucm.es

**Agradecimientos:**

**Lista de distribución:**

cribav

## **Resumen:**

Las especificaciones se hacen en función de dos aspectos fundamentales: señales ligadas al movimiento del buque y señales ligadas al comportamiento de los actuadores. De las señales ligadas al movimiento del buque las más interesantes son aquellas relativas a la aceleración del buque en uno o en un conjunto de puntos, ya que estas señales están ligadas a todos aquellos aspectos que influyen en las personas que van en el buque: confort, mareo, seguridad y fatiga de los trabajadores y competencia de las tareas que desarrollan. En cuanto al actuador lo fundamental es reducir su nivel de actividad y la cavitación. Se dan dos funciones, una que permite medir el índice de mareo en un punto en función de la media de la aceleración absoluta en un punto y de la frecuencia media de los picos de las aceleraciones, y otra que permite saber que rms de la aceleración es necesaria para conseguir un índice de mareo dado a una frecuencia determinada.

## **Summary:**

The ship control performance are given in terms of two main aspects: signals linked to the ship motion and signals linked to the actuators. The main signals connected with the motions of the ship are the ones inducing vertical accelerations: roll angle, pitch angle and heave. These signals have great influence on the comfort, motion sickness, personnel fatigue, task proficiency and safety. With respect to actuators the main aspect is reduce as much as possible its activity and cavitation. Two functions are given, one that calculates the motion sickness incidence from the vertical acceleration averaged over half a motion cycle and the average frequency of the acceleration peaks; and the other, that calculates the rms acceleration needed to get a given motion sickness incidence and the averaged frequency.

**CONTENIDO**

**1 ESPECIFICACIONES PARA EL CONTROL .....0**  
    1.1 MEDIDA DEL MSI.....0  
    1.2 MEDIDA DEL MOVIMIENTO SUBJETIVO .....0  
**2 ESPECIFICACIONES PARA EL CONFORT .....0**  
**3 ESPECIFICACIONES PARA LA SEGURIDAD .....0**  
**4 ESPECIFICACIONES RELATIVAS A LOS ACTUADORES.....0**

# 1 ESPECIFICACIONES PARA EL CONTROL

Las especificaciones se harán en función de dos aspectos fundamentales: señales ligadas al movimiento del buque y señales ligadas al comportamiento de los actuadores. De las señales ligadas al movimiento del buque las más interesantes son aquellas relativas a la aceleración del buque en uno o en un conjunto de puntos, ya que estas señales están ligadas a todos aquellos aspectos que influyen en las personas que van en el buque: confort, mareo, seguridad y fatiga de los trabajadores y competencia de las tareas que desarrollan (Lewis, 1989, pag. 142).

## 1.1 MEDIDA DEL MSI

Las señales ligadas al movimiento del buque más importantes son las aceleraciones verticales y el movimiento relativo del buque con respecto al agua. La razón es que la aceleración vertical es la causa principal del mareo y el movimiento relativo es la causa fundamental del "slamming" y el "deck wetness".

Según Lloyd(89), O'Hanlon y McCaully encontraron que el MSI (motion sickness incidence o porcentaje de personas que vomitan dentro de las dos horas) está expresado en la forma:

$$MSI = 100 \left[ 0.5 \pm erf \left( \frac{\pm \log_{10} (|\ddot{s}_3| / g) \mp \mu_{MSI}}{0.4} \right) \right] \quad ((1)1)$$

donde  $|\ddot{s}_3|$  es la aceleración vertical en el punto elegido promediado sobre la mitad de un ciclo; y donde

$$\mu_{MSI} = -0.819 + 2.32(\log_{10} \omega_e)^2 \quad (2)(2)$$

La figura siguiente muestra el valor de MSI según Lloyd. En el eje de abscisas se muestra la frecuencia de encuentro en rad/seg., en el eje de ordenadas los valores de MSI. (La figura está en la página 427 de Lloyd, fig. 21.2)

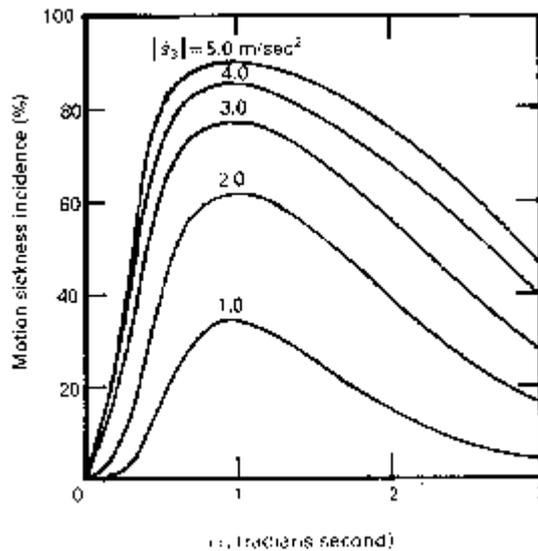


Figura 1: MSI según fórmula (1).

La representación gráfica se puede obtener mediante el siguiente programa MATLAB:

```
function msi=fmareo(s,w)
% function msi=fmareo(s,w)
% Devuelve el valor de Motion Sickness Incidence [0-1]
% que corresponde a una aceleración media s
% y a una frecuencia w.
%
m=-0.819+2.32*(log10(w))^2;
I=(-log10(abs(s)/9.8)+m)/0.4/sqrt(2);
if I >=0,
    msi=0.5-0.5*abs(erf(I));
else
    msi=0.5+0.5*abs(erf(I));
end
```

Es necesario comentar la fórmula ya que, como se ve, no coincide con la expresión de Lloyd. Primero hay que comentar que en la fórmula (2) el cuadrado es del logaritmo de la frecuencia y no de la frecuencia, como aparece en el libro de Lloyd (pag. 335). Además la función MATLAB erf(.) evalúa:

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$$

mientras que en Lloyd

$$erf(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz$$

De manera que para que MATLAB de el mismo valor que utiliza Lloyd es necesario calcular  $\frac{1}{2} erf\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right)$ . Además, en Lloyd se utiliza la función *erf* de modo que

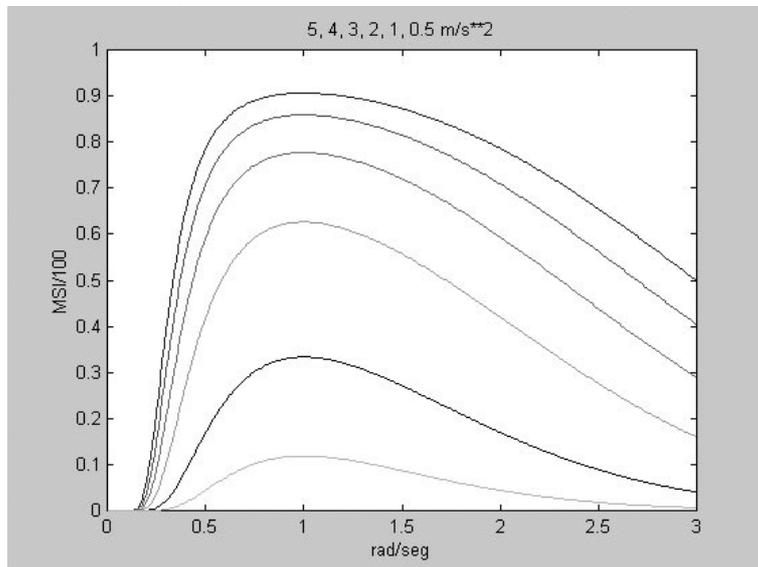
$$erf(-x) = erf(x)$$

pero en MATLAB

$$erf(-x) = -erf(x).$$

Finalmente, el signo cambia dependiendo de que el valor de *I* sea mayor o menor que cero.

La figura 3 muestra las gráficas del MSI para distintos valores de la aceleración. Los datos se han obtenido con la función *fmareo.m*.



*Figura 2: Valores del MSI/100 para distintas frecuencias y medias de las aceleraciones verticales*

Lo más importante de resaltar es la ocurrencia de los máximos en torno a 1.07 rad./seg. en la frecuencia de encuentro, y como las aceleraciones crecientes aumentan el número de personas que sufren el mareo.

En la fórmula (1) Lloyd utiliza el valor medio de los valores absolutos de las aceleraciones  $|\ddot{s}_3|$ . Este valor se puede calcular suponiendo que la distribución de las aceleraciones en aguas irregulares es Gaussiana, lo que nos da la relación:

$$|\ddot{s}_3| = 0.798\sqrt{m_0} \quad m/seg^2 \quad (3)(3)$$

siendo  $m_0$  la varianza de la aceleración vertical ( $m_4$  si se utiliza el momento de la posición). Como frecuencia media de los picos de las aceleraciones se utiliza:

$$\bar{\omega} = \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \quad rad./seg. \quad (4)(4)$$

donde  $m_2$  y  $m_4$  son los momentos dos y cuatro de la aceleración vertical ( $m_6$  y  $m_8$  de la posición). Estos valores no tienen que coincidir con la realidad debido a otros factores no tenidos en cuenta y a que representan una aproximación; no obstante, sirven desde un punto de vista comparativo del confort entre distintas soluciones.

El siguiente programa calcula la aceleración que produce un MSI a una frecuencia dada.

```
function s=amareo(msi,w)
% function s=amareo(msi,w)
% Devuelve el valor de la aceleración s
% que corresponde a un índice de mareo msi (0-1)
% para una frecuencia w.
%
% J.M. de la Cruz
% 28 Marzo 2000

m=-0.819+2.32*(log10(w))^2;
J=msi-0.5;
I=sqrt(2)*erfinv(J*2);
aa=I*0.4+m;
s=10^aa*9.8;
```

En la función se tiene en cuenta que en la inversa de la función *erf* con MATLAB se debe utilizar  $\sqrt{2} * \text{erfinv}(I * 2)$  para que coincida con el valor que se considera en Lloyd (pag. 335). En la figura 110 del vol. III del libro de Lewis (1989), se representan las aceleraciones verticales y las frecuencias correspondientes a distintos valores de MSI. Estas gráficas se pueden obtener con la función *amareo.m*. La figura siguiente muestra los resultados obtenidos para distintos valores de MSI.

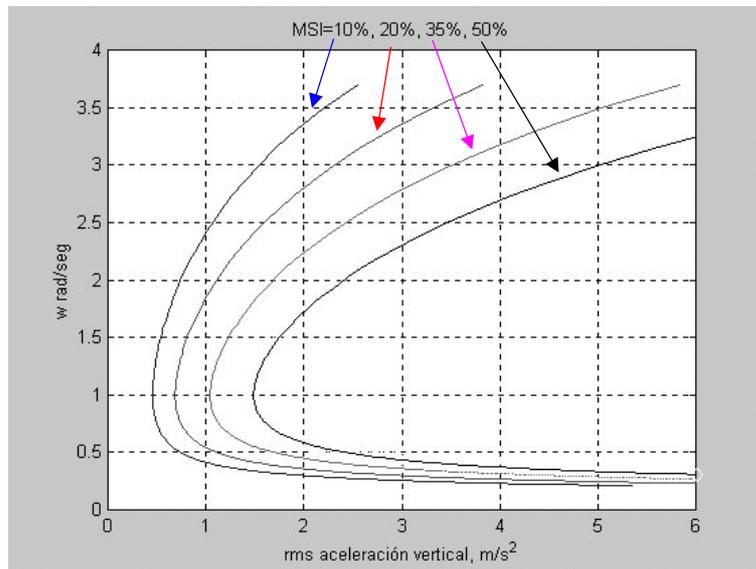


Figura 3: Valores de las frecuencias y de las aceleraciones verticales que corresponden a distintos valores del MSI/100 .

Para obtener estas gráficas Lewis indica que se utiliza el rms de la aceleración, esto es,  $\text{sqrt}(m_0)$  ( $\text{sqrt}(m_4)$  para la posición), por lo que el valor de la aceleración es mayor que el utilizado en Lloyd.

Estas gráficas nos puede dar la idea del MSI en un punto determinado pero no nos permite dar una medida global del MSI en todos los puntos del buque. Esta se puede obtener calculando el valor de MSI en una serie de puntos y promediando un valor ponderado. Esto es lo que se muestra en la figura siguiente (fig. 21.3 de Lloyd). El eje de abscisas representa la distancia en relación al centro del buque que se sitúa en medio del eje  $x_{BIM}/L_s$ . Así la proa queda a 0.5 y la popa a -0.5.

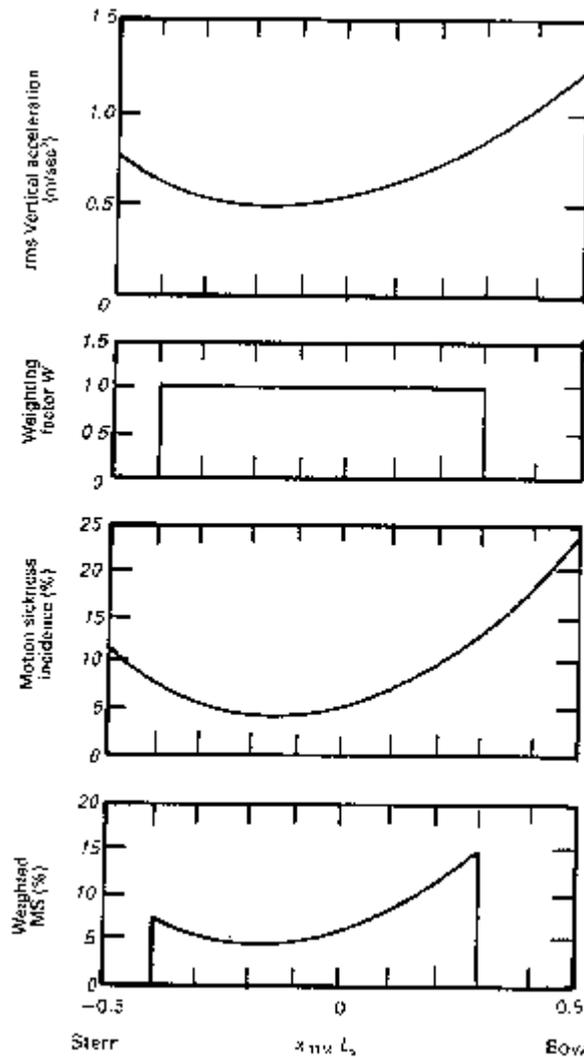


Figura 4: MSI promediado.

## 1.2 MEDIDA DEL MOVIMIENTO SUBJETIVO

Una medida del malestar producido por el movimiento, aunque no produzca el mareo, es el denominado Movimiento Subjetivo (SM) que mide lo molesto del movimiento vertical en relación con la realización de una tarea con referencia a un estándar (Lloyd, sección 21.3). Este movimiento es:

$$SM = A \left( \frac{\ddot{s}_{30}}{g} \right)^{1.43} \tag{5(5)}$$

donde  $A$  es un parámetro que depende de la frecuencia y que nos indica el grado de sensibilidad de las personas a las distintas frecuencias. Está dado por la ecuación:

$$A = \left[ 1 - \exp(-1.65\omega_e^2) \right] \left[ 75.6 - 49.6 \log_e \omega_e + 13.5 (\log_e \omega_e)^2 \right] \tag{6}$$

El valor de  $\ddot{s}_3$  utilizado en los cálculos es:

$$\ddot{s}_3 = 2\sqrt{m_0} \text{ m/seg}^2$$

(donde se debe utilizar  $m_4$ , si se calcula a partir del espectro de la posición) valor que corresponde a la media de las amplitudes significativas de las aceleraciones (pag. 20 y 91 de Lewis) y que coincide con la media del 1/3 de las mayores amplitudes registradas (pag. 19 de Lewis). Como frecuencia se utiliza la dada por la ecuación (4). La figura 5 muestra la representación de la ecuación (6).

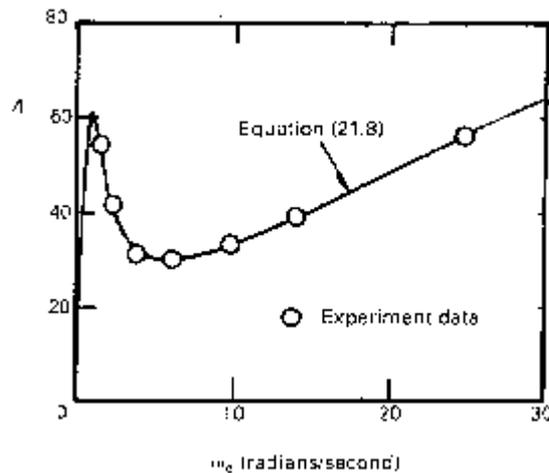


Figura 5: Representación del parámetro  $A$ .

La figura 6 muestra la relación entre el SM y el rms de la aceleración vertical de acuerdo con la ecuación (5) para la peor de las frecuencias que vimos era 1.07 rad./seg. Nos da una medida de que rms de la aceleración vertical puede ser considerada como máxima admisible.

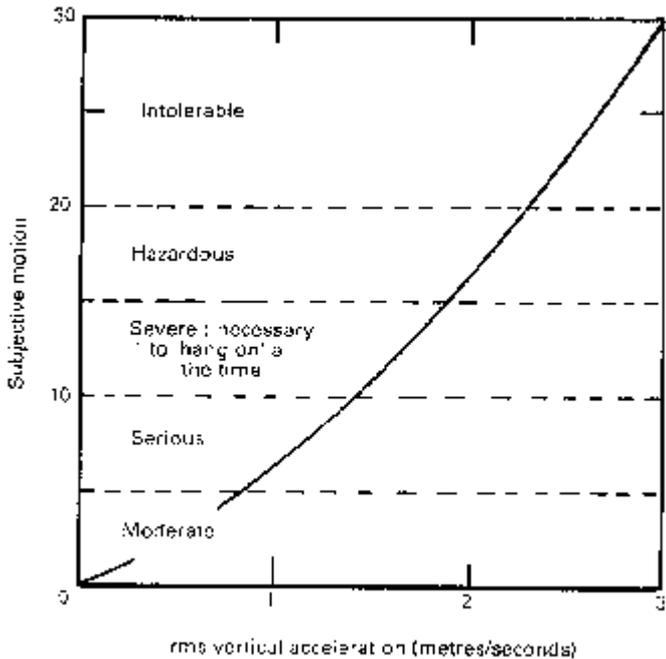


Figura 6: SM y aceleración vertical para  $w_e=1.07$  rad./seg.

También se puede ponderar el valor SM y calcular su valor medio a lo largo del buque, como muestra la figura 7.

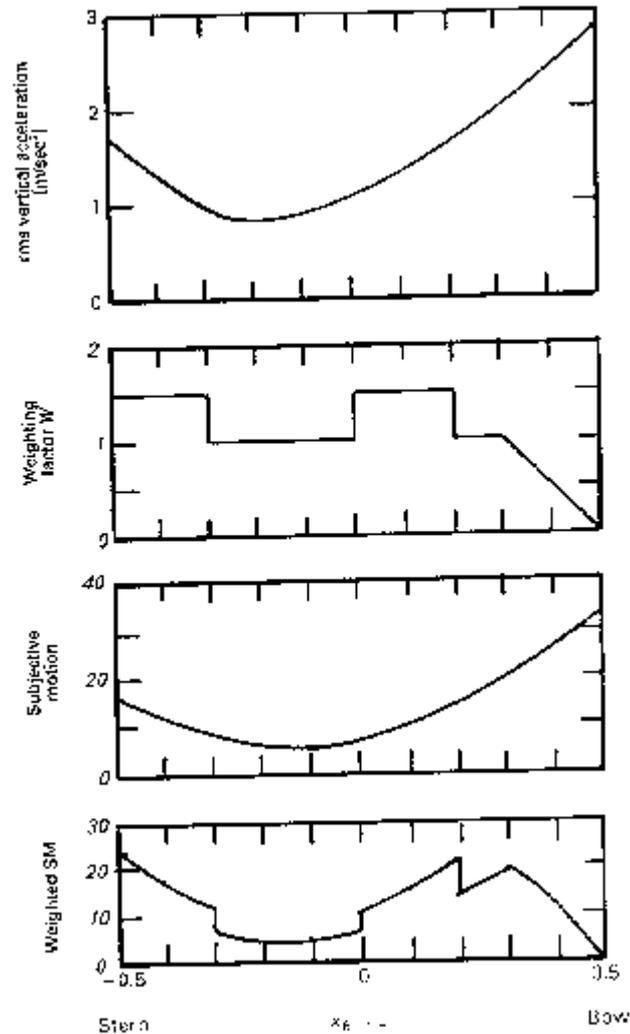


Figura 7: Movimiento subjetivo ponderado (figura 21.6 de Lloyd)

La conclusión que se extrae es la ya sabida: hay que intentar reducir al máximo las aceleraciones verticales sobre todo en el rango de frecuencias próximas (superiores) a 1.07 rad./seg. Las aceleraciones a muy bajas frecuencias no tienen gran importancia.

## 2 ESPECIFICACIONES PARA EL CONFORT

Para el modelo de diseño:

- Reducir el rms respecto del heave sin actuadores. El valor máximo de este podrá ser pues 1.

## **CRIBAV**

CONTROL ROBUSTO E INTELIGENTE DE BUQUES DE ALTA VELOCIDAD

- Reducir el rms respecto del pitch sin actuadores. El valor máximo de este podrá ser pues 1.
- reducir el rms de la aceleración vertical en un punto situado en el puente de mando situado al 68.75% de la longitud del buque (120 m) con respecto al valor sin actuadores. El valor máximo de este podrá ser pues 1.
- Reducir el MSI ponderado según la función de ponderación que se indica:

Esto deberá hacerlo para los estados de la mar 4, 5 y 6 a la velocidad de diseño

### **3 ESPECIFICACIONES PARA LA SEGURIDAD**

Esto nos permite medir el confort en el buque. Otras medidas importantes son la de "slamming" y "deck wetness". Ambos aspectos están relacionados con el movimiento relativo del buque con respecto a la ola. Cuando una porción considerable de la longitud del buque sale del agua la probabilidad de que se produzca un pantocazo es considerable. La porción del buque que tiene que salir fuera para que se produzca el pantocazo se indica en Lewis pag. 148 como del 15% de la longitud del buque (desde proa) y en Lloyd se indica un valor de  $x_{BIM}/L_s=0.3$ , es decir a un 20% de la proa.

- Podemos introducir entonces una medida de la posibilidad de que ocurra un pantocazo midiendo el número de veces que emerge la quilla a una determinada distancia de proa. Otra medida puede ser el rms del movimiento relativo del punto fijado. Cuanto menor sea menor es la probabilidad de que ocurra un pantocazo.

### **4 ESPECIFICACIONES RELATIVAS A LOS ACTUADORES**

- Reducir el rms del uso del actuador.

### **5 REFERENCIAS**

Lloyd A.R.J.M. Seakeeping: ship behaviour in rough water. Ellis Horwood Limited, 1989.

Lewis, E.V. (Editor). Principles of Naval Architecture Second Revision. Vol. III Motions in Waves and Controllability. The Society of Naval Architects and Marine Engineers. 1989.