

Publicación núm. 214

# PULSOS DE PRESIÓN DEBIDOS A CAVITACIÓN. INFLUENCIA DE LA SEPARACIÓN ENTRE LA HÉLICE Y EL CASCO.

POR

J. MASIP  
R. QUEREDA



**Ministerio  
de Defensa**

**MADRID  
JUNIO 2009**

# **PULSOS DE PRESIÓN DEBIDOS A CAVITACIÓN. INFLUENCIA DE LA SEPARACIÓN ENTRE LA HÉLICE Y EL CASCO.**

POR

J. MASIP  
R. QUEREDA

Trabajo presentado al 48º Congreso de Ingeniería Naval.  
Vigo, Junio 2009

**Autores: Jaime Masip Hidalgo, Doctor Ingeniero Naval y  
Ramón Quereda Laviña, Doctor Ingeniero Naval.**

## **Pulsos de presión debidos a cavitación. Influencia de la separación entre la hélice y el casco.**

Con la instalación de elevadas potencias en los buques actuales para proporcionarles mayores velocidades, los efectos que se derivan de los fenómenos de cavitación son cada vez más importantes. Los empujes altos producidos por el propulsor, la utilización del eje inclinado en numerosos buques, las fuertes variaciones de la estela, etc., han hecho que el proyectista se encuentre con mayores dificultades a la hora de abordar problemas entre los que cabría destacar las vibraciones causadas por cavitación.

En este trabajo, llevado a cabo en el túnel de cavitación de El Pardo, se ha realizado un estudio comparativo de la intensidad de los pulsos de presión en el casco del buque, como consecuencia de la aparición de cavitación en el flujo que rodea al propulsor.

Para ello se han utilizado diferentes tipos de hélices, empleando como parámetro de referencia la clara (distancia vertical de la punta de la pala a la bovedilla del codaste) y analizando la variación de la potencia.

Asimismo se estudia la influencia que tiene la clara en los pulsos de presión en situación de no cavitación.

### **1. INTRODUCCIÓN.**

La onda de presión generada por el flujo cavitante que rodea la hélice, cubre un espectro muy amplio en frecuencias entre 10 Hz y 100KHz aproximadamente. Las bajas frecuencias, importantes en la generación de vibraciones en la bovedilla del codaste, tienen su origen principalmente en la inestabilidad de un dominio de burbujas (variaciones de volumen de una cavitación lámina intermitente) en su crecimiento y en la primera fase del colapso de las burbujas. Las altas frecuencias tienen su origen en la fase final del colapso.

Las fluctuaciones de presión producidas por el propulsor inducen vibraciones en la bovedilla del codaste cuya intensidad depende a su vez de la respuesta estructural del buque. La cavitación origina gran parte de las vibraciones que se transmiten a través de la línea de ejes.

Las vibraciones inducidas por los propulsores han cobrado una gran importancia en los últimos tiempos. No sólo desde el punto de vista del cálculo de la estructura del buque sino también para mejorar el confort humano, cuya normativa ha sido cada vez más restrictiva en cuanto a los niveles de vibraciones y ruidos admisibles.

La construcción de modelos y su ensayo en los túneles de cavitación han servido y sirven actualmente para medir a escala los pulsos de presión, utilizando captadores de presión. La integración de sus amplitudes con sus fases, permiten el cálculo de la fuerza excitadora sobre la superficie de la bovedilla del codaste. Estos datos pueden procesarse por medio de un analizador de espectros.

Una correcta predicción de la intensidad de los pulsos de presión y sus fases en base a los datos obtenidos en los ensayos con modelos permite:

- Optimizar los proyectos mejorando la habitabilidad de los buques al disminuir los ruidos y las vibraciones.

- Mejorar las capturas de los buques de pesca. Disminuyendo y/o adaptando las amplitudes del ruido en las zonas del espectro en las que sus frecuencias coinciden con las del aparato auditivo de los peces.

- Asegurar un bajo nivel de detección e identificación de los buques de guerra.

El CEHIPAR consciente de la importancia de la cavitación en las vibraciones y ruidos que se generan en el buque, llevó a cabo numerosos ensayos en los últimos años. Participó en programas de investigación y en comités internacionales con el objetivo de estudiar, predecir y disminuir las fuerzas excitadoras sobre el casco y el ruido radiado.

Dentro de este contexto se realizaron medidas de pulsos de presión a escala real en un buque Ferry comparándose con las medidas obtenidas en los ensayos en el túnel de cavitación obteniéndose resultados muy satisfactorios.

Para el mismo buque se analizaron las fuertes fluctuaciones de presión y ruidos inducidos, producidos por las hélices convencionales (originales del buque) cuando trabajaban fuera de diseño (en maniobra). En estas condiciones pudo observarse con claridad que se generaba un espectro de banda ancha, es decir no localizado en armónicos concretos. La excitación *random* o de banda ancha entre los armónicos de excitación correspondientes al 2 y 3xBPF, provocaba la aparición de fenómenos de resonancia locales, que dominaban claramente los espectros tanto de vibración como de ruidos. Al ser sustituidas las hélices convencionales por hélices CLT's, el espectro resultó diferente con picos diferenciados en las frecuencias propias de los armónicos, disminuyendo con ello las vibraciones y ruidos.

## 2. CARACTERISTICAS DE LOS MODELOS.

Para la realización de este trabajo se han seleccionado cinco buques A, B, C, D y E y diversos modelos de propulsores convencionales y diferentes hélices CLT con objeto de poder analizar la influencia de la potencia y de la clara que existe entre la punta de la pala del propulsor y el codaste del buque.

Al buque A, 1H-Bulkcarrier, con 279,6 metros de eslora entre perpendiculares, manga de 43,2 metros y un calado medio de 9,9 metros sin trimado, siendo su coeficiente de bloque 0,818, le corresponden los ensayos con los modelos de propulsores CONV-01 y CLT-01.

Al buque B, 1H-Atunero, con 91,5 metros de eslora entre perpendiculares, manga de 16,0 metros y un calado medio de 7,2 metros sin trimado, siendo su coeficiente de bloque 0,604, le corresponden los ensayos con los modelos de propulsores CONV-02 y CLT-02.

Al buque C, 1H-Petrolero, con 162,0 metros de eslora entre perpendiculares, manga de 27,4 metros y un calado medio de 9,75 metros sin trimado, siendo su coeficiente de bloque 0,795, le corresponden los ensayos con el modelo de propulsor CLT-03.

Al buque D, 1H-Atunero, con 82,3 metros de eslora entre perpendiculares, manga de 14,7 metros y un calado medio de 6,5 metros sin trimado, siendo su coeficiente de bloque 0,485, le corresponden los ensayos con el modelo de propulsor CONV-03.

Al buque E, 2H-Ferry, con 157,0 metros de eslora entre perpendiculares, manga de 26,2 metros y un calado medio de 5,88 metros con trimado 0,26 metros, siendo su coeficiente de bloque 0,615, le corresponden los ensayos con el modelo de propulsor CLT-04.

Todos los propulsores seleccionados tienen cuatro palas y la relación de áreas está comprendida entre 0,45 y 0,56. Junto a las características de los propulsores se adjuntan los datos correspondientes al diámetro y la relación paso/diámetro en la sección 0,7R.

Propulsor CONV-01.

Diámetro (265,09 mm.), (8,3 metros para la hélice del buque);  
Relación paso/diámetro a 0,7R = 0,709;  
Relación de áreas = 0,562;  
Número de palas 4.

Propulsor CONV-02.

Diámetro (259,93 mm.), (4,45 metros para la hélice del buque);  
Relación paso/diámetro a 0,7R = 1,034;  
Relación de áreas = 0,460;  
Número de palas 4.

Propulsor CONV-03.

Diámetro (259,93 mm.), (4,45 metros para la hélice del buque);  
Relación paso/diámetro a 0,7R = 1,026;  
Relación de áreas = 0,522;  
Número de palas 4.

Propulsor CLT-01.

Diámetro (252,32 mm.), (7,9 metros para la hélice del buque);  
Relación paso/diámetro a 0,7R = 0,791;  
Relación de áreas = 0,527;  
Número de palas 4.

Propulsor CLT-02.

Diámetro (259,93 mm.), (4,45 metros para la hélice del buque);  
Relación paso/diámetro a 0,7R = 1,038;  
Relación de áreas = 0,451;  
Número de palas 4.

Propulsor CLT-03.

Diámetro (191,61 mm.), (5,25 metros para la hélice del buque);  
Relación paso/diámetro a 0,7R = 0,746;  
Relación de áreas = 0,490;  
Número de palas 4.

Propulsor CLT-04.

Diámetro (243,18 mm.), (4,368 metros para la hélice del buque);  
Relación paso/diámetro a 0,7R = 1,108;  
Relación de áreas = 0,520;  
Número de palas 4.

### 3. ENSAYOS REALIZADOS.

Por razones de confidencialidad los resultados de las amplitudes de los pulsos de presión son valores relativos, en ningún caso son valores absolutos, y están referidos, en cada ensayo, al pulso de mayor amplitud. Por las mismas razones no se han incorporado diagramas de observación de la cavitación.

En los buques A, B y C se ha estudiado la influencia que tiene la distancia vertical de la punta de la pala a la bovedilla del codaste en las fluctuaciones de presión para lo que se han utilizado hélices convencionales y hélices CLT.

El análisis de la influencia de la clara se ha realizado para la situación de navegación de cada buque, con los fenómenos de cavitación desarrollados sobre las palas de las hélices y en ausencia de cavitación, es decir, para un índice de cavitación inferior al del inicio de la cavitación, inceptión.

En este trabajo se presentan también los resultados de las amplitudes de los pulsos de la presión inducida por la cavitación, considerando dos buques ensayados a distintas potencias. Se comparan los valores relativos de las amplitudes de los tres primeros armónicos para los buques D y E.

Para poder desarrollar los trabajos en el túnel de cavitación ha sido preciso llevar a cabo unos ensayos previos en el canal de aguas tranquilas, con objeto de conocer las características del propulsor aislado, campo de velocidades en el disco de la hélice y se analizaron los correspondientes ensayos de autopropulsión para poder definir la condición de navegación de cada buque.

Para la simulación de la estela nominal se ha preparado en cada caso la correspondiente malla metálica que reproduce el campo de la distribución de velocidades para el calado considerado.

Definida una condición de navegación, se calcularon los valores de los parámetros que gobiernan los ensayos de fluctuaciones de presión, procediéndose a la medición de la intensidad de los pulsos de presión.

En los ensayos llevados a cabo a diferentes distancias de la placa "sin cavitación" el índice de cavitación no se igualó al del buque realizándose los ensayos a presión atmosférica.

$$\sigma_n = \frac{P_o - P_v}{\frac{1}{2} \rho n^2 D^2}$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$$

$$K_{P_k} = \frac{P_k}{\rho n^2 D^2}$$

siendo,

- $P_0$  presión estática en la estación  $0.7R$  por encima del eje del propulsor,
- $P_v$  presión de vapor,
- $\rho$  densidad del líquido,
- $n$  frecuencia de giro de la hélice,
- $D$  diámetro de la hélice,
- $T$  empuje del propulsor,
- $P_k$  amplitud de presión del armónico de orden  $k$ .

En una primera fase, para la medición de los pulsos de presión, se situaron 6 captadores de presión en una placa plana colocada a una distancia que es la correspondiente a la clara vertical del buque para los siete propulsores ensayados. La separación entre los captadores de presión instalados en la placa se mantuvo constante en todos los ensayos realizados, quedando separados 40 mm en la dirección proa-popa y también 40 mm en la dirección babor-estribor, según se muestra en la figura 1.

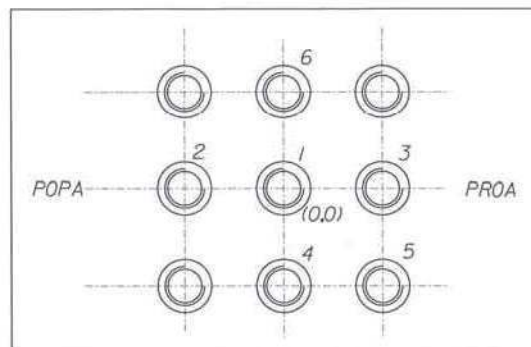


Figura 1. Situación de los 6 captadores. Buques A, B y C.

Posteriormente para analizar la influencia de la clara vertical, se realizaron diversas medidas de pulsos de presión variando la clara desde la punta de la pala hasta la placa. Mediante un equipo que lleva incorporado un analizador de espectros, se obtuvieron los pulsos de presión correspondientes a cada captador.

Se realizaron ensayos eliminando la cavitación, para el mismo  $K_T$  y a presión atmosférica. De este modo se ha analizado la influencia de la separación de la placa con cavitación y sin ella con distintas hélices convencionales y CLT's.

### 3.1 Ensayos realizados con diferentes claras "sin cavitación".

Las amplitudes de los pulsos de presión se pueden dividir en dos partes, la amplitud correspondiente a la hélice sin cavitación,  $K_{pa_0}$ , es decir, cuando el ensayo se realiza con un índice de cavitación inferior al índice de inyección, y la amplitud correspondiente al efecto de la cavitación,  $K_{pa_c}$ .

Aunque en todas las condiciones de navegación se han producido fenómenos de cavitación, es decir el índice de cavitación ha resultado ser superior al índice de inyección, se ha considerado importante analizar lo que ocurre con el mismo  $K_T$  pero "sin cavitación" debido a que en estas condiciones la influencia de la separación entre la hélice y casco es muy importante en la variación de  $K_{pa_0}$ , al influir en menor medida otros parámetros como son la estela y la distribución de la carga en las palas.

Los resultados de los ensayos con la hélice CONV-01, correspondiente al buque A, se muestran en la figura 2 y en la tabla 1. La intensidad de los pulsos de presión, representados mediante barras, son valores relativos e indican porcentajes referidos al valor de la amplitud más alta en ordenadas.

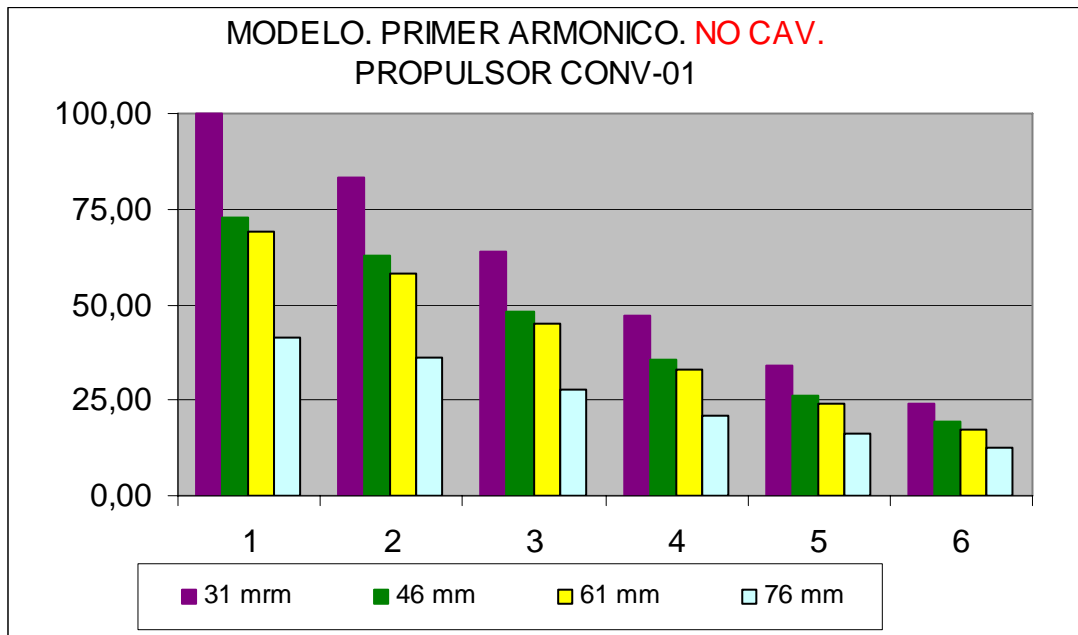


Figura 2. Pulsos de presión.

							MEDIA	INVERSA
A31/A46	1,375	1,323	1,334	1,333	1,312	1,240	1,320	0,76
A46/A61	1,053	1,082	1,070	1,068	1,067	1,133	1,079	0,93
A61/A76	1,679	1,620	1,609	1,580	1,507	1,382	1,563	0,64

Tabla 1.

Los resultados muestran la disminución, para cada uno de los seis captadores, de los pulsos de presión con el aumento de la clara. En la figura 2 se indica la magnitud de la clara en milímetros.

Para el captador 1, que se encuentra en la vertical que pasa por la punta de la pala a 0°, según se muestra en la figura 1, la separación de 31 mm resulta ser una relación clara/diámetro del 11,7%. Las restantes distancias corresponden al 17,4% del diámetro para la barra de color verde, la barra de color amarillo se encuentra al 23,0%, mientras que la de color azul, la posición más alejada, corresponde a un 28,7% del diámetro.

La primera línea de la tabla 1 corresponde en cada captador a la relación de la amplitud del pulso de presión medido con la menor clara con respecto a la amplitud del pulso de presión con la clara inmediatamente más alejada, por lo que la primera línea corresponde a la relación entre el pulso de presión granate y el verde. Con este criterio, la segunda línea corresponde a la relación entre el pulso de presión verde y amarillo y la tercera línea corresponde a la relación entre el pulso de presión amarillo y el azul.

En las siguientes gráficas, figura 3, figura 4, figura 5 y figura 6, se muestra la disminución de los pulsos de presión, para cada uno de los seis captadores, con el aumento de la clara. Los propulsores están indicados en las figuras.



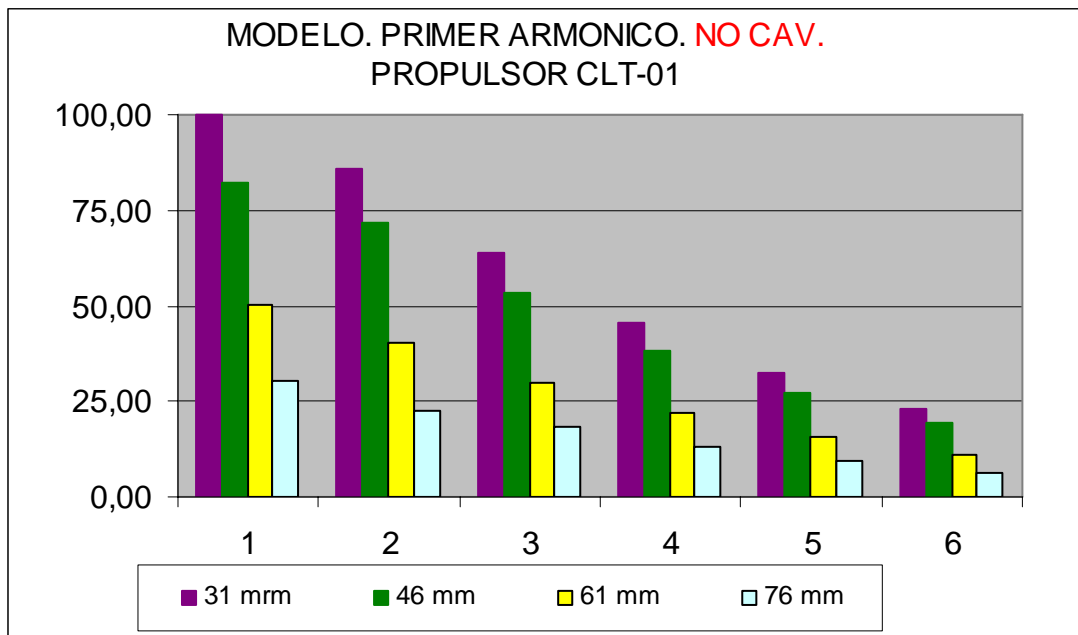


Figura 3. Pulsos de presión.

							MEDIA	INVERSA
A31/A46	1,215	1,203	1,198	1,193	1,192	1,197	1,199	0,83
A46/A61	1,645	1,779	1,771	1,762	1,746	1,719	1,737	0,58
A61/A76	1,657	1,775	1,636	1,649	1,670	1,805	1,699	0,59

Tabla 2.

En la figura 3 se indica la magnitud de la clara en milímetros, referido al captador 1. Las relaciones clara/diámetro resultan ser:

- 12,3% para la barra de color morado, clara de 31 mm.
- 18,2% para la barra de color verde, clara de 46 mm.
- 24,2% para la barra de color amarillo, clara de 61 mm.
- 30,1% para la barra de color azul, la posición más alejada, clara de 76 mm.

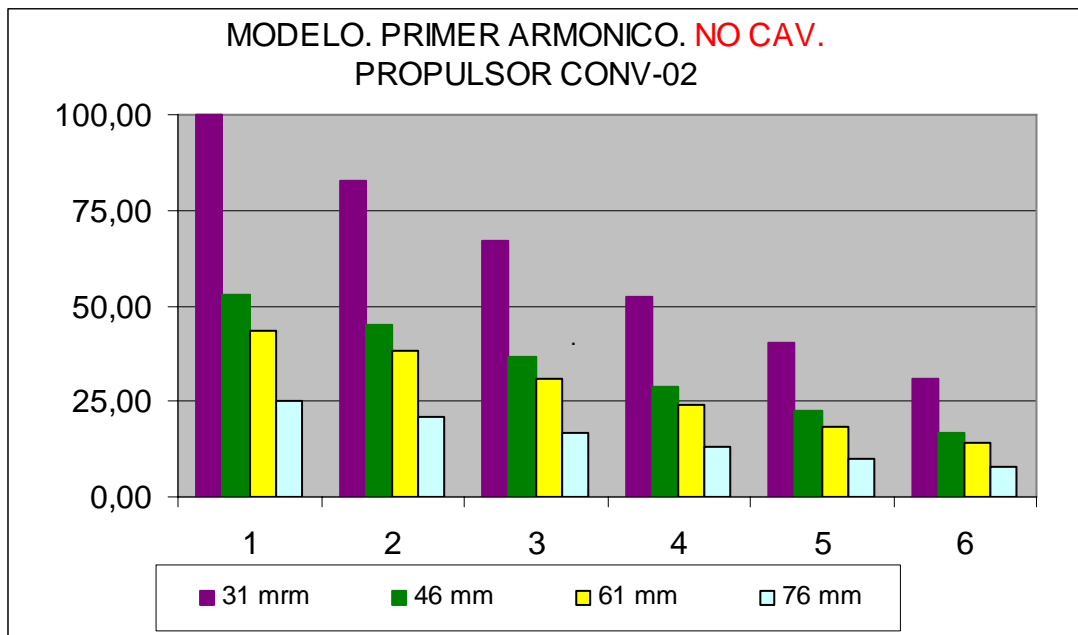


Figura 4. Pulsos de presión.

							MEDIA	INVERSA
A31/A46	1,892	1,830	1,831	1,823	1,809	1,807	1,832	0,55
A46/A61	1,221	1,187	1,193	1,200	1,213	1,215	1,205	0,83
A61/A76	1,729	1,835	1,846	1,865	1,829	1,809	1,819	0,55

Tabla 3.

En la figura 4 se indica la magnitud de la clara en milímetros, referido al captador 1. Las relaciones clara/diámetro resultan ser:

- 11,9% para la barra de color morado, clara de 31 mm.
- 17,7% para la barra de color verde, clara de 46 mm.
- 23,5% para la barra de color amarillo, clara de 61 mm.
- 29,2% para la barra de color azul, la posición más alejada, clara de 76 mm.

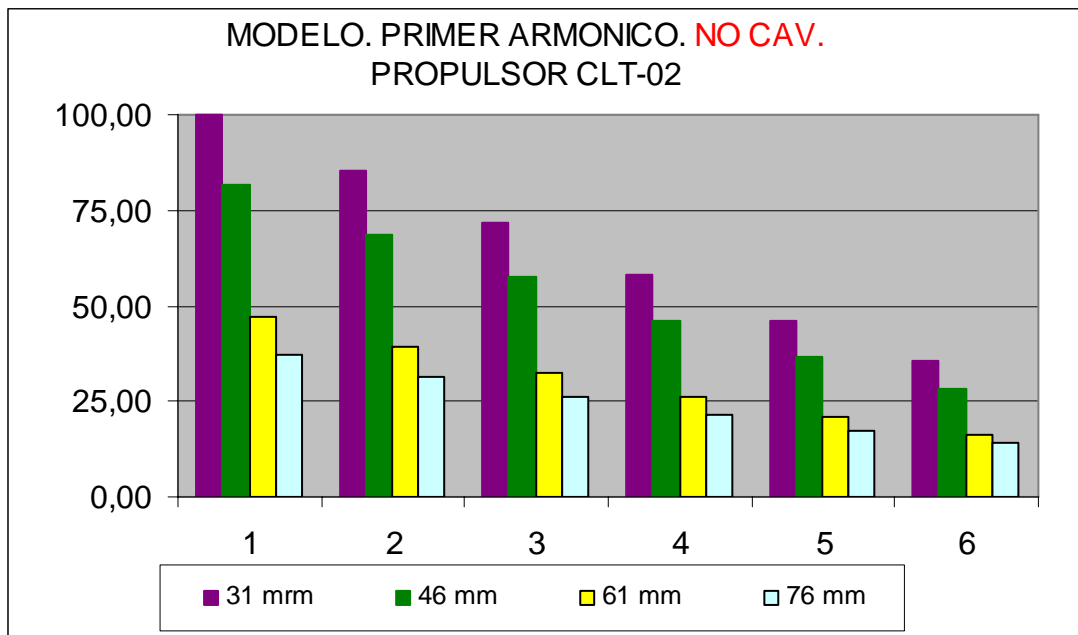


Figura 5. Pulsos de presión.

							MEDIA	INVERSA
A31/A46	1,223	1,241	1,247	1,258	1,267	1,260	1,249	0,80
A46/A61	1,744	1,754	1,762	1,764	1,755	1,738	1,753	0,57
A61/A76	1,264	1,255	1,245	1,226	1,197	1,158	1,224	0,82

Tabla 4.

En la figura 5 se indica la magnitud de la clara en milímetros, referido al captador 1. Las relaciones clara/diámetro resultan ser:

- 11,9% para la barra de color morado, clara de 31 mm.
- 17,7% para la barra de color verde, clara de 46 mm.
- 23,5% para la barra de color amarillo, clara de 61 mm.
- 29,2% para la barra de color azul, la posición más alejada, clara de 76 mm.

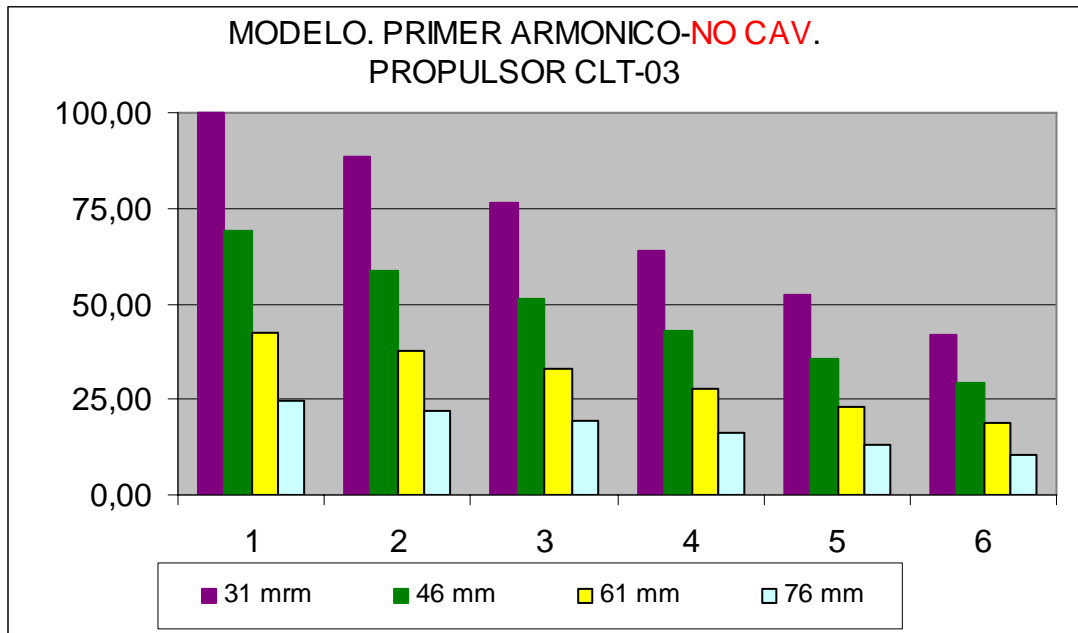


Figura 6. Pulsos de presión.

							MEDIA	INVERSA
A31/A46	1,449	1,509	1,499	1,487	1,471	1,448	1,477	0,68
A46/A61	1,619	1,557	1,547	1,559	1,556	1,554	1,565	0,64
A61/A76	1,718	1,700	1,722	1,713	1,724	1,779	1,726	0,58

Tabla 5.

En la figura 6 se indica la magnitud de la clara en milímetros, referido al captador 1. Las relaciones clara/diámetro resultan ser:

- 16,2% para la barra de color morado, clara de 31 mm.
- 24,0% para la barra de color verde, clara de 46 mm.
- 31,8% para la barra de color amarillo, clara de 61 mm.
- 39,7% para la barra de color azul, la posición más alejada, clara de 76 mm.

### 3.2 Ensayos realizados con diferentes claras en las situaciones reales del buque.

Se utilizaron los mismos captadores y la misma disposición en la placa que en los ensayos del punto 3.1, situados según puede observarse en la figura 1.

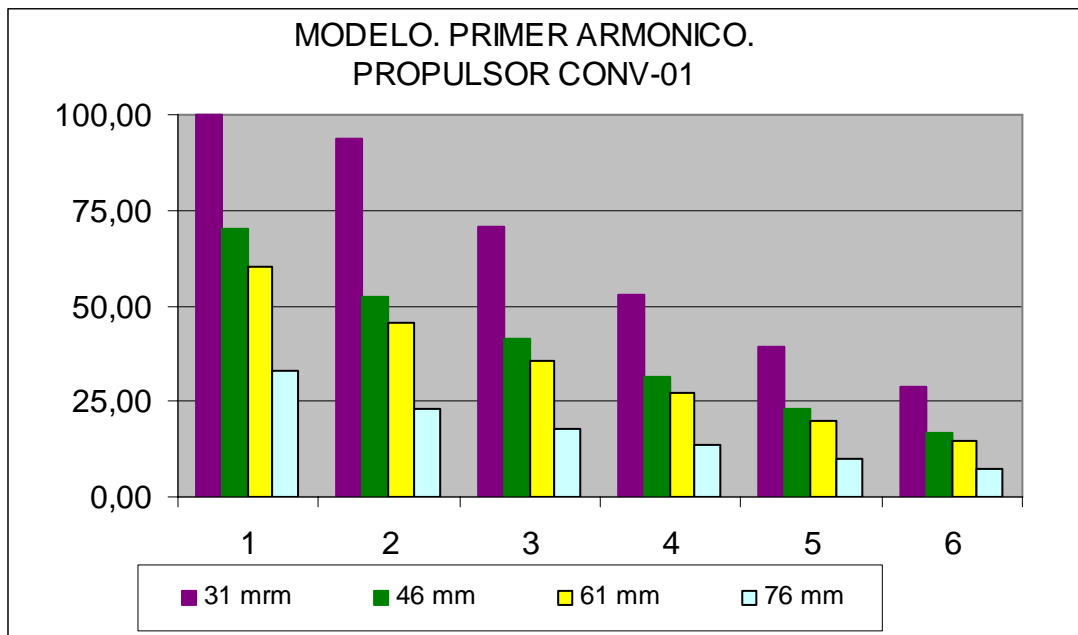


Figura 7. Pulsos de presión.

							MEDIA	INVERSA
A31/A46	1,430	1,784	1,714	1,701	1,697	1,698	1,671	0,60
A46/A61	1,162	1,149	1,151	1,150	1,148	1,157	1,153	0,87
A61/A76	1,812	1,974	1,983	1,987	1,980	1,998	1,955	0,51

Tabla 6.

Los resultados de los ensayos con la hélice CONV-01 se muestran en las figura 7 y en la tabla 6. Al igual que en los casos anteriores se representan valores relativos a la amplitud del pulso más alto. El hecho de mostrar valores relativos, por criterios de confidencialidad, no proporciona una idea de la amplificación que se produce en las amplitudes de los pulsos cuando aparece cavitación. Las amplitudes de los armónicos no cavitando  $K_{pa0}$  y cavitando  $K_{pac}$  están relacionadas por una fórmula del tipo:

$$K_{pac} = K_{pa0} (\sigma_{incep}/\sigma)^n.$$

Siendo  $\sigma_{incep}$  el índice de cavitación en el momento de la inyección, mientras  $\sigma$  es el índice de cavitación que se ha calculado para la condición de navegación del buque.

El exponente "n" depende de varios parámetros, entre los que destaca la distribución de la estela en la parte alta del disco de la hélice.

La relación entre ambos índices de cavitación,  $\sigma_{incep}/\sigma$ , es indicativa del desarrollo de los fenómenos de cavitación.

Las siguientes gráficas, figura 8 y la tabla 7, figura 9 y la tabla 8, figura 10 y la tabla 9 y figura 11 y la tabla 10, muestran los resultados obtenidos con las restantes hélices. Puede observarse la tendencia de las amplitudes de los pulsos a disminuir al aumentar la distancia a la placa.

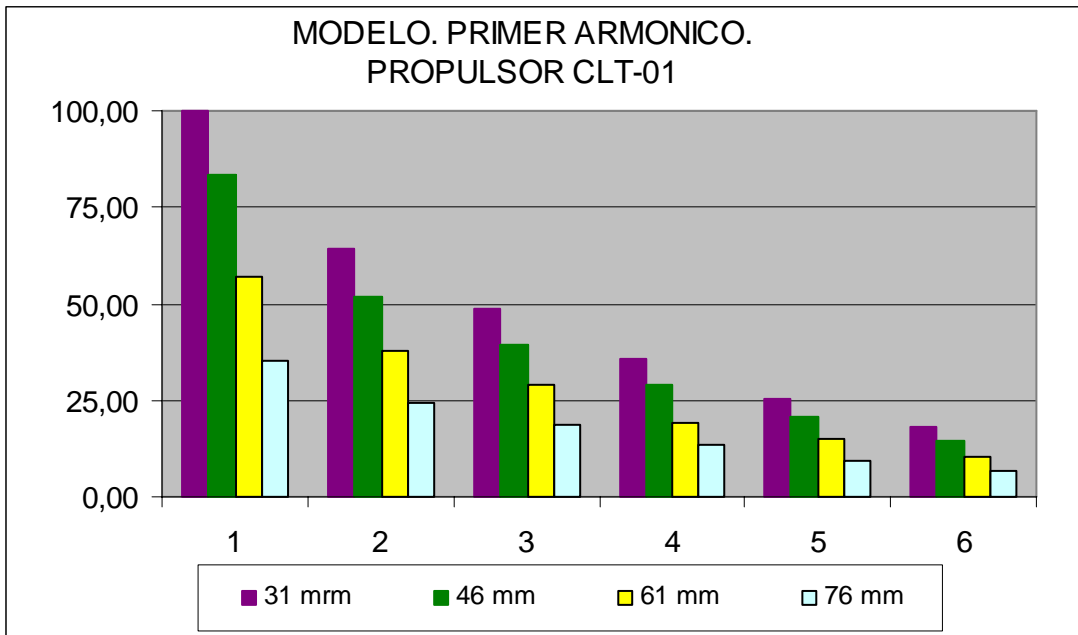


Figura 8. Pulsos de presión.

							MEDIA	INVERSA
A31/A46	1,200	1,240	1,234	1,233	1,237	1,253	1,233	0,81
A46/A61	1,456	1,365	1,376	1,497	1,384	1,385	1,411	0,71
A61/A76	1,626	1,546	1,556	1,441	1,563	1,552	1,547	0,65

Tabla 7.

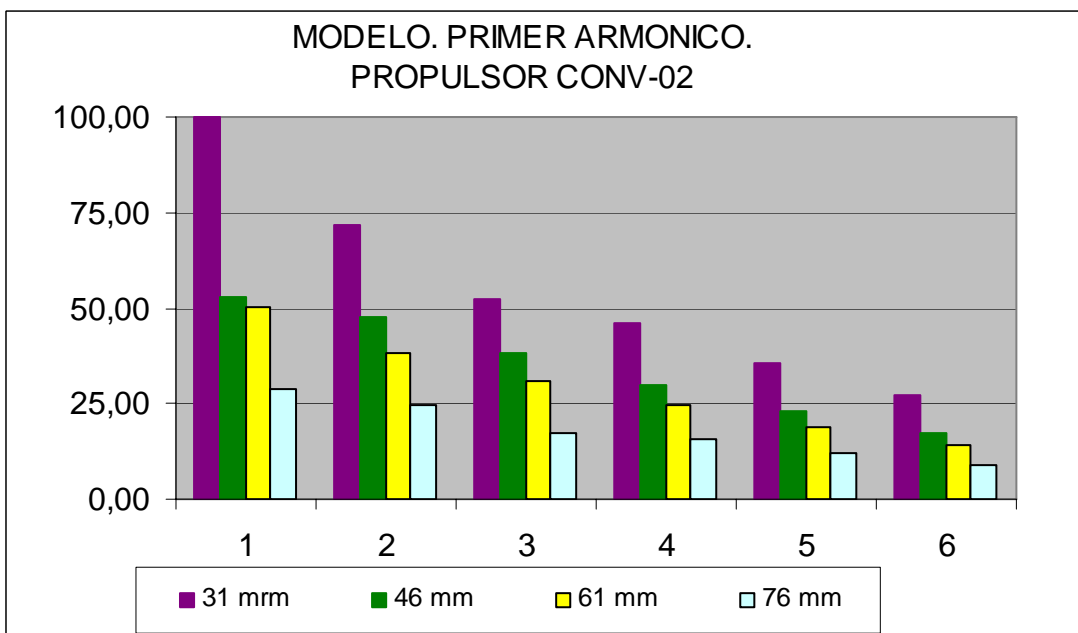


Figura 9. Pulsos de presión.

							MEDIA	INVERSO
A31/A46	1,886	1,509	1,369	1,543	1,544	1,541	1,566	0,64
A46/A61	1,054	1,247	1,236	1,232	1,235	1,246	1,208	0,83
A61/A76	1,750	1,540	1,810	1,561	1,557	1,541	1,626	0,61

Tabla 8.

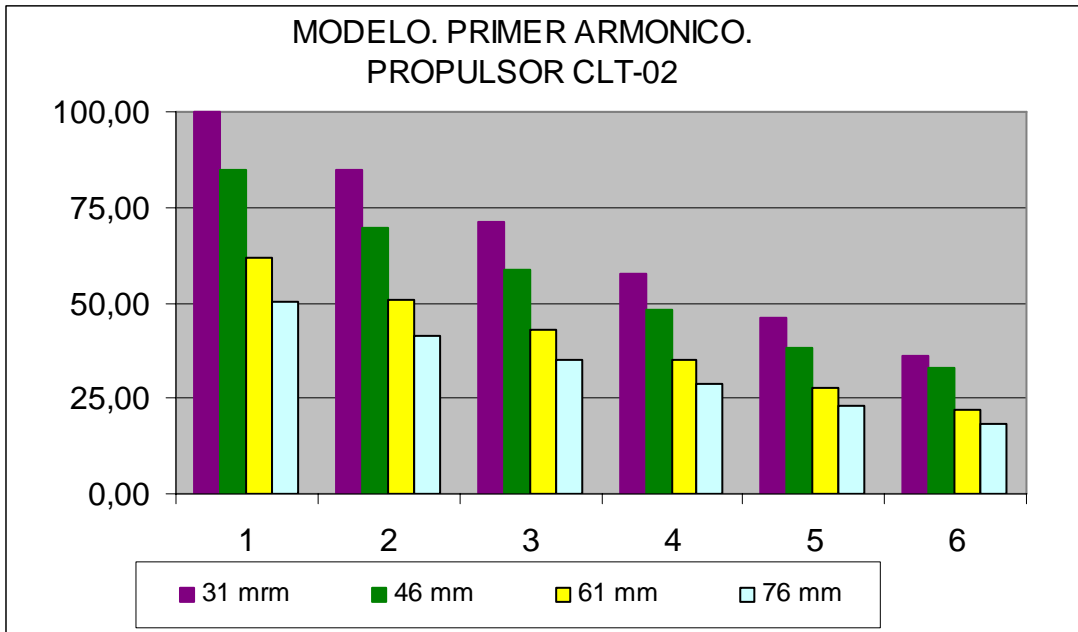


Figura 10. Pulsos de presión.

						MEDIA	INVERSA	
A31/A46	1,178	1,218	1,211	1,203	1,196	1,096	1,184	0,84
A46/A61	1,374	1,368	1,371	1,375	1,381	1,491	1,393	0,72
A61/A76	1,230	1,221	1,222	1,221	1,214	1,212	1,220	0,82

Tabla 9.

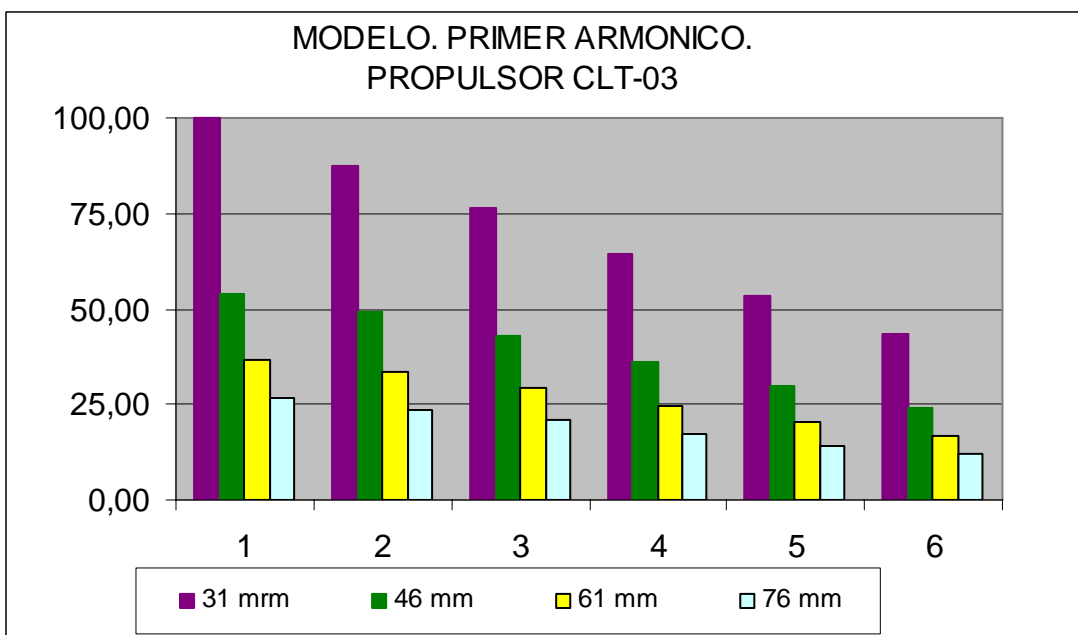


Figura 11. Pulsos de presión.

							MEDIA	INVERSA
A31/A46	1,853	1,772	1,777	1,783	1,786	1,784	1,793	0,56
A46/A61	1,463	1,474	1,471	1,465	1,461	1,459	1,466	0,68
A61/A76	1,389	1,415	1,412	1,428	1,425	1,397	1,411	0,71

Tabla 10.

### 3.3 Influencia de la potencia.

Existe una base de datos en el CEHIPAR de buques que se han ensayado en diferentes condiciones de potencia para el mismo calado. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos en dos buques. Buque "D" y buque "E".

En las figura 12 puede verse la disposición de los captadores de presión en el buque D. Se situaron nueve captadores distribuidos según las coordenadas en milímetros que se indican en la gráfica, a escala de modelo.



Figura 12. Situación de los 9 captadores. Buque D.

Las medidas, relativas al pulso de mayor amplitud de cada armónico, corresponden a los tres primeros armónicos a distintas potencias; 100%BHP, 90%BHP y 80% BHP.



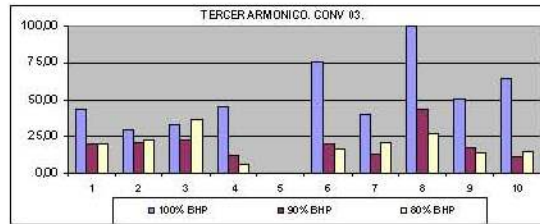
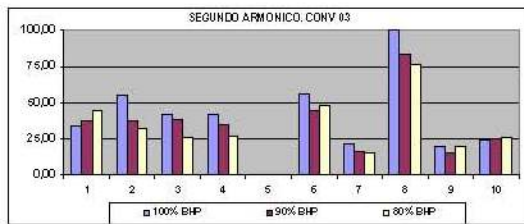
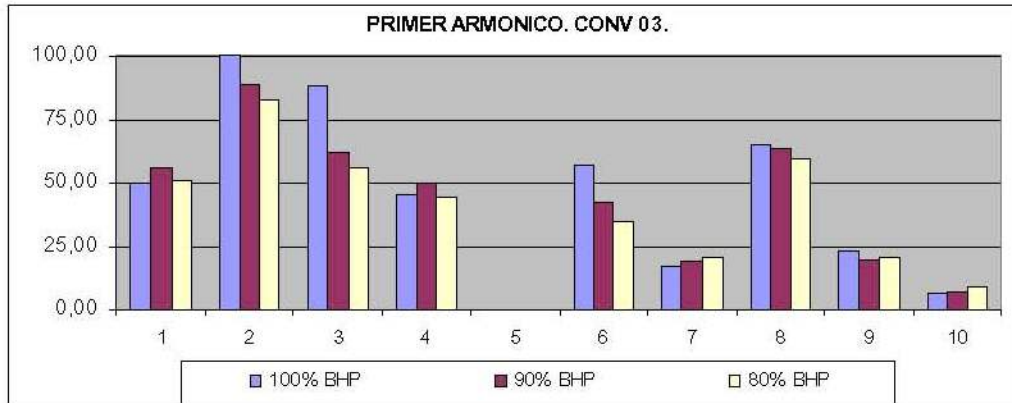


Figura 13. Pulsos de presión con hélice CONV-03. Buque D.

La figura 14 corresponde a la disposición de los 11 captadores utilizados en el buque E.

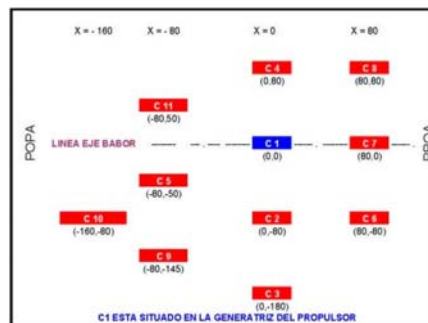


Figura 14. Situación de los 11 captadores. Buque E.

Las condiciones de ensayo corresponden al 100%BHP, 85%BHP y los resultados de los pulsos de presión se presentan en la figura 15.

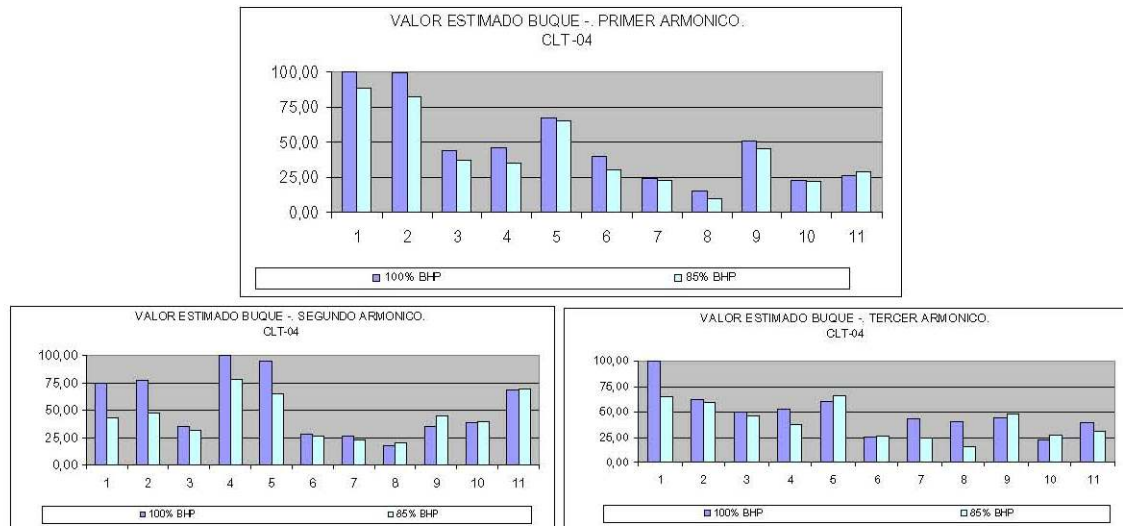


Figura 15. Pulsos de presión con hélice CLT-04. Buque E.

Se ha comprobado que las amplitudes de los pulsos de presión en los tres primeros armónicos aumentan con la potencia.

#### 4. CONSIDERACIONES FINALES.

De lo expuesto en los apartados anteriores se pueden señalar las siguientes consideraciones a modo de conclusiones:

- Se ha estudiado la influencia de la separación entre hélice y casco en los pulsos de presión en cinco propulsores correspondientes a tres buques. En las situaciones "hélice cavitando" en la condición de navegación y "hélice no cavitando". Pudo observarse la gran influencia que tiene la clara en la amplitud de los pulsos de presión.
- En todos los ensayos se observó una disminución significativa de las amplitudes de los pulsos de presión al aumentar la clara.
- La disminución de la amplitud de los pulsos de presión es muy similar en todos los captadores.
- Se han presentado los resultados de los pulsos de presión de los tres primeros armónicos para el mismo calado y a diferentes potencias de dos buques, uno de ellos con hélice convencional y el segundo con hélice CLT. Pudo comprobarse la disminución de las amplitudes de los pulsos al disminuir la potencia de los buques.
- En el futuro el CEHIPAR irá aumentando su base de datos, ampliará el estudio a otros parámetros que influyen en las fluctuaciones de presión y a otros tipos de propulsión.

#### AGRADECIMIENTOS.

Todo trabajo de investigación es fruto de un equipo humano, en este caso se debe reconocer el trabajo y el esfuerzo de Luis Pangusión, José Luis García Fontcuberta y Carlos Pedraza.