

ANÁLISIS PRÁCTICO DE ALINEACIÓN DE LARGAS LINEAS DE EJES DEL SISTEMA PROPULSIVO DE BUQUES

Ricardo A Lugo Villalba. Jefe Departamento Maquinaria Naval y Propulsión. COTECMAR, rlugo@cotecmar.com

Germán Méndez Algarra. Analista Departamento de Estructuras y Materiales. COTECMAR gmendez@cotecmar.com

Catherine Ramírez Villalba. Departamento de ingeniería mecánica y mecatrónica. Universidad Nacional de Colombia. lcramirezv@unal.edu.co

RESUMEN

Este artículo presenta una metodología de alineación de sistemas de propulsión por medio de un ejercicio aplicado en un buque. En primera lugar, se muestra un análisis del trabajo elaborado con anterioridad a este y se realiza una breve revisión bibliográfica referida al estado del arte en la temática relacionada con alineación de ejes en buques. Posteriormente, tomando como base normas, guías y apartes teóricos, se realiza la selección de una serie de criterios que definen los límites del modelo de alineación. Como parte del trabajo se desarrollo un programa en el software Model Center como una herramienta preliminar para el cálculo de la alineación, este programa por medio de parámetros generales establecidos y tomando en cuenta los criterios de alineación seleccionados, obtiene la posición en Y, que procura el funcionamiento óptimo del sistema de propulsión, para los cojinetes al interior del buque.

ABSTRACT

This article presents a methodology for alignment of propulsion systems through an exercise implemented on a ship. At first, it shows an analysis of the work made before and a brief review of the actual state in the theme related with shaft alignment on ships. Then, based on standards, guides and theoretical sections, were selected a set of design criteria defining the standard alignment limits. As part of the work a program was developed in Model Center software as a tool to calculate preliminary alignment, this program through set parameters, and taking into account the alignment criteria selected, get the position at Y, which seeks the optimal propulsion system operation the for the bearings inside the vessel.

Introducción

El diseño de la alineación para el sistema de propulsión es como todos los procesos de diseño, el resultado de un proceso iterativo, debido al gran número de parámetros de diseño que son dependientes. Por ejemplo, durante la operación ocurren cambios en la carga de los cojinetes debido a la expansión térmica y desgaste de estos cojinetes externos e internos lubricados por agua, que deben estudiarse con la finalidad de dimensionar y seleccionar los cojinetes que satisfagan la sollicitación a las diferentes condiciones de operación. En este diseño preliminar, se considera satisfactoria la alineación cuando es posible controlar el desplazamiento vertical y cargas en los cojinetes, y esfuerzos por flexión y por fuerzas cortantes en los ejes. El ángulo de alineación de los diferentes cojinetes, la alineación del engranaje principal y la deflexión en el cigüeñal, aunque son parámetros importantes durante la alineación, no son objetivo de este trabajo dado que son definidos de manera previa en la fase de diseño del sistema propulsor. Por otro lado, el efecto global sobre la posición de los cojinetes por flexión del casco a diferentes cargas se deja para un análisis posterior. El proceso inicia con la configuración del modelo de diseño, posteriormente se selecciona una metodología de alineación y se determinan una serie de criterios de diseño, y finalmente se procede al cálculo. Lo más importante en el diseño es el análisis particular en cada fase del proceso y en cada iteración.

Metodología de alineación del sistema de propulsión – Alineación Racional Usando Coeficientes de Influencia

El procedimiento de alineación adoptado es el denominado como Curva Favorable (Faircurve), que consiste en encontrar la posición adecuada de los cojinetes para concordar con la flexión natural del eje, produciendo las mínimas cargas sobre los mismos y los mínimos esfuerzos por flexión del eje. En este proceso los cojinetes se ubican a lo largo de una curva estática de deflexión del eje que anticipa expansión por la operación en caliente, desgastes por operación y asegura una mejor área de contacto para los mismos. Con respecto a una posición base, en línea recta, los cojinetes del reductor y cojinetes bronce-caucho descienden y se define un ángulo de inclinación para los cojinetes del túnel. Dado que la suma de todas las reacciones debe ser igual al peso total del sistema y que la carga en un cojinete implica descarga de sus vecinos, la matriz de coeficientes de influencia es simétrica, los signos de los coeficientes de influencia se alternan y la suma de los mismos, debidos al cambio de posición en un cojinete, debe ser igual a cero. Valores altos de los coeficientes de influencia indican que el sistema es rígido y susceptible a desalineación, por el contrario

valores bajos indican que el sistema es flexible y robusto, condición que se busca. En el cálculo las salidas importantes son:

- Reacciones en línea
- Curva de deflexión del eje
- Ángulo de rotación y desplazamiento del eje en puntos discretos
- Diagrama de momentos de flexión
- Diagrama de fuerzas cortantes sobre el eje
- Coeficientes de influencia

Criterios de Diseño

Tomados del **Marine Engineering**, los criterios generales objetivo del diseño son:

- No sobrecargar ningún cojinete
- No descargar ningún cojinete
- Cargas aproximadamente iguales para los cojinetes de la línea de ejes
- Cargas aproximadamente iguales para los cojinetes de la caja de reducción
- Debe considerarse operación en frío y en caliente del reductor
- Debe considerarse desgaste en los cojinetes y deflexiones del casco

En cargas de flexión

Las cargas que inducen esfuerzos de flexión en los ejes son resultado de la gravedad, choque, cargas de empuje descentradas y vibraciones de tipo axial. Las cargas soportadas en el exterior tienen mayor influencia debido a la alta concentración de peso de la hélice. La localización que se asume para la acción de las reacciones resultantes en los cojinetes es determinante en el cálculo de los momentos de flexión que actúan sobre el eje, pero la gran longitud de los cojinetes usados en la parte exterior para disminuir los esfuerzos por fuerzas cortantes, complica la precisión con la que se localiza. Un criterio aceptable es asumir la reacción ocurre en el centro de todos los cojinetes excepto en el cojinete continuo a la hélice. Debido al gran peso de la hélice, el eje de hélice tiene una inclinación importante en este cojinete, por lo que la reacción resultante tiende a actuar en la parte posterior del cojinete, la más cercana a la hélice. La reacción resultante se asume normalmente a un tercio de la longitud del cojinete o un diámetro medido desde la parte posterior del cojinete. Existen una serie de fenómenos que influyen en los momentos de flexión del eje de hélice, como excentricidad, profundidad, condiciones de mar y maniobras del buque. Para evaluar el efecto

de estos fenómenos se puede incrementar la magnitud de los momentos de flexión presentes en el eje de hélice en un factor estadístico que es función de la carga y operación del buque, la condición del mar y la profundidad del agua, y se presenta a continuación:

Load	Sea Condition	Operation	Water Depth	Factor
Heavy	calm	ahead	deep	1
Heavy	calm	maneuvering	deep	2
Heavy	calm	crash back	deep	3
Light	calm	ahead	deep	1 1/8
Light	calm	maneuvering	deep	2 1/4
Light	calm	crash back	deep	3 3/8
Heavy	stormy	ahead	deep	2 1/3
Light	stormy	ahead	deep	2 2/3
Heavy	calm	ahead	shoal	1 1/2
Light	calm	ahead	shoal	1 3/4

Tabla1: factor de incremento del momento de flexión

En ubicación de los cojinetes

Para encontrar la posición óptima de los cojinetes se analiza el conjunto de ejes como una viga continua y en general se tienen en cuenta los siguientes factores:

- Estructura y arreglos del buque
- Igualdad en las reacciones de los cojinetes
- Flexibilidad del eje
- Frecuencias naturales de las vibraciones laterales

En la fase de diseño se definen el número y posición aproximada de los cojinetes, mientras que en el proceso de alineación del sistema de propulsión se encuentra el punto efectivo de soporte de cada cojinete y se determina la posición en Z (y posible en Y) óptima para cada cojinete, que resulta en una distribución de carga adecuada sobre los todos los cojinetes soporte del sistema. Se debe tener particular cuidado en la selección y posicionamiento de los cojinetes de popa y proa del tubo de bocina para asegurar que se cuenta con la flexibilidad adecuada en el eje. Estos cojinetes están sujetos a la variación de la alineación durante

servicio. Las condiciones críticas de servicio principales son operación en frío-caliente, desgaste en los cojinetes lubricados por agua y desalineación en general. El desgaste de los cojinetes lubricados por agua altera las cargas en todos los cojinetes del conjunto, por lo que la solicitación de cada cojinete debe ser analizada para los diferentes casos de desgaste presentes durante la operación, esto con el fin de asegurar una alineación correcta para el buen funcionamiento del conjunto. Es importante cuidar que no se descargue o sobrecargue ningún cojinete durante la operación del buque.

Algunos criterios específicos considerados son:

Cuando el sistema de propulsión va de condición en frío a condición de operación (en caliente) los cojinetes de la caja de reducción usualmente ascienden en un rango de 15 a 30 milésimas de pulgada respecto a la alineación en línea recta inicial. Particularmente las cargas en el cojinete de proa decrecen mientras las cargas sobre el cojinete de popa se incrementan, causando que el engranaje asuma una posición inclinada con respecto al piñón. Normalmente el fabricante establece la máxima diferencia entre las reacciones de los cojinetes. El punto de acción de las reacciones se asume en el centro de todos los cojinetes excepto en el cojinete continuo a la hélice, donde se asume a un tercio de la longitud del cojinete medido desde la parte posterior del cojinete. 0.8 mm ascenso en el cojinete de popa de la caja de reducción por condición en caliente De igual manera se abstraigo de la guía de **ABS**, que se deben realizar los cálculos para el máximo permitido de las tolerancias de alineación para demostrar que:

- Las cargas en los cojinetes están dentro de los límites especificados por el fabricante para todas las condiciones de funcionamiento.
- Las reacciones en los cojinetes son siempre positivas (es decir, soportando el eje).
- Fuerzas cortantes y momentos de flexión en el eje están dentro de límites aceptables, en relación con otras tensiones en el eje.
- Fuerzas y momentos sobre los equipos de propulsión están dentro de los límites especificados por el fabricante de la maquinaria .

Algunos criterios tomados del libro Proyecto del Sistema Propulsor, de la **ESPOL** son:

- La presión P_{max} permisible para los cojinetes caucho-bronce es igual 275 MPa y 687 MPa para cojinetes Magnolia-acero.
- Los claros utilizados en los cojinetes para la formación de la película de lubricación son de 0.003in para cojinetes internos de acero y 0.164in para cojinetes lubricados por agua.

Diagrama y descripción del sistema de propulsión

El sistema de transmisión de potencia consta de dos líneas de ejes, cada una con 4 ejes acoplados a una caja de reducción con la siguiente disposición: El eje de la hélice lleva en su extremo posterior la hélice de paso variable. El acoplamiento de popa une el eje de la hélice con el eje del tubo de la bocina. El eje del tubo de la bocina está dispuesto en la zona del tubo de la bocina. Por el lado de la popa va acoplado al eje de la hélice, y por el lado de proa va acoplado al eje de transmisión 1. El acoplamiento de proa une el eje del tubo de la bocina con el eje de transmisión 1. El eje de transmisión 2 va unido al eje de transmisión 1 y al reductor principal, mediante acoplamientos de brida.

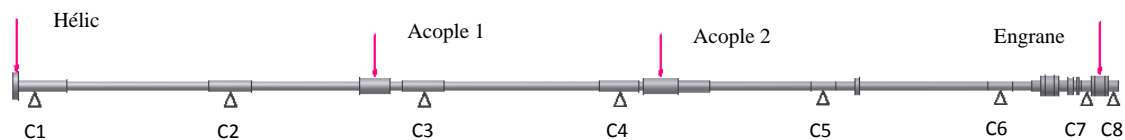


Fig. 1. Diagrama modelo de alineación

De un análisis de peso del modelo realizado con anterioridad en Inventor se comprobó que la configuración discriminada de pesos del modelo, que incluye desde la hélice hasta la caja de reducción, es la siguiente:

Designación	Masa [kg]
hélice	4145
eje de hélice	6563
acople	1145
eje de bocina	4814
acople	1098
eje intermedio	2688
eje salida	2577
eje engrane	2000
engrane	4200
Total	29230

Tabla2: Designación de pesos

Es importante resaltar que las masas del eje del engrane y del engrane fueron calculadas a partir planos de operación, por tanto son aproximadas y tendrán que evaluarse posibles cambios en la alineación si posteriormente se verifican cambios en las mismas.

Dado que este trabajo inicia sobre un buque construido, la disposición de los cojinetes en número y posición se encuentran definida, solo se tiene acceso al cambio de posición en X de los cojinetes C5 y C6. El estudio de la alineación se basa en el modelo anteriormente descrito. El análisis incorpora la distribución de pesos de los ejes asumiendo que son iguales las secciones de área para el eje de hélice y el eje de bocina, los ejes de transmisión 1 y 2, y el eje del engrane principal de la caja de reducción, siendo sus inercias diametrales iguales a $I_{zz1}[m^4]$, $I_{zz2}[m^4]$ y $I_{zz3}[m^4]$, respectivamente. Cargas concentradas como son la hélice MH [kg], acoples MA1 [kg] y MA2 [kg] y el engranaje de la caja de reducción ME [kg]. La posición de los cojinetes de la siguiente manera:

Cojinete	X[m]
C1	1.13
C2	7.358
C3	13.558
C4	19.858
C5	26.658
C6	32.328
C7	35.088
C8	35.868

Tabla 3. Posición en X de los cojinetes

El efecto de la fuerza de flotación sobre los elementos sumergidos, hélice, eje de hélice, acople A1 y el eje de bocina, es considerado, dando como resultado la siguiente distribución de masas:

Designación	Masa [kg] Flotación
Hélice	3362
Eje de hélice	5717
Acople1	999

Eje de bocina	4171
Acople2	1098
Eje intermedio	2688
Eje salida	2577
Eje engrane	2000
Engrane	4188
Total	26800

Tabla 4. Designación masa modelo considerando F. flotación

El modulo de Young del acero se tomó como 2.07×10^{11} kg/m² y la razón de Poisson como 0.29.

Resultados y discusión

Como resultado de esta parte de la investigación se propone un programa desarrollado en software Model Center, éste permite la administración e interacción de diferentes programas, facilitando los procesos para el cálculo de la alineación y reduciendo tiempos de iteración por cambio en los parámetros. En este programa las variables de los módulos están relacionadas, las salidas de algunos módulos son entradas de otros. Las variables enlazadas se actualizan una vez se realizan cambios y se corren los módulos, éstas variables se representan por medio de un anillo.

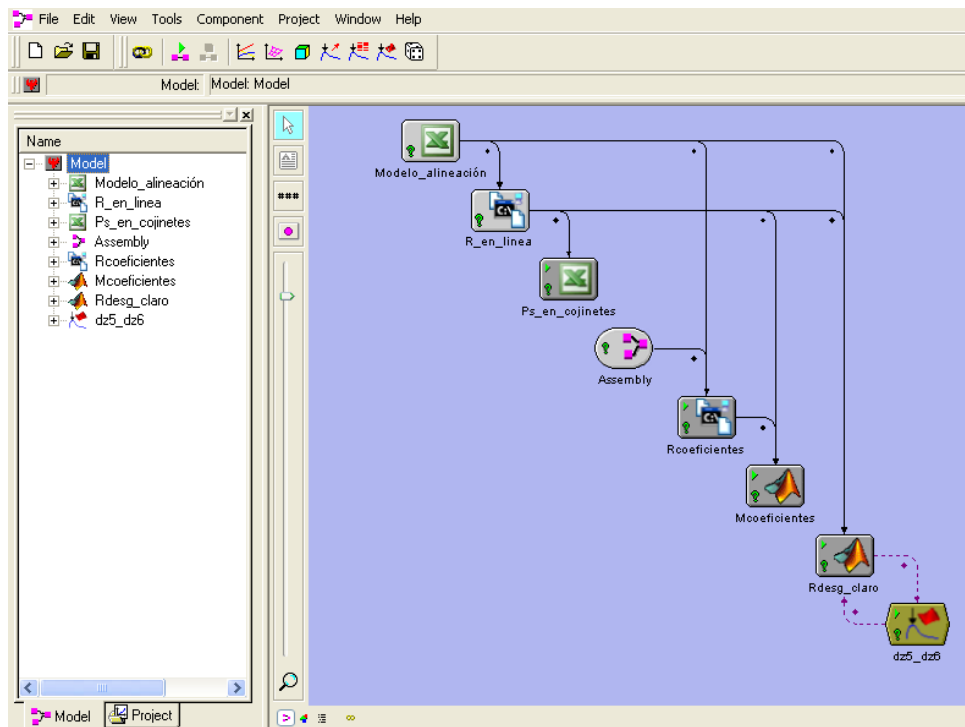


Fig. 2. Vista inicial del programa

R_en_linea	
nodo	2
desplaz	0
Area1	0.05925
Area2	0.05005
Area3	0.18198
Izz1	0.00055
Izz2	0.00035
Izz3	4.07859e-0...
Diam1	0.325
Diam2	0.29
Diam3	0.05369
PH	-32981.2
PA1	-9800.19
PA2	-10771.4
PE	-41084.3
reaccion_1	57100.7
reaccion_2	24546
reaccion_3	37107.4
reaccion_4	37479.1
reaccion_5	30399.3
reaccion_6	8726.3
reaccion_7	44333.5
reaccion_8	23100

Fig. 3. Ejemplo vista modulo reacciones en línea

La rutina en Model Center combina la acción de Excel, Ansys, Matlab y algunas funciones propias del software, con el objetivo de obtener la posición en Y para los cojinetes C5 y C6, tal que la posición de todos los cojinetes coincida con la flexión natural del eje distribuyendo de una manera adecuada las cargas en todos los cojinetes del sistema y produciendo esfuerzos mínimos en el eje. La rutina se compone de 8 módulos que se describen a continuación.

Modulo 1: Modelo de alineación

Este modulo es una hoja de Excel que calcula:

Pesos de hélice (PH), acople 1 (A1), acople 2 (A2) y engrane (E), que son cargas puntuales aplicadas. Áreas A1, A2 y A3 que corresponden al área del eje por sección necesaria para obtener el peso indicado como entrada del modelo, en forma distribuida a lo largo de los ejes. Estas áreas consideran que los ejes son huecos ya que esto cambia la capacidad del eje frente a la sollicitación. El diámetro exterior es una entrada de la hoja de cálculo y permanece invariable el diámetro interior por el contrario cambia según el peso requerido. Por sencillez en el modelo se asume que son iguales y constantes las secciones de área para el eje de hélice y el eje de bocina, los ejes de transmisión 1 y 2, y el eje del engrane principal de la caja de reducción. Inercias diametrales Izz1, Izz2 e Izz3, que son una relación directa de los diámetros interno y externo.

La reacción ideal es un valor supuesto que da una idea preliminar del valor que debería tener la reacción en cada cojinete, aproximado como un valor inferior al total del peso soportado

dividido por el número de cojinetes. En la siguiente imagen se enseñan los valores de entrada, que son los que aparecen en color verde y se pueden modificar en cualquier momento, y las salidas que se muestran en color negro.

Modulo 2: Cálculo de las reacciones en línea y coeficientes de influencia

En este modulo se calculan las reacciones en línea de los cojinetes. Inicialmente, se asume que todos los descansos se encuentran en una línea recta y posteriormente en otro modulo se incluye desplazamiento vertical para simular situaciones reales, como el desgaste. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

BEARING	RY [N]
C1	57089
C2	24616
C3	36833
C4	38288
C5	27208
C6	16402
C7	36381
C8	25975

Tabla 5. Reacciones en línea

En el cálculo con el sistema en línea se obtienen la curva de flexión del eje, rotaciones angulares del eje sobre los cojinetes, el diagrama de momento flector y de fuerza cortante y se calculan las presiones estáticas sobre los cojinetes. Obteniendo los siguientes resultados:

Curva de flexión del eje

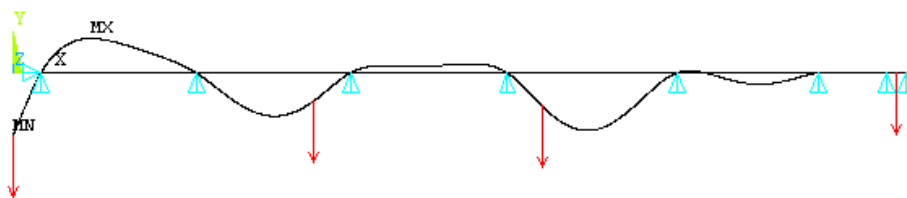


Fig.6. Curva de deflexión del eje; cojinetes en línea.

Según los resultados, el máximo desplazamiento MN tiene un valor de -0.632mm y se produce en la parte posterior de la línea de ejes donde se concentra la carga de la hélice.

Enseguida del cojinete y como reacción a la carga de la hélice se encuentra otro desplazamiento considerable MX con un valor de 0.344mm.

Desplazamientos de nodos principales y rotaciones angulares del eje sobre los cojinetes

NAME	UY [mm]	ROTZ [grados]
Hélice	-0.63127	6.24E-04
C1	0	4.28E-04
C2	0	-1.58E-04
	0.34236	2.01E-08
A1	-0.27685	1.82E-04
C3	0	1.35E-04
C4	0	-1.63E-04
A2	-0.2991	-2.50E-04
C5	0	9.28E-05
C6	0	3.68E-05
C7	0	-2.40E-06
Engrane	-3.6403	-1.06E-07
C8	0	2.82E-06

Tabla 6. Deformaciones y deflexión angular sobre nodos principales.

Diagrama de momento flector

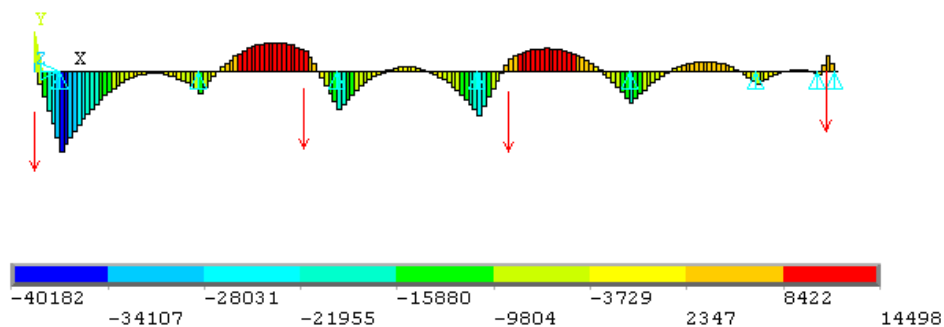


Fig. 7. Diagrama momento flector

El momento de flexión máximo se presenta en el eje de hélice con un valor de -40182 N*m, este momento se presenta debido a la alta flexión del eje en esta zona dado el cambio en

posición de los cojinetes por el efecto de la gran carga concentrada de la hélice. Debido a la carga concentrada de los acoples se generan también puntos críticos de curvatura.

Diagrama fuerza cortante

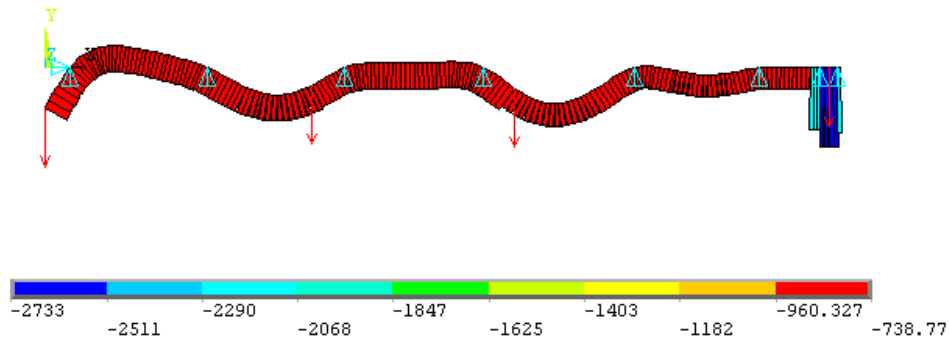


Fig. 8. Diagrama fuerza cortante

El eje de la caja de reducción tiene la más alta sollicitud por fuerzas cortantes, debido al gran peso del engrane, pero en general la línea de ejes está sometida a cargas cortantes similares con valores cercanos a 738.77 N

Diagrama de esfuerzo máximo (Esfuerzo directo + esfuerzo de flexión)

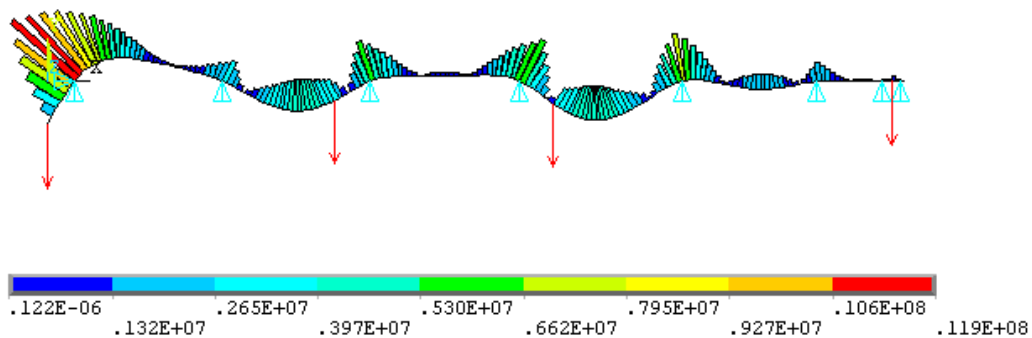


Fig. 9. Diagrama Esfuerzo máximo

El esfuerzo máximo se presenta en el eje de hélice con un valor de 119 MPa; si se considera el factor de incremento del momento de flexión igual a 2, entonces se puede aproximar la sollicitación real del eje como el doble del esfuerzo máximo 240 MPa. Este valor es inferior al valor permisible de 440MPa para el acero utilizado en los ejes de la línea de propulsión .

Modulo 3: Presión en cojinetes

Con los valores obtenidos de las reacciones, se calculan las presiones estáticas de los cojinetes, excepto los de la caja de reducción, con el objetivo de evaluar la adecuada selección del cojinete, frente a la sollicitación. Una vez obtenidos los valores de las presiones se comparan con los valores de referencia [7], que presenta Pmax con un valor permisible 687MPa para cojinetes metálicos y 275MPa para cojinetes bronce-caucho, lubricados con agua. Los valores permisibles están muy por encima de los valores de sollicitación calculados.

Ps_en_cojinetes	
reaccion_1	57089.2
reaccion_2	24615.6
reaccion_3	36833.4
reaccion_4	38288.2
reaccion_5	27207.7
reaccion_6	16402.2
pre1	89.20
pre2	40.49
pre3	61.23
pre4	63.98
pre5	119.33
pre6	71.9394

Fig. 10. Resultados Modulo presiones estáticas

Modulo 4, 5 y 6

Es de esperarse que ciertos cojinetes pierdan su posición inicial debido al desgaste, alterando las reacciones que se desarrollan sobre todos los cojinetes y dando lugar a la desalineación. Para calcular los coeficientes de influencia se utiliza el método de elementos finitos y por medio de un proceso iterativo se obtiene la matriz de coeficientes de influencia. En el programa se creó un ciclo que cambiara en 1mm la posición de cada descanso, este proceso se hace de uno en uno y de manera continuada se va llenando la matriz, que resulta ser simétrica, y con elementos de la diagonal principal positivos. Los signos de los elementos en cada fila aparecen alternados, lo que significa que al levantarse un cojinete absorbe más, produciendo una descarga de los soportes adyacentes.

	[N]	57089	24616	36833	38288	27208	16402	36381	25975
[m]	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	
C1	1	755	-1713	1200	-296	74	-39	47	-28
C2	1	-1713	4639	-4387	1788	-448	236	-282	167
C3	1	1200	-4387	6217	-4321	1765	-928	1112	-659
C4	1	-296	1788	-4321	5212	-3785	2741	-3284	1945

C5	1	74	-448	1765	-3785	5561	-8448	12953	-7673
C6	1	-39	236	-928	2741	-8448	37982	-109230	77686
C7	1	47	-282	1112	-3284	12953	-	386628	-287943
C8	1	-28	167	-659	1945	-7673	77686	-287943	216504

Tabla 7. Matriz de coeficientes de influencia. Reacciones en línea

Esta matriz puede ser utilizada para evaluar la sensibilidad de una línea de ejes a ciertos cambios verticales de descansos, desgastes por tiempo de uso, deflexión del casco o desviaciones térmicas.

Modulo 7 y 8

Modulo de optimización. Una vez se cuenta con la matriz de coeficientes de influencia, se evalúan situaciones reales presentes en los cojinetes de túnel, arbotantes y caja de reducción, durante la operación de la embarcación. En este caso se consideran claros y desgastes máximos permisibles, en especial se considera que los cojinetes de acero no sufren desgaste en comparación con los cojinetes lubricados por agua. Para este caso en particular los desgastes en los cojinetes se presentan con la siguiente configuración.

Cojinete	ΔY [mm]
C1	-1.657
C2	-1.357
C3	-0.657
C4	-1.857
C7	0.20
C8	0.20

Tabla 8. Cambio de posición en Z en los cojinetes por condiciones de operación

Para el proceso de optimización se implementa un algoritmo genético que por medio de dos variables minimiza las funciones objetivo, cuidando que ninguna reacción sea negativa en los cojinetes por medio d una restricción. Las variables de diseño son los desplazamientos en Z de los cojinetes C5 y C6, y las dos funciones objetivo que corresponden a tres criterios importantes de diseño planteados anteriormente.

Name	Value
design variable (dzC5) [mm]	-0.079
design variable (dzC6) [mm]	0.781
objective (fob: C5=C6)	24.6501429
objective (fob2: C7 = C8)	0
constraint (rfinal[1]>0) [N]	54948
constraint (rfinal[2]>0) [N]	29576
constraint (rfinal[3]>0) [N]	32830
constraint (rfinal[4]>0) [N]	40902
constraint (rfinal[5]>0) [N]	22553
constraint (rfinal[6]>0) [N]	24997
constraint (rfinal[7]>0) [N]	27243
constraint (rfinal[8]>0) [N]	29743

Tabla 9. Resultados Algoritmo Genético

Resultados: Modelo Final de Diseño

El modelo resultante del diseño de la alineación se presenta a continuación, en general las reacciones oscilan alrededor de 2200kg valor planteado como carga ideal sobre los cojinetes. Como se puede observar la distribución de las cargas mejora considerablemente con respecto a los criterios de diseño considerados. Por ejemplo los cojinetes intermedios tienen una sollicitación mayor lo que resulta positivo si se considera que su durabilidad y resistencia mecánica es mayor que la de los cojinetes bronce-caucho. Aún así, se presenta una ligera sobrecarga sobre el cojinete de proa del eje de bocina, que debe tenerse presente para la correcta lubricación del cojinete.

BEARING	Rinicial [kg]	Rfinal [kg]
C1: Arbotante popa	5819	5601
C2: Arbotante proa	2509	3015
C3: Bocina popa	3755	3347
C4: Bocina proa	3903	4169
C5: Intermedio popa	2773	2299

C6: Intermedio proa	1672	2548
C7: Caja reducción popa	3709	2777
C8: Caja reducción proa	2648	3032

Tabla 10. Reacciones finales de diseño

Conclusiones y Recomendaciones

Todo elemento presente en el sistema de propulsión se ve afectado por cualquier tipo de desalineación pero como se dijo en la introducción este es un trabajo de cálculo preliminar, para obtener resultados más seguros es necesario profundizar este estudio incluyendo los conceptos relacionados con la deflexión del casco, cojinetes del tubo de bocina, sellos, efecto de la inclinación tubo de bocina, entre otros que tienen una influencia demasiado importante en el diseño de la alineación. Durante el desarrollo de este trabajo fue importante conocer los criterios de cambio por desgaste permisible de los cojinetes, y se encontró que aunque se cuenta con algunos criterios dados por fabricantes, normas o casas clasificadoras, el criterio final está dado por una serie de condiciones más, como restricciones físicas en el buque, niveles de vibraciones y ruido requeridos para la condición de operación del buque, desbalanceo y exactitud en la alineación, errores en la lubricación, entre otros particulares. Por lo que es muy importante definir todas estas condiciones para conocer los desplazamientos reales por desgaste presentes en los cojinetes lubricados por agua. La deflexión del casco es, sin duda, una condición determinante en la posición de los cojinetes durante la operación, de manera que conocer las condiciones de carga y calado y las deflexiones correspondientes para las diferentes condiciones de operación es necesario para definir el comportamiento de del sistema de propulsión. Se ha dicho en el inicio que un criterio importante para el análisis es considerar una condición estática, es decir que no se han considerado ningún tipo de efecto dinámico, pero definitivamente es un proyecto de interés evaluar los efectos de vibración y la sensibilidad en la alineación. Para trabajos futuros sería un ejercicio complejo e interesante, ampliar el marco del programa incluyendo nuevas temáticas y generalizando el programa de manera que permita probar modelos de diferentes buques con configuraciones y condiciones de operación diferentes.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] ABS, American Bureau of Shipping, Guidance notes on propulsion shafting alignment, Houston, ABS, April 2006
- [2] ABS, Rules for Building and Classing Steel Vessels, Part4, ABS,2003
- [3] Harrington, R, Marine Engineering, SNAME, Chapter X, Section 3, SNAME, 1971
- [4] Harrington, R, Marine Engineering, SNAME, Chapter X, Section 4, SNAME, 1971
- [5] GL, Germanischer Lloyd, Chapter 2, Section 4, GL, 2003
- [6] LR, Lloyd's Register, rules and Regulation for Ships, Part5, Chapter 8, LR, 2002
- [7] Marin, J, R, Proyecto del Sistema Propulsor, Guayaquil, Escuela Politécnica El Litoral, ESPOL, 2005
- [8] Woodward, John, Apuntes de clase, Marine Shafting Design and Aligment
- [9] Woodward, John, Apuntes de clase, Shafting Aligment – Using Reaction Influence Numbers
- [10] Análisis del Alineamiento de la Línea Propulsora