

DETERMINACIÓN DE LA POTENCIA REAL ENTREGADA POR MOTORES MARINOS BASADA EN EXTENSIOMETRÍA Y TELEMETRÍA, Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON LAS NORMAS ISO

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

Carlos J Pacheco Rubio. Analista División de Electricidad y Electrónica. COTECMAR, cpacheco@cotecmar.com.

Alexandra P Hurtado Parra. Gerente de Proyectos. Dirección de Construcciones. COTECMAR, ahurtado@cotecmar.com

RESUMEN

Este artículo presenta el análisis de la metodología desarrollada para determinar la potencia generada por motores diesel marinos, bajo condiciones reales; ésta se basa en el uso de tecnología de galgas extensiométricas y telemetría. Para una correcta medición se calibraron las galgas extensiométricas utilizando los ejes de propulsión, se realizaron las pruebas y se calcularon los resultados teóricos bajo la norma declarada por el fabricante de los motores con el fin de realizar comparaciones entre los resultados reales y teóricos.

Palabras claves: Sistema de propulsión marino, extensometría, galgas extensiométricas, telemetría, sistemas de adquisición de datos, derrateo de potencia.

ABSTRACT

This article presents an analysis developed to determinate the maximum power generated by diesel marine engine under working environmental conditions and measures taken by strain gauges and telemetry methodology. In order to reach this goal, the strain gauges were calibrated on the propulsion shaft, and were executed the sea trials and the results were calculated accordingly the standard declared by the engine manufacturer to compare between real results and calculated results.

Key woks: Marine propulsion system, strain gauges, telemetry, data acquisition system, power losses.

Introducción.

En el proceso de pruebas de mar para la entrega de una embarcación nueva o remotorizada, uno de los tópicos más importantes es determinar la potencia absorbida por la hélice en el rango de revoluciones por minuto que maneja el motor propulsor, de manera tal que se tenga la certeza de que este no trabajará sobrecargado, lo que acortaría su vida útil y disminuiría el tiempo entre mantenimientos mayores (TBO) para un mismo perfil de operación. Las pantallas para monitoreo de los motores con gobernadores electrónicos, que actualmente se instalan en aplicación marina, tienen la opción de mostrar el porcentaje de carga, sin embargo este valor es calculado con base en los consumos de combustible, por lo que se hace necesario determinar la potencia real absorbida por la hélice con base en la deformación torsional del eje de propulsión. Esto se puede medir cuando se conocen las características dimensionales y el material en que fue construido el eje de propulsión. Como caso de estudio se seleccionó una embarcación tipo Lancha Patrullera de Río diseñada y construida por COTECMAR la cual tiene una motorización compuesta por dos motores marinos diesel electrónicos, cada uno con capacidad para entregar 375 kW@2500 rpm de acuerdo con la norma ISO 3046 y dos propulsores tipo water jet. La conexión entre el motor y el propulsor se realiza por medio de un eje cardánico estriado (junta homocinética)

Teoría de ejes a torsión en el rango elástico.

La medición del torque se basa en la deformación torsional sufrida por el eje de propulsión que en este caso, une el motor con el propulsor. Para garantizar el trabajo en la zona elástica los esfuerzos cortantes sufridos por el material deben ser menores al límite de fluencia. El esfuerzo cortante que varía linealmente con el radio del eje, se define como:

$$\tau = \frac{Tc}{J}$$

Donde τ es el esfuerzo cortante del material.

T es el torque a que está sometido el eje.

c es el radio transversal del eje.

J es el momento polar de inercia del eje

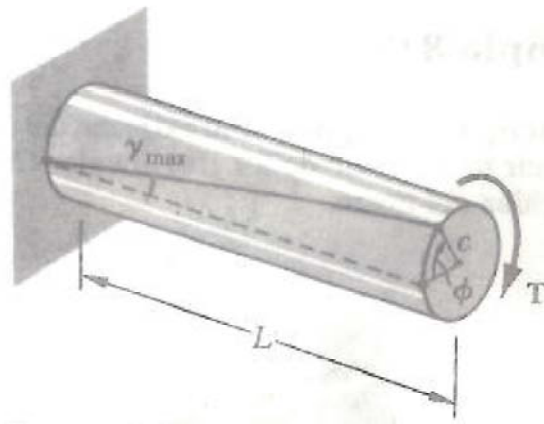


Figura 1. Ejes sometidos a torsión.

La deformación cortante a la que se someterá el eje debido al torque, y a su vez la galga extensiométrica adherida al eje se define como:

$$\gamma = \frac{c\phi}{L}$$

Donde γ es la deformación cortante.

ϕ es el ángulo de torsión del eje.

L es la longitud del eje

El ángulo de torsión en virtud del torque a que se somete el eje se define como:

$$\phi = \frac{TL}{JG}$$

Donde G es el modulo de rigidez del material [1]

Funcionamiento de las Galgas Extensiométricas

Básicamente, una galga es un conjunto de pequeños alambres con una resistencia eléctrica variable (ver figura2).

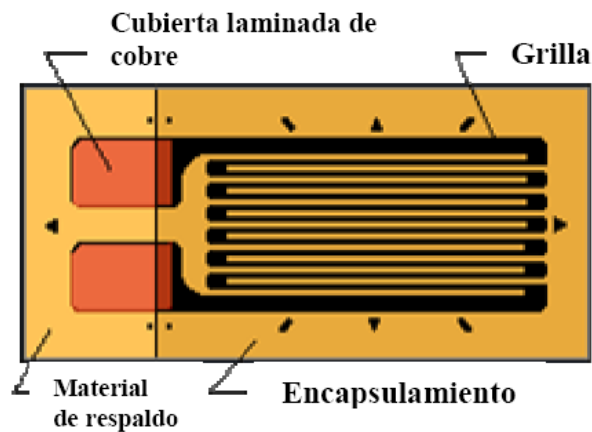


Figura 2. Galga extensiométrica

Cuando la galga se somete a una deformación, su resistencia eléctrica cambia (ver figura 3) por lo que se aplican para medir la deformación de un material al ser fijada de forma adecuada a este.

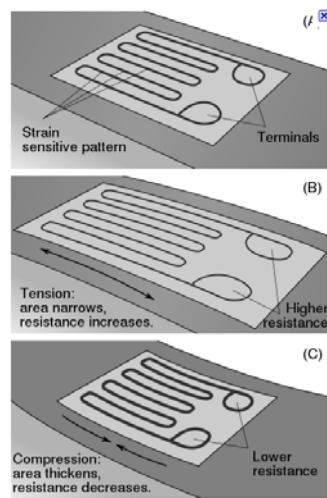


Figura 3. Variación resistencia por tensión o compresión

De acuerdo con la aplicación, las galgas extensiométricas poseen diferentes configuraciones; para el caso de medición de torsión en ejes, se usan las llamadas rosetas de puente completo, las cuales constan de 4 galgas extensiométricas integradas en una misma lámina (figura 4).

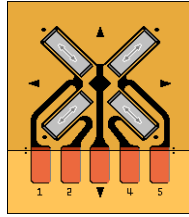


Figura 4. Galga extensiométrica tipo roseta puente completo.

Esta configuración es la ideal para medición de torsión en ejes pues los esfuerzos que se presentan en esta aplicación son esfuerzos cortantes los cuales se dan a 45° de tal manera que la deformación actúa directamente sobre la galga cuando esta ha sido instalada adecuadamente (figura 5).

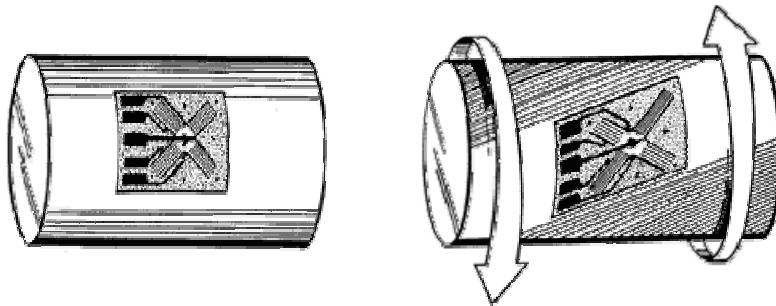


Figura 5. Galga sometida a esfuerzos en un eje [2]

Como complemento es necesario implementar tecnología inalámbrica de manera tal que no se tengan limitaciones a la hora de poner en funcionamiento el sistema propulsor. En este proyecto se utilizó un sistema de adquisición de datos como se muestra en la figura 6. Este sistema se encarga de tomar la deformación de la galga, como señal de voltaje, debida a la deformación en el eje y trasmitirla por medio de un módulo transmisor (figura 6a), señal que es captada por un receptor ubicado en una estructura estática (figura 6b) y enviada a un módulo de procesamiento (figura 6c). Una vez en el receptor, la señal va a una tarjeta de adquisición de datos conectada en un computador a partir del cual se leen las variaciones de voltaje que son interpretadas como variaciones de torque (figura 6d). Este arreglo incluye un medidor de rpm el cual también envía información al computador, de manera tal que se pueda hacer el cálculo de la potencia absorbida.

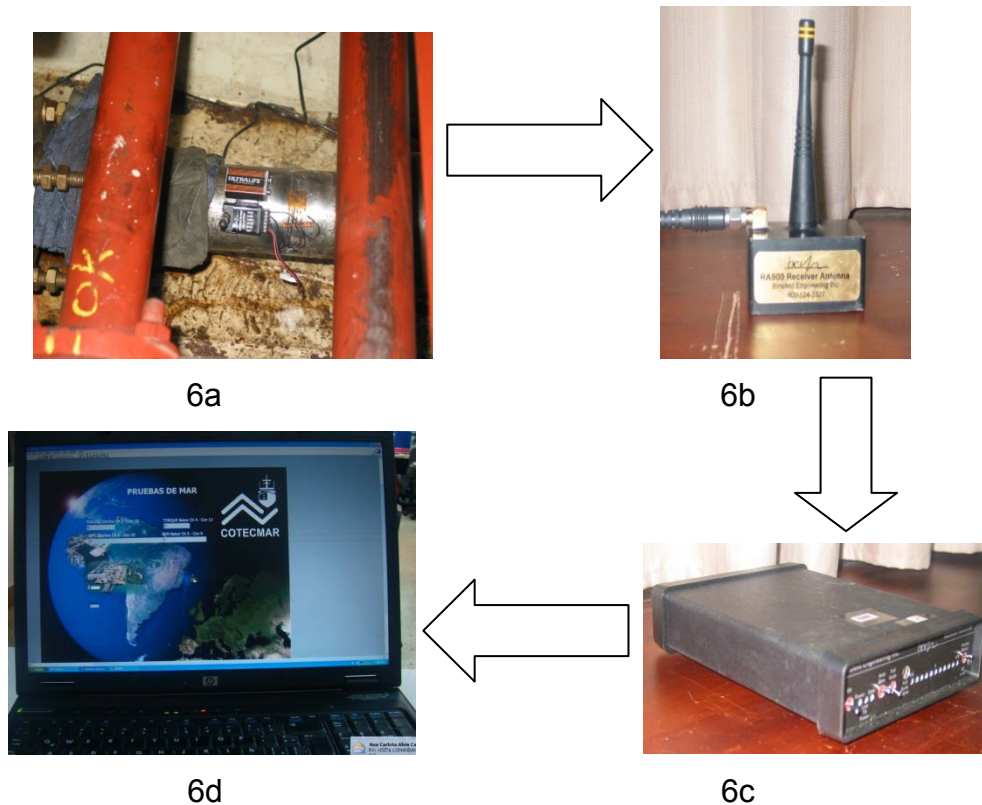


Figura 6. Configuración del sistema de adquisición de datos

Calibración de las galgas extensiométricas en los ejes

La potencia absorbida por el propulsor se determina por medio de la medición de la deformación torsional del eje que conecta el motor con el propulsor, Para este caso en particular, como no se conocen todas las dimensiones y el material del eje cardánico para realizar el cálculo matemático de la deformación Vs. voltaje, se realizó un montaje que permitiera calibrar las galgas . Se montó cada eje en un torno y se bloqueó para evitar que girara al colocar la carga; se pegó la galga extensiométrica sobre la superficie del eje y se instaló una barra de longitud conocida, en este caso 1.1m, de forma perpendicular al eje para ejercer el momento de torsión. Esta barra se mantuvo sólidamente unida al eje en uno de sus extremos y en el otro extremo se colocó el peso que produciría la deformación del eje, simulando la deformación por torsión producida sobre el eje cuando se encuentre en operación.

A la galga se conectó el sistema de transmisión de datos inalámbrico que debía enviar la señal al sistema de adquisición para luego procesarla con el software.

En la figura 7 se observa la galga en el eje y el proceso de verificación de la horizontalidad del brazo.

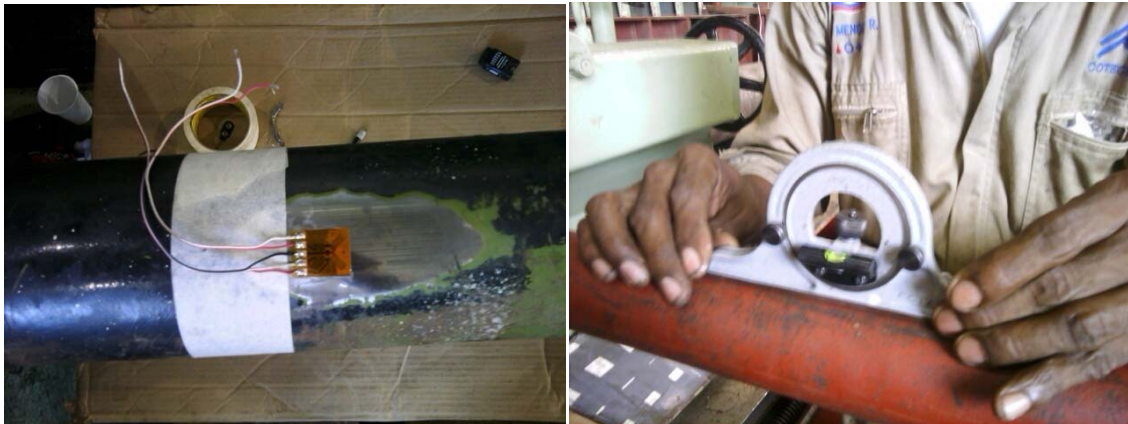


Figura 7. Pegado de la galga extensiométrica tipo roseta y verificación de horizontalidad del brazo

Posteriormente sobre el tubo se colocaron pesos conocidos para simular la deformación que sufrirá el eje en operación, como se muestra en las figura 8.



Figura 8. Cargue del eje cardánico con pesos conocidos para producir deformación por torsión.

En la figura 9 se observan los resultados de la interacción Torque - Voltaje con brazo constante de 1.1 m para cada uno de los ejes.

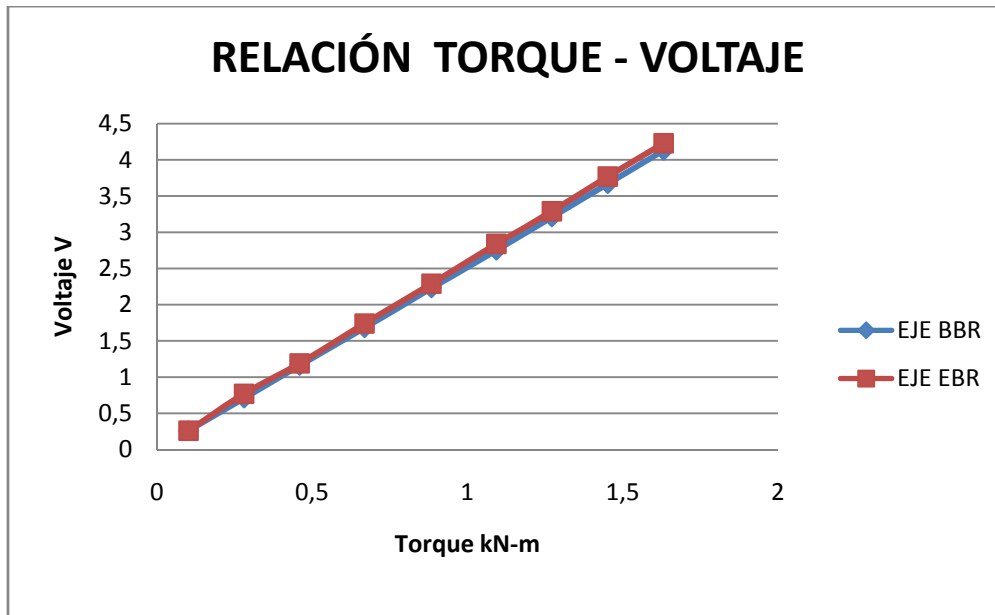


Figura 9. Relación Torque – Voltaje para cada uno de los ejes.

De acuerdo con la información suministrada por el fabricante de los motores los valores del torque, la potencia y la velocidad del motor propulsor, son los que se encuentra en la tabla 1. Estas características están referenciadas a las condiciones de la norma ISO 3046-1[3]

Tabla 1. Velocidad, Torque y potencia para el motor de 375 kW @ 2500 rpm.

Velocidad rpm	torque kN-m	Potenica kW
600	0,083	43
800	0,147	68
900	0,186	84
1000	0,229	102
1100	0,277	121
1300	0,387	175
1500	0,516	282
1600	0,587	325
1700	0,662	350
1800	0,743	369
1900	0,827	379
2100	1,011	380
2200	1,109	380
2300	1,212	375
2400	1,32	375
2500	1,432	375

Pruebas de mar

Las pruebas de mar a esta embarcación se desarrollaron en la condición de máxima carga con mar en calma. Las condiciones ambientales del cuarto de máquinas fueron registradas por el sistema de adquisición de datos, con sus respectivos sensores, los resultados de los se observan en la tabla 2

Tabla 2. Condiciones ambientales de prueba.

	Condiciones reales		Unidades
Presión Barométrica	Px	101,08	kPa
Temperatura Ambiente	Tx	304,15	K
Humedad Relativa	Øx	55	%

La prueba como tal consistió en llevar la embarcación desde 600 rpm hasta las máximas rpm (superior a 2500) realizando aumentos de velocidad de 150 rpm. Los resultados promedio tomados se pueden observar en la tabla 3.

Tabla 3. Datos de torque, velocidad y potencia medidos en campo.

TORQUE EBR	TORQUE BBR	VELOCIDAD EBR	VELOCIDAD BBR	POTENCIA EBR	POTENCIA BBR
(kN.m)	(kN.m)	RPM	RPM	kW	kW
0,28	0,28	1.058,00	1.064,76	31,02	31,22
0,42	0,42	1.203,98	1.203,16	52,95	52,92
0,44	0,45	1.356,39	1.356,43	62,50	63,92
0,54	0,54	1.488,73	1.496,23	84,19	84,61
0,59	0,59	1.546,24	1.548,19	95,53	95,65
0,64	0,64	1.596,55	1.599,98	107,00	107,23
0,68	0,69	1.656,79	1.651,43	117,98	119,33
0,77	0,77	1.801,80	1.802,81	145,29	145,37
0,90	0,90	1.958,97	1.956,22	184,63	184,37
1,06	1,06	2.098,14	2.105,58	232,90	233,73
1,17	1,17	2.254,50	2.256,34	276,23	276,45
1,22	1,22	2.407,63	2.415,29	307,59	308,57
1,29	1,29	2.505,52	2.494,13	338,47	336,93

La potencia, fue calculada con la siguiente formulación [4]¹:

$$P = \frac{Ttq \times n}{9,5493}$$

Donde

P es la potencia del motor en kW.

Ttq es el torque del motor en kNm

n es la velocidad del motor en revoluciones por minuto.

Los datos de potencia y velocidad se graficaron y posteriormente se construyó la curva de orden tres (3) correspondiente a la potencia consumida por la hélice. En la figura 10 se observan los resultados de este análisis².

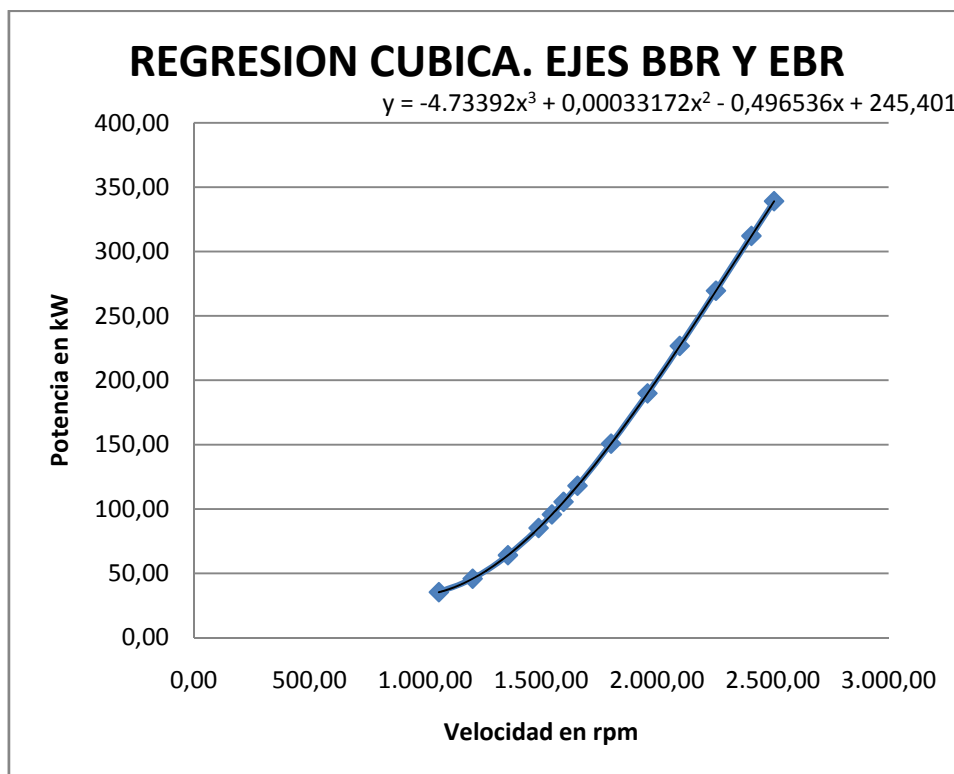


Figura 10 Regresión cúbica para los dos ejes.

Al comparar las potencias obtenidas en las pruebas de mar, 338.47 kW @ 2505 rpm y 336.93 kW @ 2494 rpm en EBR y BBR respectivamente, se

¹Ver ISO 3046-3 2006

² Regresiones elaboradas en Statgraphics Centurion.

observa que el motor sufrió un derrateo de potencia ya que debería estar entregando 375 kW @ 2500 rpm (ver tabla 1), es decir que el motor EBR está entregando el 90.26% y el motor BBR el 89,85% de la potencia declarada por el fabricante. Lo anterior teniendo en cuenta que las condiciones ambientales de la prueba son muy diferentes a las condiciones ambientales declaradas en la norma ISO 3046-1, las cuales se observan en la tabla 4.

Cálculo de la Potencia Derrateada

De acuerdo con la norma ISO 3046-1 el motor sufre un derrateo de potencia debido a las condiciones ambientales reales de operación. Las condiciones ambientales en las que se prueban los motores de acuerdo con la norma ISO 15550 se pueden observar en la tabla 4.

Tabla 4. Condiciones ambientales estándar

	Condiciones estándar		Unidades
Presión Barométrica	Pr	100	kPa
Temperatura Ambiente	Tr	299,15	K
Humedad Relativa	Ør	30	%

La potencia real obtenida bajo las condiciones ambientales en que se realizó la prueba de mar se pueden calcular de acuerdo a las formulaciones contenidas en la norma ISO 3046-1 como se observa a continuación.

Teniendo en cuenta que el motor propulsor es un motor diesel turbo cargado y post-enfriado y considerando las condiciones ambientales de la prueba presentadas en la tabla 2 se obtienen los siguientes coeficientes³

Tabla 6 Coeficientes a, m, n, s

a	0
m	0,7
n	1,2
s	1

³ Ver ISO 3046-1 tabla 2

Con la información de temperatura y humedad relativa reales, dentro del cuarto de máquinas, se calcula la presión de vapor de agua⁴ ($\phi_x P_{sx}$) dando como resultado 5.3 kPa.

Con la información de la presión de vapor de agua y presión barométrica real se determina la razón de la presión de aire seco⁵ $\frac{P_x - a\phi_x P_{sx}}{P_r - a\phi_r P_{sr}}$ la cual es igual a 0.967.

Con los valores de la razón de la presión de aire seco, la relación entre la temperatura estándar y la temperatura real y los factores m, n y s se determina la razón de potencia k indicada así:

$$k = \left(\frac{P_x - a\phi_x P_{sx}}{P_r - a\phi_r P_{sr}} \right)^m \left(\frac{T_r}{T_x} \right)^n \left(\frac{T_{cr}}{T_{cx}} \right)^s$$

Donde $T_r = T_{cr}$ temperatura ambiente estándar y $T_x = T_{cx}$ temperatura ambiente real.

Con esta información se determina el valor $k = 0.922$

Con el valor k calculado se procede a determinar el valor del factor de ajuste de potencia α , el cual se calcula con la siguiente formulación:

$$\alpha = k - 0.7(1 - k) \left(\frac{1}{\eta m} - 1 \right)$$

Donde ηm corresponde a la eficiencia mecánica del motor la cual se puede tomar como 0.8 cuando no se conoce el valor real⁶. Con base en lo anterior, el valor de α es 0.90873.

Con el valor de α se determina el valor de la potencia real:

⁴ Ver ISO 3046-1 tabla B.1

⁵ Ibid Tabla B.2

⁶ Ibid

$$P_x = \alpha \times P_r$$

Donde P_r corresponde a la potencia al freno bajo condiciones estándar, medida en kW y P_x corresponde a la potencia real bajo condiciones de operación medida en kW.

Con lo anterior se determina que el valor de P_x es 340.772 kW.

Desviaciones máximas permitidas

De acuerdo con la norma ISO 15550 [5] “Tabla 4. Lista de Parámetros”, se permite una desviación del $\pm 3\%$ en la potencia medida en el eje, por lo cual los valores de potencia real que deben entregar los motores, bajo las condiciones ambientales de operación referenciadas en la tabla 2 deben estar entre 330.84 kW y 350.99 kW, como las potencias medidas están dentro del rango de potencia derrateada por condiciones ambientales se concluye que el motor, bajo condiciones estándar está entregando la potencia declarada por el fabricante.

Para la velocidad rotacional del motor, la misma norma permite una desviación de $\pm 2\%$ a máximas rpm, por lo que el rango de velocidad se encuentra entre 2450 rpm y 2550 rpm. Teniendo en cuenta los valores reales obtenidos se concluye que el motor cumple con este criterio.

Conclusiones y Recomendaciones:

La metodología para medición de potencia basado en el uso de galgas extensiométricas tiene la ventaja de basarse en la deformación del eje, es decir, es un método de medición directo del fenómeno de torsión Vs rpm, independiente de otras metodologías que se basan en cálculos indirectos como la que utiliza el consumo de combustible.

La aplicación de la calibración de la galga en el eje da la ventaja de poder determinar los valores de voltaje Vs deformación con el eje en condiciones controladas para posteriormente llevarla a condiciones de trabajo, sin embargo

cuando no se puede aplicar este procedimiento, como por ejemplo en buques de tamaños mayores donde los ejes no se pueden cargar para deformarlos en condiciones controladas, se hace necesario predecir el comportamiento de la galga mediante cálculos numéricos, basado en las características físicas del eje, el material del mismo y en las características propias de la galga.

Sumado a lo anterior, una buena medición depende de que la galga se deforme en la misma medida que lo hace el eje, de manera que es muy importante la experticia de quienes tienen la responsabilidad de pegar las galgas a los ejes.

También resulta importante asegurar los equipos que giran con los ejes, ya que estos alcanzan altas velocidades lo que puede conllevar, en caso de accidentes, a daños al personal presente en la prueba o a los mismos equipos.

La telemetría presenta la ventaja de la adquisición de datos sin dependencia de cables por lo que no se limita la prueba. Un software de adquisición de datos y almacenamiento de los mismos ayuda al procesamiento de la información, posterior a la prueba, en especial cuando se tiene compatibilidad con software para el manejo estadístico.

Para este caso en particular se comprobó que la potencia medida correspondía con la potencia derrateada por condiciones ambientales.

Bibliografía:

[1] Mecánica de Materiales. BEER Ferdinand, JOHNSTON Russell. Ed. McGraw Hill 1995.

[2] <http://www.binsfeld.com/>

[3] ISO 3046-1 - 2002 Reciprocating internal combustion engines – Performance- Part 1 Declarations of power, fuel and lubricating oil consumption, and test methods- Additional requirements for engines for general use.

[4] ISO 3046-3 – 2006. Reciprocating internal combustion engines – Performance- Part 3 Test measurements.

[5] ISO 15550 – 2002. Internal combustion engines – Determination and method for the measurement of engine power – General requirements.