
UNIVERSIDADE DA CORUÑA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE NÁUTICA Y MÁQUINAS**

GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS

ENERGÍA Y PROPULSIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

TFG/GTM/E-15-16

QUE LLEVA POR TÍTULO

**“INGENIERÍA MARINA:
ESTUDIO DE EFICIENCIA DE UN
MOTOR PRINCIPAL”**

DEFENDIDO ANTE TRIBUNAL EN LA SESIÓN DE

SEPTIEMBRE 2016

JOSÉ LUIS FERREIRO CASTIÑEIRA

DIRECTOR: D. FELIPE ANTELO GONZÁLEZ

“INGENIERÍA MARINA: ESTUDIO DE EFICIENCIA DE UN MOTOR PRINCIPAL”

ÍNDICE GENERAL

**GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS
ENERGÍA Y PROPULSIÓN**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

FECHA: SEPTIEMBRE 2016

AUTOR: José Luis Ferreiro Castiñeira

Fdo. :

DOCUMENTO I: MEMORIA

1 OBJETO.....	10
2 ALCANCE.....	12
3 ANTECEDENTES.....	13
3.1 Preocupación por el medio ambiente y Normativas.....	13
3.1.1 Límites de emisiones de NOx.....	14
3.1.2 Contenido de azufre en el combustible.....	17
3.1.3 Emisiones de efecto invernadero.....	18
3.1.4 El Proyecto Hércules.....	19
3.2 Conceptos importantes sobre Combustión.....	21
3.2.1 Tipos de combustión.....	23
3.2.2 Leyes Termoquímicas - Entalpía de formación.....	24
4 NORMAS Y REFERENCIAS.....	27
4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas.....	27
4.2 Bibliografía.....	29
4.3 Software utilizado.....	31
5 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS.....	32
6 ANALISIS DE SOLUCIONES.....	33
7 RESULTADOS FINALES.....	32
7.1 Motor que consume Gas Natural.....	35
7.1.1 Recomendaciones de WÄRTSILÄ y MAN acerca del GN.....	37
7.2 Humedad relativa del aire de admisión.....	39

7.3 Verificación de Potencia y Curvas Características.....	40
7.4 Calor aportado por el aire de admisión.....	42
7.5 Eficiencia y pérdidas.....	46
7.6 Emisiones medidas en los gases de escape.....	48

DOCUMENTO II: ANEXOS

1 CÁLCULO DEL PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) DE UN COMBUSTIBLE LNG.....	52
2 AGUA EN FORMA DE VAPOR EN EL AIRE DE ADMISIÓN.....	61
3 VERIFICACIÓN DE POTENCIA Y CURVAS CARACTERÍSTICAS.....	63

DOCUMENTO III: PLIEGO DE CONDICIONES

1 LISTA DE EQUIPOS Y APARATOS DE MEDIDA.....	68
2 ANALIZADOR DE GASES TESTO 350 MARITIME.....	69
3 CAUDALÍMETRO COMBUSTIBLE KRAL BEM 1000.....	71
3.1 Medida diferencial de combustible consumido.....	72
3.2 Variaciones de temperatura del combustible.....	72
3.3 Compensación de ondas de presión.....	73
4 TACÓMETRO DIGITAL RM-1501.....	74
5 TORSIÓMETRO DEL FABRICANTE KTR.....	75
6 MEDIDOR DE T Y HUMEDAD COMET T7511.....	77
7 MEDIDOR DE T DANFOSS, MODELO MBT 5250.....	78

8 PORTÁTIL TOSHIBA 13,3" SATELLITE Z30-B-15M.....	79
9 TABLA CARATERÍSTICAS APARATOS/EQUIPOS DE MEDIDA.....	80
10 NORMAS Y/O CERTIFICADOS CALIDAD.....	81

DOCUMENTO IV: PRESUPUESTO

1. MEDICIONES.....	85
2. PRESUPUESTO.....	88
3. MEDICIONES Y PRESUPUESTO. PRECIOS DESCOMPUESTOS.....	90
4. RESUMEN DE CAPÍTULOS (COEFICIENTES).....	94



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
NÁUTICA Y MÁQUINAS

TÍTULO: “MAIN ENGINE EFFICIENCY STUDY”

MEMORIA

**GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS
ENERGÍA Y PROPULSIÓN**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

FECHA: **SEPTIEMBRE 2016**

AUTOR: José Luis Ferreiro Castiñeira

Fdo. :

ÍNDICE DE LA MEMORIA.

1 OBJETO.....	10
2 ALCANCE.....	12
3 ANTECEDENTES.....	13
3.1 Preocupación por el medio ambiente y Normativas.....	13
3.1.1 Límites de emisiones de NOx.....	14
3.1.2 Contenido de azufre en el combustible.....	17
3.1.3 Emisiones de efecto invernadero.....	18
3.1.4 El Proyecto Hércules.....	19
3.2 Conceptos importantes sobre Combustión.....	21
3.2.1 Tipos de combustión.....	23
3.2.2 Leyes Termoquímicas - Entalpía de formación.....	24
4 NORMAS Y REFERENCIAS.....	27
4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas.....	27
4.2 Bibliografía.....	29
4.3 Software utilizado.....	31
5 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS.....	32
6 ANALISIS DE SOLUCIONES.....	33
7 RESULTADOS FINALES.....	32
7.1 Motor que consume Gas Natural.....	35
7.1.1 Recomendaciones de WÄRTSILÄ y MAN acerca del GN.....	37
7.2 Humedad relativa del aire de admisión.....	39

7.3 Verificación de Potencia y Curvas Características.....	40
7.4 Calor aportado por el aire de admisión.....	42
7.5 Eficiencia y pérdidas.....	46
7.6 Emisiones medidas en los gases de escape.....	48

1 OBJETO.

El objeto de este Proyecto es ofrecer una herramienta que permita conocer, mediante medidas en tiempo real con diversos dispositivos, las condiciones de trabajo del Motor Principal de un buque. A partir de dichos datos se utilizará el programa de cálculos de ingeniería EES para realizar una Verificación de Potencia e Informe de Emisiones.

La idea surge a partir de una medida de potencia máxima desarrollada en un pequeño buque de pesca 32 m con un Motor ABC, el motivo de esta prueba, realizada por la empresa Coterena SLU y confirmada a su validez por la Sociedad de Clasificación RINA, era pasar el buque a bandera belga y comprobar si su potencia máxima era compatible con las características del buque para la Normativa de buques pesqueros de ese país...

El objetivo es realizar un estudio de la eficiencia del motor:

- Obtención de Poder Calorífico del Combustible (PCI) en motores cuyo combustible es Gas Natural a partir de las fracciones molares de las sustancias de las que está compuesto.
- Verificación de potencia.
- Comparar el consumo específico de combustible real con el indicado por el fabricante.
- Obtención de las Curvas Características.
- Cantidad de agua en estado de vapor aportada por el aire de admisión que se sumará al vapor de agua producto de la combustión.
- Estudiar las pérdidas de potencia, en kW, partiendo del 100% obtenido en la Cámara de Combustión hasta la potencia efectiva que entrega el motor en el eje de cola.
- Informe de emisiones de escape que indiquen cómo se está desarrollando la combustión, si se cumple con los límites de NO_x y SO_x de las Normativas vigentes, falta de aire en el proceso de combustión, etc...

La parte de cálculo del proyecto irá programado en EES y permitirá introducir los parámetros obtenidos mediante los diferentes aparatos de medida como caudalímetros, torsiómetro, termómetros etc... para obtener los resultados.

2 ALCANCE.

El objeto de aplicación de este Proyecto es el Motor Principal de un buque del cual la Naviera necesita realizar un estudio de Verificación de Potencia que permita conocer qué Potencia efectiva desarrolla el motor a un determinado régimen de rpm y comparar estos datos con los ofrecidos por el fabricante.

También tener información de las emisiones de los gases de escape. Especialmente los NO_x y SO_x, importantes a la hora de cumplir con las normativas vigentes y que se describen en el apartado "Antecedentes" de este Documento Básico (Memoria).

3 ANTECEDENTES.

3.1 Preocupación por el medio ambiente y Normativas.

La OMI (Organización Marítima Internacional) es una agencia de las Naciones Unidas fundada para promover la seguridad marítima. Surgió formalmente en una conferencia internacional en Génova en 1948, en 1958 estaba definitivamente activa y funcionando. Agrupa a 167 Estados Miembros y a 3 miembros asociados.

Las normas de la OMI acerca de la contaminación provocada por los buques están recogidas en el "Convenio Internacional para la Prevención de la Contaminación causada por los Buques" conocido MARPOL 73/78. En Septiembre de 1997, se añade al Convenio el "Protocolo de 1997" incluido en el Anexo VI que trata sobre las regulaciones necesarias para la prevención de la contaminación atmosférica, éste limita las cantidades de NO_x y SO_x emitidas por los gases de escape de los buques y prohíbe el uso de sustancias destructoras de la capa de Ozono como los CFCs.

El estándar Tier I, II y III se centra en las emisiones de NO_x.

Con respecto al Tier I, fue creado en en la versión de 1997 del Anexo VI. Se dio un plazo de 12 meses para ser adoptado por los 15 Estados (entre ellos España) que ratificaron dicho protocolo y que juntos sumaban más del 50% de toda la flota mercante mundial. Éste mencionaba que las limitaciones se aplicaban a todos los buques con motores de más de 130 kW de potencia construidos después del 1 de enero del año 2000.

La Tier II y III fueron introducidos en Octubre de 2008, aceptado por 53 países que representaban más del 80% de la flota mercante mundial. Sus novedades:

- Desde Julio del año 2000 se requerían nuevas características de los combustibles marinos, principalmente centrándose en los límites de N o S que podían contener.

- Tier II y III acerca de los límites en las emisiones de NO_x de los motores nuevos.
- Aplicación de las restricciones de NO_x de la Tier I a motores de buques construidos antes del 1 de enero del año 2000.

Esta revisión del Anexo VI que incluía los protocolos Tier II y III es de obligado cumplimiento desde Julio del año 2010.

Zonas ECA (Emission Control Areas).

El Anexo VI establece dos clases de zonas donde aplicar sus requerimientos acerca de emisiones y características de los combustibles:

- Zona global con restricciones estándar.
- Zonas con restricciones más estrictas: ECA. Pueden ser designadas para restringir especialmente los SO_x, los NO_x, o ambos.

3.1.1 Límites de emisiones de NO_x

Los límites en las emisiones de NO_x pueden observarse en la Tabla 1 y la representación gráfica en la Figura 1.

Date	NO _x Limit, g/kWh	
	n < 130	130 ≤ n < 2000
2000	17.0	45 · n ^{-0.2}
2011	14.4	44 · n ^{-0.23}
2016†	3.4	9 · n ^{-0.2}
† In NO _x Emission Control Areas (Tier II standards apply outside ECAs).		

Tabla 3.1.1.1 - MARPOL Annex VI NO_x Emission Limits

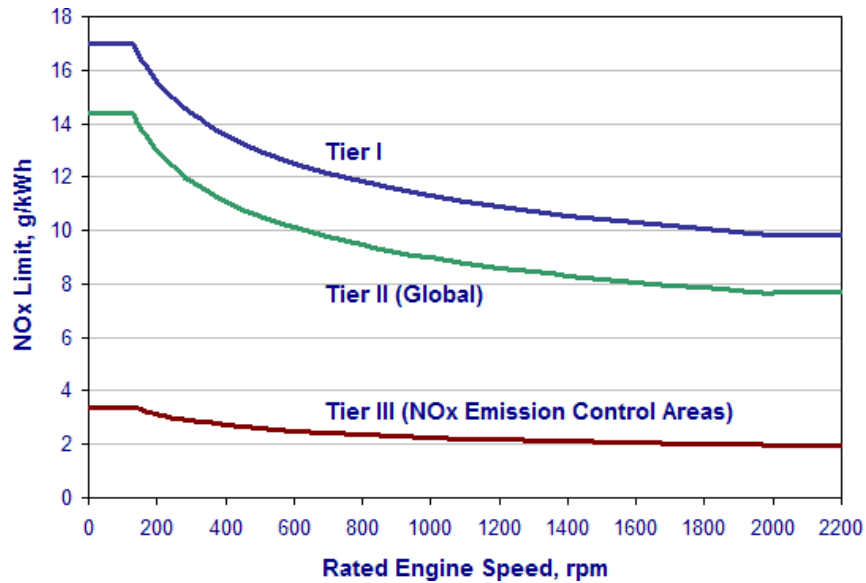


Figura 3.1.1.1 - MARPOL Anexo VI. Límite de emisiones NO_x

Las limitaciones de emisiones de NO_x de la Tier I y II son aplicables en la actualidad a todo el mundo, mientras que la más restrictiva, la Tier III se aplica sólo en las zonas ECA (Emission Control Areas).

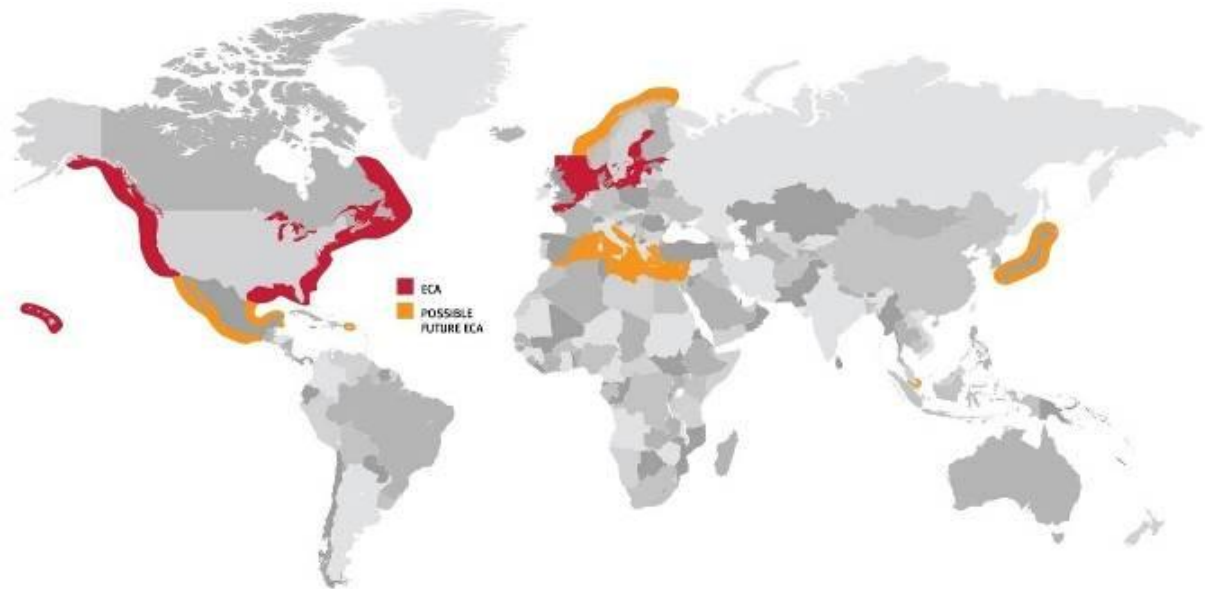


Figura 3.1.1.2 - Zonas ECA vigentes (en rojo) y futuras a medio plazo (naranja).

Este Proyecto, mediante el uso del equipo Testo Maritime 350, permite realizar medidas precisas de diferentes sustancias como el NO_x y el SO_x , entre otras, lo cual es necesario en el caso de un buque del cual se necesita saber si cumple con la Tier II. Este método cumple con la norma ISO 8178 que trata sobre la medida de emisiones de gases de escape para instalaciones con motores “non-road”, como por ejemplo buques o plantas de cogeneración. Es necesario el cumplimiento de esta Norma ISO 8178 para lograr una Certificación de emisiones válida en Estados Unidos, Europa y Japón.

En caso de no cumplir con la Tier II, deben llevarse a cabo optimizaciones del proceso de combustión, modificando el funcionamiento de las siguientes partes del motor (lista no exhaustiva):

- Ajuste del momento de inicio/fin de la inyección.
- La presión de combustión.
- La cantidad de combustible empleado en cada ciclo.
- Modificaciones en la forma de la tobera del inyector.
- Modificar reglaje válvula de escape.
- Cambiar el volumen de aire de admisión a comprimir.

Debido a lo restrictiva que resulta la Tier III, como puede observarse en la Figura 3.1.1.1, para un buque de cierta antigüedad con un motor no construido para cumplir con ella, las soluciones anteriores no son suficientes y la Naviera debe sopesar el aplicar sistemas más costosos y complejos como aplicación de agua durante el proceso de combustión, ya sea mediante inyección en las lumbreras de barrido o en la misma cámara de combustión, el sistema EGR (Exhaust Gas Recirculation) o el SCR (Selective Catalytic Reduction).

3.1.2 Contenido de azufre en el combustible.

El Anexo VI también incluye medidas en cuanto a límites de azufre que un combustible debe tener con el objetivo de controlar la cantidad de SO_x emitidos y las partículas en suspensión (PM).

Existen combustibles con muy baja cantidad de S para poder navegar en zonas “SO_x ECA” o “SECA”. La Tabla 2 muestra el listado de límites y cuándo fueron implementados y la Figura 2 muestra el gráfico.

Date	Sulfur Limit in Fuel (% m/m)	
	SO _x ECA	Global
2000	1.5%	4.5%
2010.07	1.0%	
2012		3.5%
2015	0.1%	
2020 ^a		0.5%
a - alternative date is 2025, to be decided by a review in 2018		

Tabla 3.1.2.1 - MARPOL Annex VI Fuel Sulfur Limits

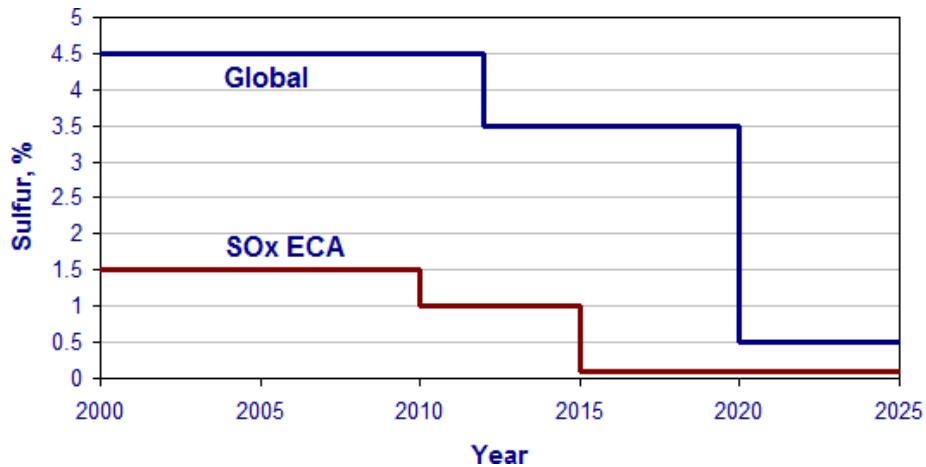


Figura 3.1.2.1 - MARPOL Annex VI Fuel Sulfur Limits

Buques que no cumplen con los límites de SO_x emitidos a la atmósfera deben instalar torres de lavado (Scrubbers) u otros sistemas de limpieza de gases de escape si quieren navegar en zonas SECA.

3.1.3 Emisiones de efecto invernadero.

El capítulo 4 del Anexo VI del MARPOL introduce dos mecanismos legales que tiene por objeto establecer la elaboración de un plan estratégico de mejora de la Eficiencia Energética y la reducción de la contaminación atmosférica.

Uno es el EEDI (the Energy Efficiency Design Index), para nuevos buques, y otro es el SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) para todos los buques.

Estas regulaciones han entrado en vigor desde el 1 de enero de 2013 y es aplicable a todos los buques de más de 400 t .

Su elaboración garantizará la concesión del Certificado Internacional de Eficiencia Energética (IEE) que complementará al Certificado Internacional de Prevención de la Contaminación Atmosférica (Certificado IAPP).

3.1.4 El Proyecto Hércules.

De las siglas en inglés “High-efficiency Engine R&D on Combustion with Ultra-low Emissions for Ships” el proyecto Hércules está enmarcado dentro de la producción de energía sostenible y segura en aplicaciones marinas.

La idea nació en 2002 como un proyecto de Investigación y desarrollo. Sus intenciones iniciales se basaban en:

- Aumentar la eficiencia de los motores y reducir el consumo de combustible.
- Reducir las emisiones de gases y partículas a la atmósfera.
- Aumentar fiabilidad de los motores.

Se realizó en tres fases entre 2004-2014 denominados HERCULES-A, HERCULES-B Y HERCULES-C con un presupuesto aproximado de 80 M €. Cada uno con sus parámetros a mejorar relacionados con los puntos arriba descritos.

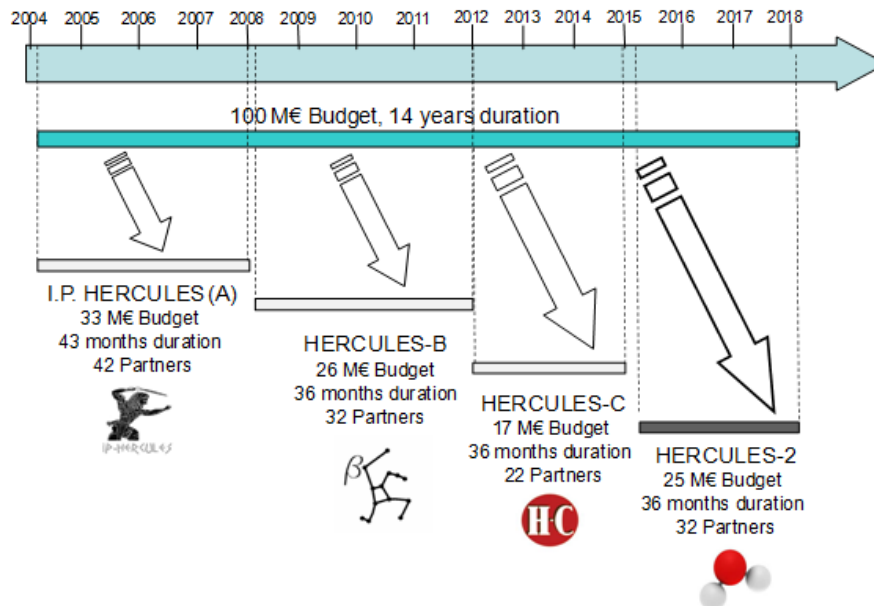


Figura 3.1.4.1 – Información fechas y presupuestos programa HERCULES

Han participado en el desarrollo de este Proyecto Hércules alrededor de 70 socios de empresas muy variadas relacionadas con el sector marítimo-industrial.

Actualmente está en desarrollo el programa HERCULES-2 (2015-2018) y sus principales líneas de investigación son:

- Capacidad de los nuevos motores marinos de adaptarse a diferentes tipos de combustibles.
- Investigación de nuevos materiales.
- Objetivo de producir, económicamente sostenibles, motores marinos con emisiones contaminantes prácticamente nulas.
- Importancia de aplicar sistemas de mejora en eficiencia y reducción de emisiones de todos los buques, ya existentes o de nueva construcción, durante toda su vida útil.

El 22 de Septiembre de 2014 MAN y WÄRTSILÄ, que juntos suman en torno al 90% del mercado de motores propulsores marinos, declaran participar activamente en el desarrollo del programa de investigación y desarrollo HERCULES-2.

3.2 Conceptos importantes sobre Combustión.

El estudio de la combustión es muy importante para saber cuánta potencia se extrae del combustible.

La reacción de combustión se basa en la reacción química exotérmica de una sustancia (o una mezcla de ellas) denominada combustible, con el oxígeno. Como consecuencia de la reacción de combustión se tiene la formación de una llama. Dicha llama es una masa gaseosa incandescente que emite luz y calor.

La combustión puede llevarse a cabo directamente con el oxígeno o con una mezcla de sustancias que contengan oxígeno. Esta mezcla de sustancias que contiene oxígeno se denomina comburente. El aire es el comburente utilizado en Motores de Combustión Interna.

La reacción química entre el combustible y el oxígeno origina sustancias gaseosas. Los productos más comunes son CO_2 y H_2O . A los productos de una reacción de combustión se los denomina, en forma genérica, humos.

Es importante hacer notar que el combustible sólo reacciona con el oxígeno del aire. La composición del aire es 20.99% de O_2 , 78.03% de N_2 , 0.94% de Ar (argón), 0.03% de CO_2 y 0.01% de H_2 . Excepto en el caso donde se dan las condiciones adecuadas para que una parte del Nitrógeno se combine con el O_2 formando NO_x , el N_2 pasará íntegramente a los humos.

Para una combustión perfecta del oxígeno con el carbono, hidrógeno, azufre, nitrógeno y demás compuestos del combustible se necesita por cada átomo de carbono dos átomos de oxígeno, formando el gas anhídrido carbónico (CO_2), también se puede combinar un átomo de carbono con uno de oxígeno formando el gas monóxido de carbono (CO); este gas debe evitarse porque la combustión del carbono en forma de CO propicia las emisión de los gases de efecto invernadero. El hidrógeno se combina siempre en proporción de un átomo con dos de oxígeno

formando el H_2O , el azufre se combina en proporción de un átomo con dos de oxígeno formando el gas anhídrido sulfuroso (SO_2); este gas es perjudicial porque al enfriarse hasta cierto punto los productos de la combustión para la presión dada, el agua en estado de vapor formada se condensa y reacciona con el SO_2 formando ácido sulfúrico (H_2SO_4), el cual es sumamente corrosivo. El nitrógeno necesita por cada átomo dos átomos de oxígeno, formando el dióxido de nitrógeno y otros compuestos nitrogenados.

Otro caso en que parte de algún reactivo pasa al producto es cuando hay más aire del que se necesita para la combustión; el O_2 que no se utiliza en la reacción formará parte de los humos. Se habla entonces de reacciones con exceso de aire.

También es útil indicar que los humos pueden contener parte del combustible que no haya reaccionado y sustancias con un grado de oxidación incompleto, como el CO . Cuando el O_2 que se necesita para la reacción no es suficiente, se habla de reacciones con defecto de aire.

Los contaminantes principales de los gases de escape son: CO , otros gases parcialmente oxidados, NO_x (NO y NO_2) y hollín, a los que hay que añadir SO_2 , y cenizas, según el combustible, y algún otro si se han usado aditivos (p.e. PbO si se añadió $Pb(C_2H_5)_4$ a la gasolina para aumentar el octanaje). Al aumentar la riqueza de la mezcla aumenta la emisión de inquemados (CO y hollín), y al aumentar la temperatura aumenta la producción de NO_x .

3.2.1 Tipos de combustión.

Los procesos de combustión se pueden clasificar según cómo la calidad de la combustión:

Combustión completa.

Las sustancias combustibles del combustible se queman hasta el máximo grado posible de oxidación. En consecuencia, no habrá sustancias combustibles en los humos. En los productos de la combustión se puede encontrar N_2 , CO_2 , H_2O y SO_2 .

Combustión incompleta.

Sucede lo contrario que en la combustión completa. Como el combustible no se oxida completamente, se forman sustancias que todavía pueden seguir oxidándose; por ejemplo CO . Estas sustancias se denominan inquemados. La presencia de inquemados indica que la combustión se está realizando en forma incompleta.

Otros inquemados pueden ser H_2 , C_nH_m , H_2S y C . Estas sustancias son los contaminantes más comunes que escapan a la atmósfera en los gases de combustión.

Combustión teórica o estequiométrica.

Es la combustión que se realiza con la cantidad teórica de oxígeno estrictamente necesaria para producir la oxidación total del combustible sin que se produzcan inquemados. En consecuencia, no se encuentra O_2 en los humos, ya que dicho O_2 se consumió totalmente durante la combustión.

Esta combustión se denomina teórica porque en la práctica siempre se producen inquemados, aunque sea en muy pequeña proporción.

Combustión con exceso de aire.

Es la combustión que se lleva a cabo con una cantidad de aire superior a la estequiométrica. Esta combustión tiende a no producir inquemados. Es típica la

presencia de O₂ en los humos.

Si bien la incorporación de aire permite evitar la combustión incompleta y la formación de inquemados, trae aparejada la pérdida de calor en los productos de combustión, reduciendo la temperatura de combustión, la eficiencia y la longitud de llama.

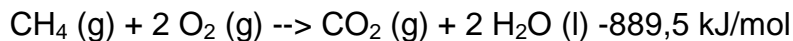
Combustión con defecto de aire.

En esta combustión, el aire disponible es menor que el necesario para que se produzca la oxidación total del combustible. Por lo tanto, se producen inquemados.

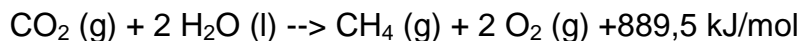
3.2.2 Leyes Termoquímicas - Entalpía de formación.

1 - A. L. Lavoisier y P. S. Laplace (1780) enunciaron una ley que establece que: “la cantidad de calor que debe suministrarse a un compuesto para descomponerlo en sus partes es igual a la involucrada cuando se forma dicho compuesto a partir de sus elementos”.

Ejemplo:



y



si ambas reacciones ocurren a 298,15 K .

2 - En 1840, G. H. Hess desarrolló la ley de la suma de calores constantes. Esta ley sostiene que “la resultante del calor intercambiado a presión o volumen constantes, en una dada reacción química, es la misma si tiene lugar en una o varias etapas”. Esto significa que el calor neto de reacción depende solamente de los estados inicial y final.

La Entalpía de Formación de un Compuesto, representada por \bar{h}_f^0 es la cantidad de calor desprendido o absorbido, según si la reacción es exotérmica o endotérmica, respectivamente, cuando un compuesto se forma a partir de sus elementos. El subíndice “f” indica la formación del compuesto y el superíndice “0” se refiere a que todos los reactivos y productos están en su estado estándar. Por ejemplo h_f^0 para el Metano (CH₄):

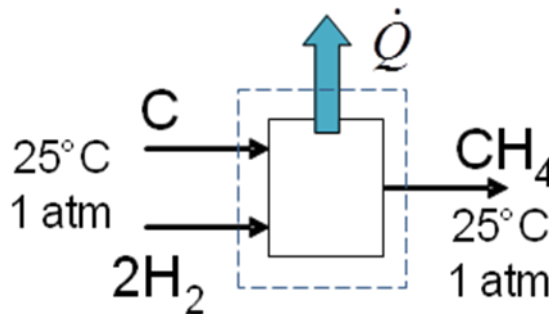


Figura 3.2.2.1 – Reacción exotérmica en la formación del Metano.

En una reacción de combustión dada, se puede deducir el calor de formación del CH₄ a partir de los calores de formación del H₂O y CO₂ y el calor de combustión, Figura 3.3.2.

$$\Delta H_{f, CH_4(g)}^p = \Delta H_{f, CO_2(g)}^p + 2 \Delta H_{f, H_2O(g)}^p - \Delta H_r$$

Figura 3.2.2.2 – Combustión de CH₄ produce reacción exotérmica.

Es decir, que los calores de reacción (también llamados de combustión en el caso de este Proyecto) se pueden usar para determinar calores de formación de las sustancias. Por ejemplo, a partir de calores de combustión medidos experimentalmente en el laboratorio, se pueden determinar los calores de formación de algunos compuestos. De todas formas, el estudio de esta parte del Proyecto se centra en hallar los calores de combustión de un motor de combustión interna a partir

de los calores de formación de los compuestos que forman el Gas natural usado como combustible.

Molar Specific Enthalpy of Formation at 25.0°C (77.0°F) and 0.100 MPa			
Substance	M kg/kgmole or lbm/lbmole	\bar{h}_f°	
		MJ/kgmole	Btu/lbmole
Carbon monoxide, CO(g)	28.011	-110.529	-47,522
Carbon dioxide, CO ₂ (g)	44.011	-393.522	-169,195
Sulfur dioxide, SO ₂ (g)	64.07	-296.83	-127,622
Water, H ₂ O(g)	18.016	-241.827	-103,973
Water, H ₂ O(l)	18.016	-285.838	-122,896
Methane, CH ₄ (g)	16.043	-74.873	-32,192
Acetylene, C ₂ H ₂ (g)	26.038	+226.731	+97,483
Ethylene, C ₂ H ₄ (g)	28.054	+52.283	+22,479
Ethane, C ₂ H ₆ (g)	30.070	-84.667	-36,403
Propane, C ₃ H ₈ (g)	44.097	-103.847	-44,649
Butane, C ₄ H ₁₀ (g)	58.124	-126.148	-54,237
Benzene, C ₆ H ₆ (g)	78.114	+82.930	+35,656
Octane, C ₈ H ₁₈ (g)	114.23	-208.447	-89,622
Octane, C ₈ H ₁₈ (l)	114.23	-2411.952	-107,467
Carbon, C(s)	12.011	0	0
Oxygen, O ₂ (g)	32.00	0	0
Hydrogen, H ₂ (g)	2.016	0	0
Nitrogen, N ₂ (g)	28.013	0	0

Note: Here, (g) indicates gas or vapor state and (l) indicates liquid state.

Source: Van Wylen, G. J., Sonntag, R. E., 1976. *Fundamentals of Classical Thermodynamics, SI Version, second ed.* Wiley, New York, p. 496 (Table 12.3). Copyright © 1976 John Wiley & Sons. Reprinted by permission of John Wiley & Sons.

Figura 3.2.2.3 – Entalpías de formación de diversas sustancias.

4 NORMAS Y REFERENCIAS.

4.1 Disposiciones legales y normas aplicadas.

Se tienen en cuenta para la elaboración de este Proyecto las siguientes disposiciones legales/Normas:

- ISO 3046-1:2002. Esta Norma especifica los requerimientos para la declaración de potencia, consumo de combustible, consumo de aceite lubricante. Se aplica para máquinas de combustión interna alternativas terrestres como las de una planta de potencia, ferroviarias o marinas, que es el caso de este Proyecto.
- UNE 50132:94. Numeración de las divisiones y subdivisiones en los documentos escritos
- UNE Serie 1000. Cajetines, indicaciones y plegados.
- ISO 14001:2004. Sistemas de Gestión ambiental.
- ISO 8178-9:2012. Es una Norma Internacional sobre las medidas de emisiones de escape de motores off-road.
- OHSAS 18001:2007. Especifica los requisitos para un sistema de gestión de la Seguridad y la Salud en el Trabajo (SST).
- UNE-EN-ISO 9001:2008. Sistema de Gestión de la Calidad. El estar en posesión de esta certificación indica capacidad para proporcionar de forma coherente productos o servicios que satisfacen los requisitos del cliente y los reglamentarios aplicables.

- UNE 82100-11:1996. Magnitudes y unidades. Parte 11: Signos y símbolos matemáticos para su uso en las ciencias físicas y en tecnología.
- UNE 50- 132:94. Numeración de las divisiones y subdivisiones en los documentos escritos.
- NOx Technical Code de 2008: "Amendments to the technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines".
- UNE 157001 - Criterios de elaboración de proyectos. Según esta norma, se deben incluir por separado, como documentos básicos, las mediciones y el presupuesto. El presupuesto será dividido en los siguientes capítulos: Estado de Mediciones, Precios unitarios, Precios descompuestos, Presupuestos parciales, presupuesto Total.

4.2 Bibliografía / Referencias.

KUIKEN, KEES (2012): *Diesel Engines for Ship Propulsion and Power Plants*, 2ª edición. Editorial: Target Global Energy Training. ISBN:9789079104000.

RALPH H. PETRUCCI (2011): *Química General*, 10ª edición. Editorial: Prentice-Hall. ISBN: 9788483226803.

MICHAEL J. MORÁN, HOWARD N. SHAPIRO (2014): *Fundamentos de Termodinámica Técnica*, 2ª edición. Editorial: Reverté. ISBN: 9788429143799.

NIELS B. CLAUSEN (2009): *Marine Diesel Engines How Efficient can a Two-Stroke Engine be?*. Recuperado de: <http://www.ship-efficiency.org/onTEAM/pdf/Clausen.pdf>

KLAUS WIRTH (2009): *Emissions Reduction for MaK Engines*. Recuperado de: <http://www.ship-efficiency.org/onTEAM/pdf/Wirth.pdf>

OSKAR LEVANDER (2009): *Gas as marine fuels – operational aspects*. Recuperado de: <http://www.ship-efficiency.org/onTEAM/pdf/Gas as a marine fuel.pdf>

KEITH FORGET (2007): *The changing Face of Marine Fuels and the Effects on Ship Operations*. Recuperado de: <http://www.ship-efficiency.org/onTEAM/pdf/FORGET.pdf>

Jerzy Herdzyk (2011): *LNG AS A MARINE FUEL – POSSIBILITIES AND PROBLEMS*. Recuperado de: <http://www.kones.eu/ep/2011/vol18/no2/22.pdf>

Wärtsilä Corporation (2014): *Wärtsilä and MAN Diesel & Turbo initiate HERCULES-2 research project aimed at minimizing emissions*. Recuperado de: <http://www.wartsila.com/media/news/22-09-2014-wartsila-and-man-diesel-turbo-initiate-hercules-2-research-project-aimed-at-minimizing-emissions>

(2012): *HERCULES High-efficiency Engine R&D on Combustion with Ultra-low Emissions for Ships*. Recuperado de: http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/hercules_en.htm

(2015): *HERCULES-2 The Programme*. Recuperado de: <http://www.hercules-2.com/>

4.3 Programas de Cálculo.

- Engineering Equation Solver (EES). v 9.24.
- SmartDraw 2013. Para la realización del esquema de la instalación.
- Menfis 8.1.6. Para la elaboración del Presupuesto del Proyecto.

5 DEFINICIONES Y ABREVIATURAS.

Símbolos	Se refiere a	Unidad
c_{ec}	Consumo específico de combustible	g/kWh
c_p	Calor específico a presión constante	kJ/kg·K
h	Entalpía específica	kJ/kg
\bar{h}_f^0	Entalpía de formación molar	kJ/kmol
\dot{m}	Flujo másico	kg/s
n	Número de moles	-
n_r	nº moles reactivos	-
n_p	nº moles productos	-
p	presión	10 ⁵ Pa (1 bar)
q	Energía calorífica específica	kJ/kg
\dot{Q}	Potencia calorífica	kW
Q	Energía calorífica	kJ
T	Temperatura	°C
v	Volumen específico	m ³ /kg
\bar{v}	Volumen específico molar	m ³ /kmol
w	Trabajo específico	kJ/kg
\dot{W}	Potencia	kW
η	Eficiencia térmica	-
η_{comb}	Eficiencia combustión	-
η_{mec}	Rendimiento mecánico	-
η_{tot}	Rendimiento total	-

6 ANALISIS DE SOLUCIONES.

La automatización de la adquisición y procesamiento de los datos en tiempo real de caudal de combustible, temperaturas, potencia efectiva, gases medidos en el escape etc..., para llegar a obtener los cálculos y gráficos mostrados en este Proyecto requiere desarrollos complejos así como un software propio...

Sin embargo, los equipos y aparatos de medida utilizados en este Proyecto permiten la comunicación con un PC, siendo posible hacer lecturas, en formato .txt por ejemplo, de todos los parámetros estudiados a distintas rpm y cargas del motor. El uso del software EES es la herramienta utilizada tras la adquisición de datos para realizar el estudio.

7 RESULTADOS FINALES.

- En los próximos Apartados se describen las pruebas que se realizan al motor.
- Se hará referencia desde cada Apartado a los Anexos que muestren los cálculos desarrollados en EES cuando sea necesario.
- Es importante tener en cuenta que tras haber obtenido el Poder Calorífico Inferior (PCI) del combustible de un motor de Gas Natural (Apartado 7.1) por no estar dicho valor recogido en normativa como en el caso de los combustibles líquidos en la Norma ISO 8217, el resto de cálculos de proyecto a partir de aquí es común para motores que consuman Gas Natural, MDO o Fuel Oil.
- El motor elegido como para mostrar las tablas de información de datos obtenidos por los aparatos y equipos de medida es un ABC, Tipo 6MDZ-500-072A. Figura 7.1.

Engine		
Manufacturer	ABC	
Engine type	6MDZ-500-072A	
Engine family or engine group identification		
Serial number	12118	
Rated speed	750	rpm
Rated power	787	kW
Intermediate speed	--	rpm
Maximum torque at intermediate speed	--	Nm
Static injection timing (code)	b.t.d.c.	
Electronic injection control	No	
Variable injection timing		
Variable turbocharger geometry		
Bore	256	mm
Stroke	310	mm
Nominal compression ratio		
Mean effective pressure, at rated power	1007	kPa
Maximum cylinder pressure, at rated power	--	kPa
Cylinder number and configuration	6	
Auxiliaries	--	

Figura 7.1 – Características motor ABC 6MDZ-500-072A

7.1 Motor que consume Gas Natural.

Los cálculos desarrollados para obtener el Poder calorífico Inferior de un combustible de Gas Natural pueden consultarse en el **ANEXO 1. CÁLCULO DEL PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) DE UN COMBUSTIBLE LNG.**

A diferencia de lo que ocurre con los motores que consumen combustibles líquidos en los cuales las características de los combustibles, incluido el PCI, están basadas en la ISO 8217:2012 (E), los motores de gas no tienen una Norma fija que establezca sus especificaciones, incluido Poder Calorífico Inferior (PCI), por eso éste es hallado en este Proyecto.

Para el estudio de la combustión en un motor de Gas Natural, se aplica un balance energético al volumen de control formado por la cámara de combustión:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} * (h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1) - \dot{m} * (h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2)$$

Que considerando:

- El volumen de control se mantiene en estado estacionario.
- Descarte de los efectos de la energía cinética y potencial.
- Teniendo en cuenta que no se realiza trabajo.
- Y que las entalpías se expresan en kJ/kmol.

Nos queda la expresión:

$$\bar{q}_{vc} = (x + n_v) * (\bar{h}_{for,H_2O_{gas}}) + y * (\bar{h}_{for,CO_2_{gas}}) - \bar{h}_{for,GN} + n_v * \bar{h}_{for,H_2O_{gas}}$$

Obteniendo como resultado final el calor de combustión, en kJ/kmol y que expresado en kJ/kg es el Poder Calorífico de ese combustible.

El calor de combustión puede ser considerado como un caso particular del calor de reacción. El **calor de combustión** de una sustancia es el calor liberado cuando un mol de combustible (por lo general un hidrocarburo) reacciona con el oxígeno para dar H₂O y CO₂.

Estos motores tienen cada vez más uso debido a las ventajas que ofrece este combustible: es más barato que los combustibles líquidos y genera menos residuos con el beneficio tanto para el medio ambiente como para el propio motor.

Son realmente motores duales capaces de consumir MDO/IFO y Gas Natural pero están diseñados con el objetivo de trabajar la mayor parte del tiempo como motores de Gas natural.

7.1.1 Recomendaciones de WÄRTSILÄ y MAN acerca del GN.

Los grandes fabricantes como WÄRTSILÄ y MAN recomiendan las características que deben tener los combustibles para garantizar una operación continua del motor sin que haya pérdidas de carga.

WÄRTSILÄ establece que debe cumplir con las siguientes características:

Property	Unit	Value
Lower heating value (LHV), min ¹⁾	MJ/m ³ N ²⁾	28
Methane number (MN), min ³⁾		80...90
Methane (CH ₄), min	% volume	70
Hydrogen sulphide (H ₂ S), max	% volume	0.05
Hydrogen (H ₂), max ⁴⁾	% volume	3
Ammonia, max	mg/m ³ N	25
Chlorine + Fluorines, max	mg/m ³ N	50
Particles or solids at engine inlet, max	mg/m ³ N	50
Particles or solids at engine inlet, max size	um	5
Gas inlet temperature	°C	0...60
Water and hydrocarbon condensates at engine inlet not allowed ⁵⁾		

Tabla 7.1.1.1 – Requisitos de WÄRTSILÄ para el combustible de sus motores DF

Acerca de esta tabla es importante aclarar los parámetros 1,2,3,4,5 indicados:

1) Es el Poder Calorífico Inferior del Gas a utilizar por el motor. La variación de este parámetro supondrá que la presión de inyección del gas variará también.

2) Son las unidades del PCI, en este caso MJ/m³ pero se expresará como kJ/kg en este proyecto.

3) Número de metanos del combustible.

4) Un volumen de hidrógeno mayor al 3% ha de ser considerado para saber si es apropiado para la instalación.

5) El punto de rocío del combustible está por debajo de la temperatura y presión mínimas de trabajo.

Por otro lado, MAN menciona en sus manuales la necesidad de que el gas a utilizar cumpla con las regulaciones del Gas Natural:

- Que llegue al motor libre de suciedad.
- Seco, libre de agua o aceites.
- Tener un bajo nivel de sulfuros.

La característica más importante de los combustibles gaseosos es que tengan un alto poder anti-knocking. El índice anti-knocking en estos combustibles es el Número de Metano (MN). Los combustibles gaseosos son mezcla de varios componentes y si su Número de Metano es muy bajo provocará golpeteo en el motor causado por una ignición a destiempo de la mezcla aire-combustible y que causará presiones y temperaturas por encima de los valores normales.

7.2 Humedad relativa del aire de admisión.

Conociendo las condiciones de entrada del aire de admisión es posible conocer el número de moles de agua que éste contiene y que se añaden al resultado de agua en estado gas en los productos de la reacción de combustión.

Esto es importante porque a mayor cantidad de vapor de agua (H_2O_{gas}) en los gases de escape, la temperatura a la que el agua pasa a estado líquido será cada vez más alta para la presión del colector existente lo que puede dar lugar a la formación de compuestos químicos corrosivos.

Cálculos desarrollados en el programa EES en el **“ANEXO 2. AGUA EN FORMA DE VAPOR EN EL AIRE DE ADMISIÓN.”**

7.3 Verificación de Potencia y Curvas Características.

Cálculos desarrollados en “**ANEXO 3. VERIFICACIÓN DE POTENCIA Y CURVAS CARACTERÍSTICAS**”.

Mediante los aparatos de medida descritos en el Documento “Especificaciones y pliego de condiciones”:

- Tacómetro Digital RM-1501.
- Torsiómetro del Fabricante KTR.
- Caudalímetro del fabricante KRAL, modelo J5025, BEM 500.

Obtenemos los valores de rpm, Par(N*m) en el eje de cola y flujo másico (kg/s) de combustible.

Obtenemos un gráfico que relaciona Potencia y régimen de giro, Figura 7.3.1 .

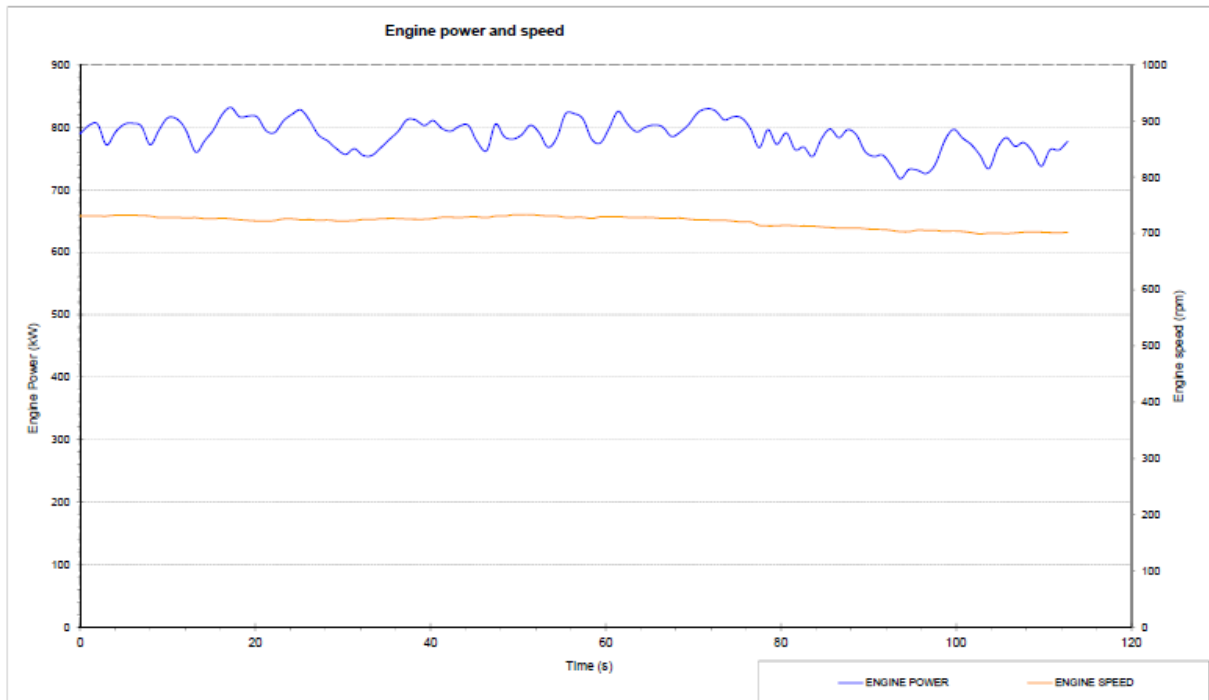


Figura 7.3.1 – Relación entre Potencia y rpm del motor.

Mediante el dato de flujo másico de combustible y Potencia efectiva se obtiene el consumo específico del combustible, se puede presentar un gráfico que relacione este consumo a una velocidad constante y teniendo en cuenta las distintas cargas en las que se hacen mediciones al motor, Figura 7.3.2.

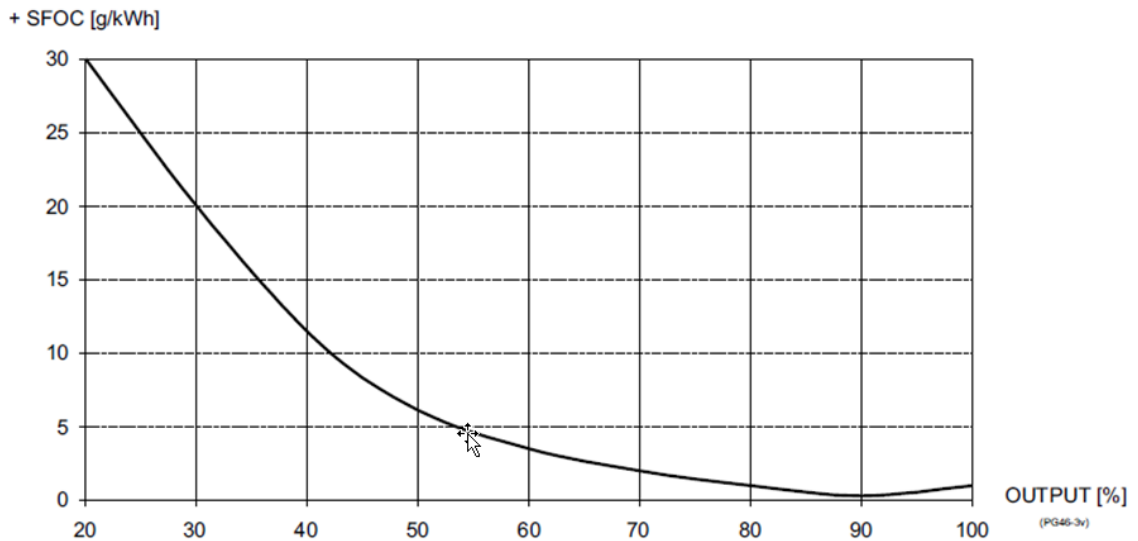


Figura 7.3.2 - Consumo específico del combustible (cec) a velocidad cte.

Y con los datos de de consumo específico del combustible (c.e.c.) junto a la Potencia y par Motor ya conocidos, obtenemos la Tabla de la Fibura 7.3.3 .

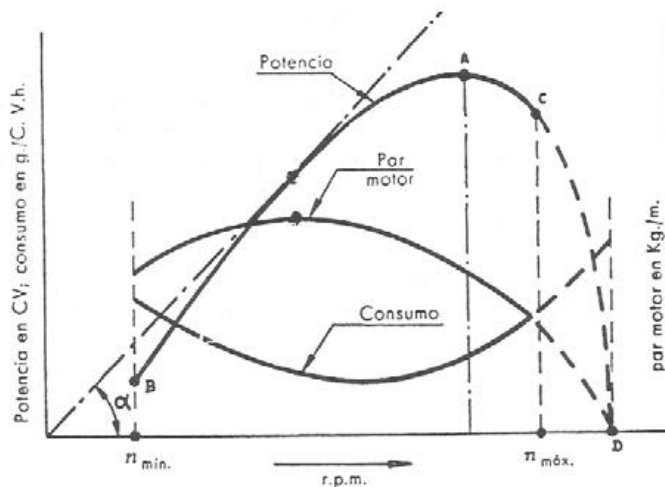


Figura 7.3.3 - Curvas de potencia P_e , par motor M_m y cec

7.4 Calor aportado por el aire de admisión.

Una aproximación adecuada para conocer los kW que se está generando en las cámaras de combustión de los cilindros, sería realizar el producto del flujo másico de combustible, obtenido en tiempo real mediante caudalímetro KRAL BEM 500 descrito en el Documento Básico “Pliego de Condiciones”, por el Poder Calorífico Inferior del combustible del motor. Pero el Poder Calorífico de un combustible está hallado según Condiciones Estandar, así lo indica la Norma ISO 3046-1:2002, que determina las condiciones ambientales de operación de los motores, destacando:

- Presión atmosférica: 100 kPa.
- Temperatura del aire: 25 °C .
- Humedad relative: 30%.
- Temperatura del agua refrigerante en el enfriador del aire de admisión: 25 °C

Por lo que tener en cuenta la T del aire de admisión, en torno a un rango entre 50/60 °C según el motor, puede ofrecer un resultado de potencia máxima teórica más exacto.

Teniendo los datos de T y p del aire de admisión, proporcionados por el aparato de medida COMET T7511, es posible hallar en el programa EES el valor del calor específico del aire, como fluido real, para esas condiciones. Así:

$$c_{p\text{air};\text{inlet}} = \mathbf{Cp} ('Air_{ha}'; T = T_{\text{aire};\text{admision}}; P = p_{\text{aire};\text{admision}}) \quad (7.4.1)$$

Donde la T del aire de admisión es la diferencia entre la T medida en el colector de admisión y la T del aire atmosférico que llega al motor, este aumento de T y p adquirido por el aire atmosférico son en definitiva un aprovechamiento de la energía contenida en los gases de escape mediante el salto entálpico en la turbina del turbocompresor.

Teniendo en cuenta que son datos conocidos los flujos másicos de gases de escape, medidos por el equipo TESTO MARITIME 350 y del combustible, hallado con el caudalímetro KRAL BEM 1000. Y sabiendo que la materia se transforma durante un proceso de combustión pero no se destruye, mediante la diferencia entre el flujo másico de los gases de escape y el flujo másico de combustible, es posible conocer el flujo másico del aire de la combustión.

$$\dot{m}_{\text{aire;combustion}} = \dot{m}_{\text{gases;GN}} - \dot{m}_{\text{GN}} \quad (7.4.2)$$

$$\dot{m}_{\text{aire;admision}} = \dot{m}_{\text{aire;combustion}} \cdot 3 \quad (7.4.3)$$

Mediante la siguiente expresión, se obtienen los kW aportados por el aire de combustión:

$$\dot{Q}_{\text{aire;combustion}} = \dot{m}_{\text{aire;combustion}} \cdot c_{p\text{air;inlet}} \cdot T_{\text{aire;admision}} \quad (7.4.4)$$

Además, en los motores donde el combustible es Fuel-Oil residual, éste debe tener una temperatura aproximada de 80 °C cuando llega a la bomba de inyección, esta energía calorífica que aporta el combustible también es importante. La Figura 7.4.1 muestra el diagrama temperatura-viscosidad para determinar la T a la que debe ser precalentado el combustible líquido según el tipo.

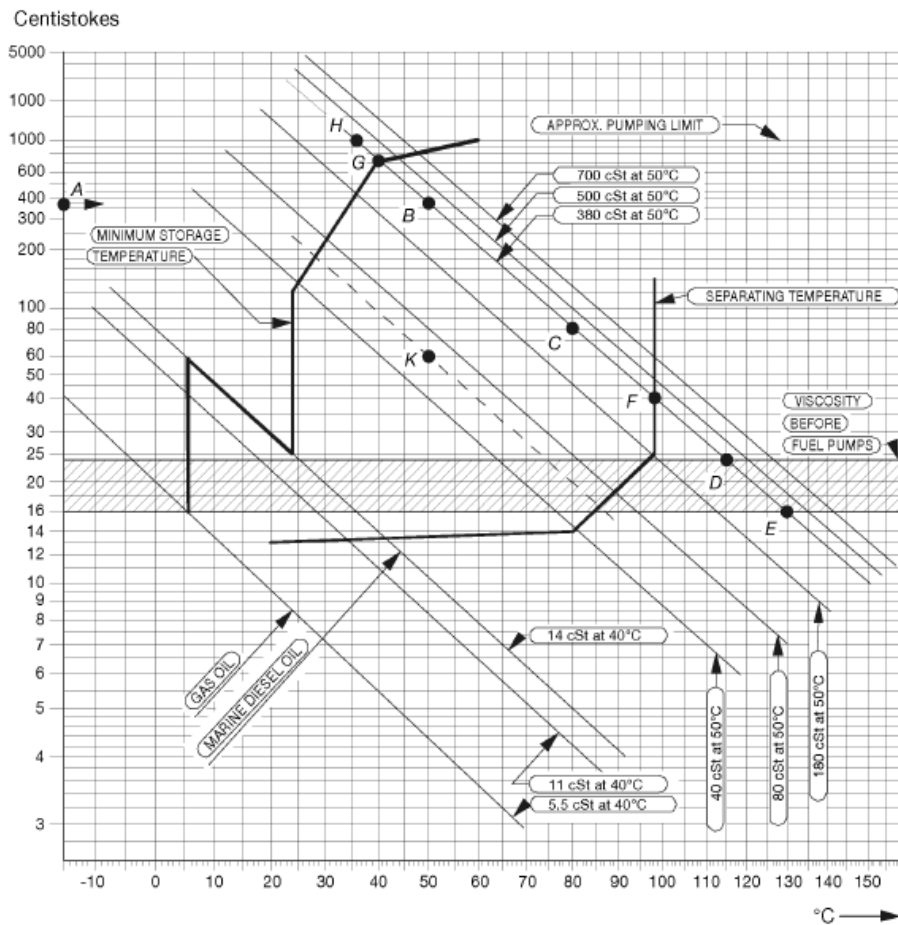


Figura 7.4.1 - Diagrama temperatura-viscosidad para el combustible líquido

La Norma ISO 3046-1:2002 establece de todas formas Tablas de factores de corrección que nos permitan tener en cuenta la T del aire de admisión del motor para saber su influencia en los gases de escape o agua de refrigeración, entre otros. Figuras 7.4.2 y 7.4.3 .

Influence of suction air temperature

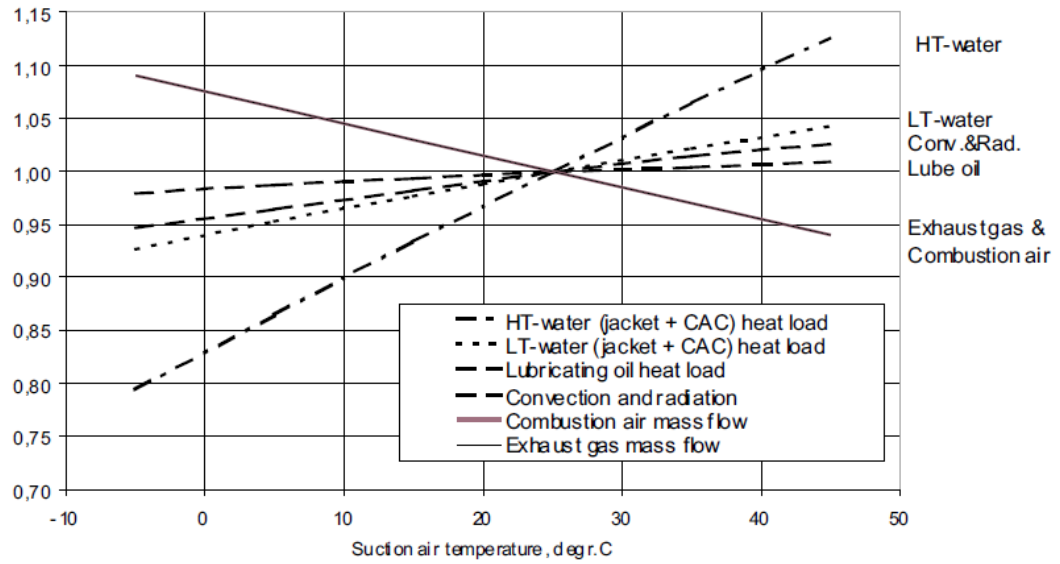


Figura 7.4.2 - Influencia de la T aire de admisión.

Influence of suction air temperature on exhaust gas temperature

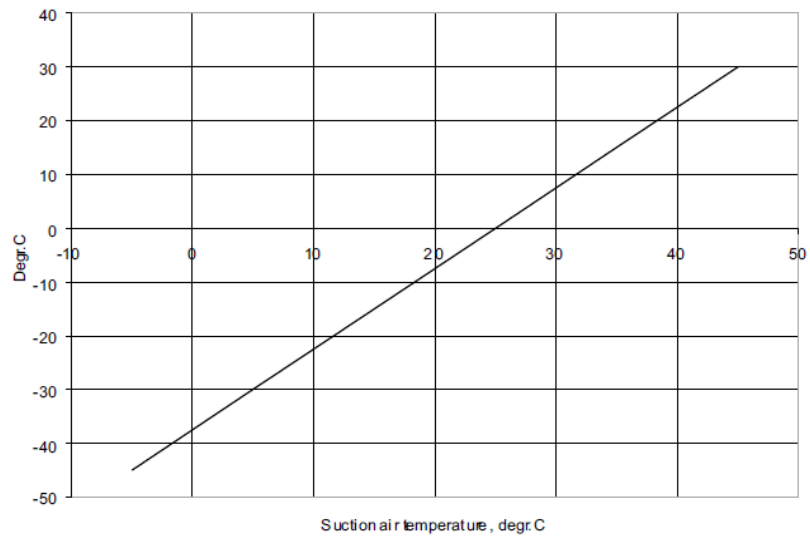


Figura 7.4.3 - Influencia de la T del aire de admisión.

7.5 Eficiencia y pérdidas.

Tan sólo una parte relativamente pequeña de la energía contenida en el combustible es convertida en trabajo mecánico.

La relación entre energía suministrada por el combustible, expresada a través del Poder Calorífico Inferior (PCI) multiplicado por el flujo másico de combustible \dot{m} :

$$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} (\text{PCI}) \times \frac{\text{kg}}{\text{s}} = \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \quad (7.5.1)$$

Y la potencia en el eje o Potencia Efectiva expresada, en kW, supone conocer la eficiencia total del motor:

$$\text{eficiencia} = \frac{\text{Pot.efectiva}}{\dot{m} \cdot \text{PCI}} \quad (7.5.2)$$

La eficiencia de pequeños motores diesel ronda el 25 % mientras que éste puede alcanzar el 55 % en grandes motores marinos o industriales.

La energía restante desde la que aporta el combustible (100%) a lo que aprovecha el motor en el eje de cola (25-55%) se pierde en forma de calor en su mayoría, Figura 7.5.1, y en menor medida por pérdidas mecánicas.

Las pérdidas en forma de calor se producen a través de:

- Gases de escape.
- Agua de refrigeración.
- Aceite de lubricación.
- Enfriador de aire de admisión.
- Radiación.

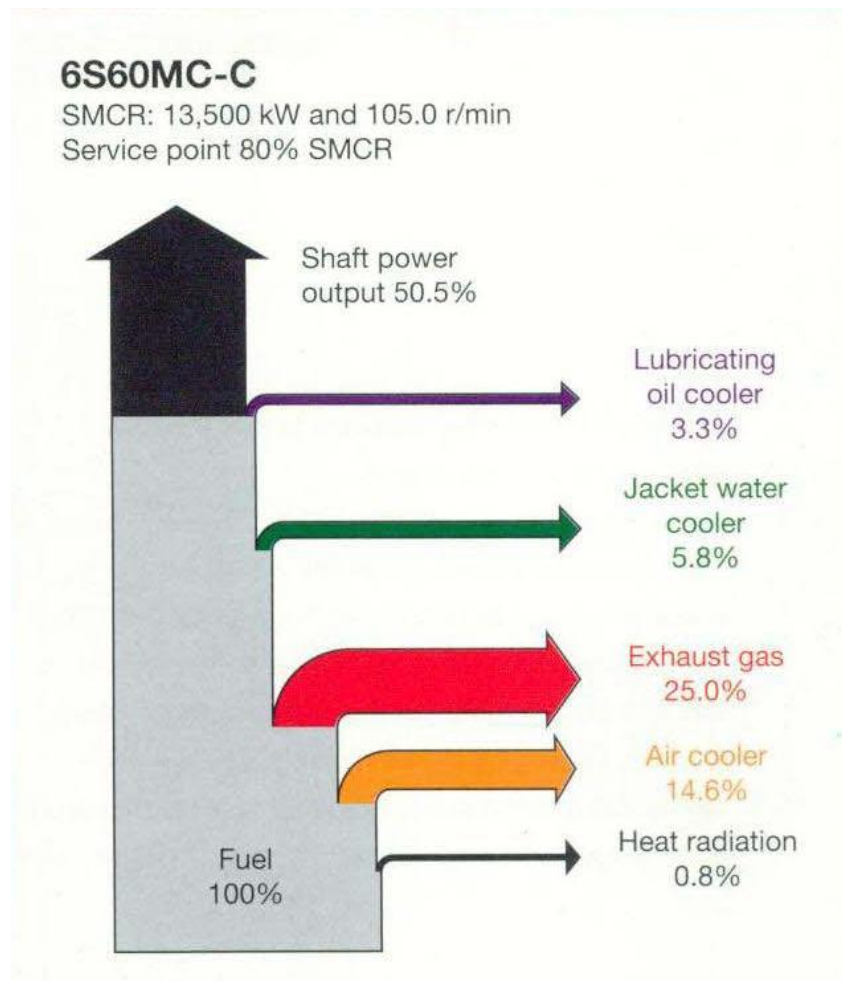


Figura 7.5.1 - Diagrama de Sankey de un motor.

7.6 Emisiones medidas en los gases de escape.

El equipo de medida de emisiones Testo Maritime 350 nos permitirá obtener medidas precisas, a distintos porcentajes de rpm / Par Motor.

Los datos son recogidos a modo de ejemplo en la Tabla 7.6.1, donde se relacionan las emisiones con 3 medidas de régimen de funcionamiento del motor, correspondientes a un Motor ABC Tipo 6MDZ-500-072A.

Mode		1	2	3	4
Power/Torque	%		75	50	25
Speed	%		91	80	63
Time at beginning of mode			17:33	17:27	17:23

Ambient Data					
Atmospheric pressure	kPa		102,2	102,2	102,2
Intake air temperature	°C		35,1	34,9	35,4
Intake air humidity	g/kg		8,5	8,5	8,7
Relative humidity (RH) of intake air	%		24,5	24,6	24,6
Air temperature at RH sensor	°C		35,1	34,9	35,4
Test condition parameter (f_a)			1,039	1,037	1,040

Gaseous Emissions Data:					
NOx concentration dry	ppm		555	673	887
CO concentration dry	ppm		165	132	86
CO ₂ concentration dry	%		4,95	4,87	4,31
O ₂ concentration dry	%		14,15	14,27	15,02
HC concentration	ppm de C		--	--	--
NOx humidity correction factor (k_{hd})			0,996	1,001	1,006
Dry/wet correction factor (k_{wr})			0,950	0,951	0,955
NOx mass flow	kg/h		4,640	3,660	2,540
CO mass flow	kg/h		0,840	0,440	0,150
CO ₂ mass flow	kg/h		397,350	252,770	117,370
O ₂ mass flow	kg/h		826,540	538,820	297,110
HC mass flow	kg/h		--	--	--
NOx specific	g/kWh		7,740	9,630	13,290

Tabla 7.6.1 - Ejemplo de resultados medición emisiones de escape.

Con estas medidas se podrá valorar tanto:

- La calidad de la combustión. A la que se hace referencia en el apartado **“3.2 Conceptos importantes sobre Combustión”**.
- Si las emisiones de NO_x y SO_x cumplen con las Normativas anticontaminación del Convenio MARPOL visto en el apartado **“3.1 Preocupación por el medio ambiente y Normativas”**.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
NÁUTICA Y MÁQUINAS

TÍTULO: “MAIN ENGINE EFFICIENCY STUDY”

ANEXOS

**GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS
ENERGÍA Y PROPULSIÓN**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

FECHA: **SEPTIEMBRE 2016**

AUTOR: José Luis Ferreiro Castiñeira

Fdo. :

ÍNDICE ANEXOS

1 CÁLCULO DEL PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) DE UN COMBUSTIBLE LNG.....	52
2 AGUA EN FORMA DE VAPOR EN EL AIRE DE ADMISIÓN.....	61
3 VERIFICACIÓN DE POTENCIA Y CURVAS CARACTERÍSTICAS.....	63

ANEXO 1. CÁLCULO DEL PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI) DE UN COMBUSTIBLE LNG.

Los combustibles LNG están formados por una mezcla de sustancias en las cuales la mayor parte es metano y en menor medida, etano, propano y butano en distintas proporciones según la procedencia del combustible.

El programa desarrollado en el software Engineering Equation Solver (EES), para el cálculo de la energía obtenida en un motor con un combustible con base de Metano comienza aportando datos de las entalpías de formación, en kJ/kmol, de los diferentes productos y reactivos típicos de una reacción de combustión de LNG en una cámara de combustión de un motor Dual Fuel:

$$\bar{h}_{\text{for};\text{CO}_2;\text{g}} \text{ [kJ/kmol]} = - 393520$$

$$\bar{h}_{\text{for};\text{H}_2\text{O};\text{g}} \text{ [kJ/kmol]} = - 241820$$

$$\bar{h}_{\text{for};\text{H}_2\text{O};\text{l}} \text{ [kJ/kmol]} = - 285830$$

$$\bar{h}_{\text{for};\text{NH}_3;\text{g}} \text{ [kJ/kmol]} = - 46190$$

$$\bar{h}_{\text{for};\text{CH}_4;\text{g}} \text{ [kJ/kmol]} = - 74850$$

$$\bar{h}_{\text{for};\text{C}_2\text{H}_2;\text{g}} \text{ [kJ/kmol]} = 226730$$

$$\bar{h}_{\text{for};\text{C}_2\text{H}_6;\text{g}} \text{ [kJ/kmol]} = - 84680$$

$$\bar{h}_{\text{for};\text{C}_3\text{H}_8;\text{g}} \text{ [kJ/kmol]} = - 103850$$

$$\bar{h}_{\text{for};\text{C}_4\text{H}_{10};\text{g}} \text{ [kJ/kmol]} = -126150$$

$$\bar{h}_{\text{for};\text{C}_8\text{H}_{18};\text{g}} \text{ [kJ/kmol]} = -208450$$

$$\bar{h}_{\text{for};\text{C}_8\text{H}_{18};\text{l}} \text{ [kJ/kmol]} = -249910$$

Se crea una nomenclatura abreviada, más cómoda de manejar en los cálculos, para las masas moleculares de las sustancias implicadas, así:

$$M_{\text{Air}} \text{ [kg/kmol]} = \text{MolarMass} \text{ ['Air']}$$

$$M_{\text{S}} \text{ [kg/kmol]} = \text{MolarMass} \text{ ['S']}$$

$$M_{\text{H}_2} \text{ [kg/kmol]} = \text{MolarMass} \text{ ['H2']}$$

$$M_{\text{C}} \text{ [kg/kmol]} = \text{MolarMass} \text{ ['C']}$$

$$M_{\text{N}_2} \text{ [kg/kmol]} = \text{MolarMass} \text{ ['N2']}$$

$$M_{\text{CO}_2} \text{ [kg/kmol]} = \text{MolarMass} \text{ ['CO2']}$$

$$M_{\text{H}_2\text{O}} \text{ [kg/kmol]} = \text{MolarMass} \text{ ['H2O']}$$

$$M_{\text{NH}_3} \text{ [kg/kmol]} = \text{MolarMass} \text{ ['NH3']}$$

$$M_{\text{CH}_4} \text{ [kg/kmol]} = \text{MolarMass} \text{ ['CH4']}$$

$$\dot{M}_{C_2H_2} \text{ [kg/kmol]} = \text{MolarMass} ['C_2H_2']$$

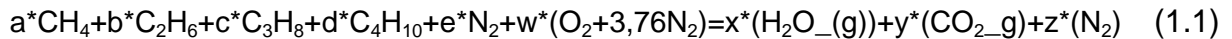
$$\dot{M}_{C_3H_8} \text{ [kg/kmol]} = \text{MolarMass} ['C_3H_8']$$

$$\dot{M}_{C_2H_6} \text{ [kg/kmol]} = \text{MolarMass} ['C_2H_6']$$

$$\dot{M}_{C_4H_{10}} \text{ [kg/kmol]} = \text{MolarMass} ['C_4H_{10}']$$

$$\dot{M}_{C_8H_{18}} \text{ [kg/kmol]} = \text{MolarMass} ['C_8H_{18}']$$

Seguidamente se plantea la expresión de Combustión estequiométrica. También se muestran las fracciones molares (a,b,c,d,e) del Gas natural que consume el motor. Donde la suma de a+b+c+d+e supone 1 kmol.



Las fracciones molares de los distintos componentes del combustible LNG son facilitadas en la hoja de características del combustible.

Basándose en esta reacción de combustión e introduciendo en el programa las fracciones molares a,b,c,d,e siguientes (como ejemplo):

“Un gas natural tiene el siguiente **análisis molar**: 80.62% de CH_4 , 5.41% de C_2H_6 , 1.87% de C_3H_8 , 1.60% de C_4H_{10} y 10.50% de N_2 ”.

Nos quedaría:

"a=0,8062	Fracción molar de metano. INPUT "
"b=0,0541	Fracción molar de etano. INPUT "
"c=0,0187	Fracción molar de propano. INPUT "
"d=0,0160	Fracción molar de butano. INPUT "
"e=0,105	Fracción molar de Nitrógeno. INPUT "

Se puede calcular la cantidad en moles de aire estequiométrico (w) y los moles correspondientes de los productos en forma de agua en estado gas, H₂O_(g), CO₂ y N₂ (x, y, z respectivamente) necesarios mediante un sistema de ecuaciones.

De la siguiente forma:

"C:"

$$a+2*b+3*c+4*d=y$$

"H:"

$$4*a+6*b+8*c+10*d=2*x$$

"O:"

$$2*w=x+2*y$$

"N2:"

$$3,76*w=z$$

Obteniendo en el software EES:

w (moles de aire estequiométrico)=1,99

x (moles de agua en forma de vapor)=1,93

y (moles de CO₂)=1,035

z (moles de N₂)=7,517

A continuación se halla la masa molecular (M) equivalente de ese LNG como media de las masas moleculares de cada uno de los gases que lo forman:

$$M_{GN} = a \cdot M_{CH_4} + b \cdot M_{C_2H_6} + c \cdot M_{C_3H_8} + d \cdot M_{C_4H_{10}} + e \cdot M_{N_2} \quad (1.2)$$

Resultando:

$$M_{GN}=19,26 \text{ [kg/kmol]}$$

Se realiza el cálculo de la entalpía de formación equivalente a este Gas Natural según las fracciones molares dadas:

$$\bar{h}_{for;GN} = a \cdot \bar{h}_{for;CH_4;g} + b \cdot \bar{h}_{for;C_2H_6;g} + c \cdot \bar{h}_{for;C_3H_8;g} + d \cdot \bar{h}_{for;C_4H_{10};g} \quad (1.3)$$

La entalpía de formación de un elemento (N₂) es cero.

Obteniendo:

$$\bar{h}_{f_{or,CH_4}} = (-68886) \left[\frac{kJ}{kmol} \right]$$

Con estos datos, ya es posible llevar a obtener el calor obtenido o Poder calorífico Inferior, en kJ/kmol, en el volumen de control delimitado por la cámara de combustión durante la reacción de combustión del Gas Natural.

Si primero se plantea la expresión genérica de Balance energético:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \dot{m} * (h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gz_1) - \dot{m} * (h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gz_2) \quad (1.4)$$

Despreciando la influencia de la energía cinética y potencial la expresión queda:

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e * h_e - \sum \dot{m}_s * h_s$$

Además, considerando que la reacción de combustión ocurre en estado estacionario, donde

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = 0$$

Y que no se desarrolla trabajo en un proceso termodinámico de esta naturaleza, tenemos:

$$\dot{Q}_{vc} = \sum \dot{m}_s * h_s - \sum \dot{m}_e * h_e \quad (1.5)$$

Para el cálculo del Poder Calorífico Inferior no se necesita el flujo másico \dot{m} del gas natural consumido. Así que:

$$q_{vc} = \sum h_s - \sum h_e \quad (1.6)$$

Y como el estudio de la combustión en el Proyecto está siendo desarrollado con las entalpías de formación, con unidades en kJ/kmol:

$$\bar{q}_{vc} = \sum \bar{h}_{productos} - \sum \bar{h}_{reactivos} \quad (1.7)$$

Por último, teniendo en cuenta las fracciones molares de reactivos y productos:

$$\bar{q}_{vc} = (x + n_v) * (\bar{h}_{for,H_2O_{gas}}) + y * (\bar{h}_{for,CO_2_{gas}}) - \bar{h}_{for,GN} + n_v * \bar{h}_{for,H_2O_{gas}} \quad (1.8)$$

Donde las fracciones molares “x”, para el agua en forma de vapor de los productos e “y” para el dióxido de carbono han sido halladas en este mismo **ANEXO 1** .

Se representa en el balance los moles de vapor (n_v), hallados en el **ANEXO 2**, aportados por el aire de admisión y obtenidos según el aire estequiométrico necesario para la combustión calculado. No influyen en el resultado del balance

energético de la combustión (kJ/kmol) porque están como estado vapor en reactivos y así continúan en productos, pero es importante tenerlos en cuenta de cara a estudios sobre la Temperatura de Rocío existente en el colector de escape en previsión de la formación de sustancias químicas corrosivas como el H_2SO_4 .

El resultado del calor de combustión en kJ/kmol o Poder Calorífico Inferior calculado en el EES es el siguiente:

$$\bar{q}_{\text{aire;hum}} = (x + n_v) \cdot \bar{h}_{\text{for;H}_2\text{O;g}} + y \cdot \bar{h}_{\text{for;CO}_2\text{;g}} - (\bar{h}_{\text{for;GN}} + n_v \cdot \bar{h}_{\text{for;H}_2\text{O;g}})$$

$$\bar{q}_{\text{aire;sec}} = x \cdot \bar{h}_{\text{for;H}_2\text{O;g}} + y \cdot \bar{h}_{\text{for;CO}_2\text{;g}} - \bar{h}_{\text{for;GN}}$$

$$q_{\text{bar_con_aire_hum}} = -804802 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$q_{\text{bar_con_aire_sec}} = -804802 \text{ [kJ/kmol]}$$

Para obtener el PCI en kJ/kg se divide este resultado por la masa molecular (M):

$$\frac{PCI\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}}\right)}{M\left(\frac{\text{kg}}{\text{kmol}}\right)} = PCI\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right) \quad (1.9)$$

Resultando en EES:

$$PCI_{\text{GN;aire;hum}} = \frac{-\bar{q}_{\text{aire;hum}}}{M_{\text{GN}}}$$

$$PCI_{GN;aire;sec} = \frac{-\bar{q}_{aire;sec}}{M_{GN}}$$

$$PCI_{GN_aire_hum} = 41794 \text{ [kJ/kg]}$$

Para el combustible de Gas natural antes citado:

“Un gas natural tiene el siguiente **análisis molar**: 80.62% de CH₄, 5.41% de C₂H₆, 1.87% de C₃H₈, 1.60% de C₄H₁₀ y 10.50% de N₂”.

ANEXO 2. AGUA EN FORMA DE VAPOR EN EL AIRE DE ADMISIÓN.

Por ejemplo, considerando:

$\text{Hum}_{\text{rel};\text{aire}} = 80 \text{ [%]}$ Humedad relativa.

$T_{\text{aire};\text{admisión}} = 50 + 273,15 \text{ [K]}$ Temperatura en el colector de admisión.

Presión $\text{aire};\text{admisión} = 1,2 \text{ [bar]}$ p colector de admisión.

Presión atmosférica:

$$p_{\text{atm}} = 1,01325 \text{ [bar]}$$

Se halla la presión de saturación del aire a la T dada:

$$P_{\text{sat};\text{aire}} = P_{\text{sat}} (\text{'Water'} ; T = T_{\text{aire};\text{admisión}}) \quad (2.1)$$

Mediante la expresión siguiente se obtienen los kmol de aire seco estequiométrico:

$$n_a = w \cdot (1 + 3,76) \quad (2.2)$$

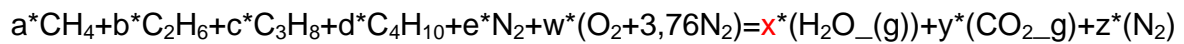
A continuación puede hallarse la presión de vapor de saturación para las condiciones dadas:

$$p_v = \frac{\text{Hum}_{\text{rel};\text{aire}}}{100} \cdot P_{\text{sat};\text{aire}} \quad (2.3)$$

Y en la ecuación siguiente se obtiene "n_v":

$$p_v = \left[\frac{n_v}{n_a + n_v} \right] \cdot p_{atm} \quad (2.4)$$

Este resultado son los kmol de vapor aportados con el aire y que se sumarán a los kmol resultado del proceso de combustión que como puede verse en la reacción de combustión, denominamos con la fracción molar "x" en este Proyecto :



Los resultados en EES son los siguientes:

$$P_{\text{sat_aire}} = 0,1238 \text{ bar .}$$

$$n_a = 9,516 \text{ kmol aire seco.}$$

$$p_v = 0,099 \text{ bar .}$$

$$n_v = 1,031 \text{ kmol vapor contenido en el aire admisión.}$$

ANEXO 3. VERIFICACIÓN DE POTENCIA Y CURVAS CARACTERÍSTICAS

Desarrollado con el software EES.

La Potencia efectiva es la potencia en el eje de cola y se obtiene multiplicando el par motor medio por el régimen, así:

$$\dot{W}_e = \bar{M}_m * 2 * \pi * n \quad (3.1)$$

Aprovechando la capacidad de estos aparatos de medida para enviar lecturas en forma de archivos .txt a un equipo informático, en intervalos de tiempo a elegir, es posible obtener los valores mostrados, como ejemplo, en las Tablas 3.1, 3.2 .

REGISTERED PARAMETERS

Hour	Time (s)	Engine power (kW)	Engine power (%)	Engine speed (rpm)	Engine speed (%)	Propeller shaft power (kW)	Propeller shaft speed (rpm)
16:47:44	0,00	789,30	98,70	730,80	97,40	769,60	208,80
16:47:45	1,00	802,60	100,30	731,00	97,50	782,50	208,90
16:47:46	2,00	804,70	100,60	731,00	97,50	784,60	208,90
16:47:47	3,00	771,70	96,50	730,60	97,40	752,40	208,70
16:47:48	4,00	791,10	98,90	732,50	97,70	771,30	209,30
16:47:49	5,00	804,20	100,50	732,50	97,70	784,10	209,30
16:47:50	6,00	806,10	100,80	732,30	97,60	786,00	209,20
16:47:51	7,00	801,30	100,20	731,90	97,60	781,30	209,10
16:47:52	8,00	771,90	96,50	730,80	97,40	752,60	208,80
16:47:53	9,00	795,20	99,40	728,30	97,10	775,40	208,10
16:47:54	10,00	814,70	101,80	728,30	97,10	794,40	208,10
16:47:55	11,10	812,60	101,60	728,30	97,10	792,30	208,10
16:47:56	12,10	794,30	99,30	727,40	97,00	774,50	207,80
16:47:57	13,20	760,10	95,00	727,90	97,00	741,10	208,00
16:47:58	14,20	777,80	97,20	726,20	96,80	758,40	207,50
16:47:59	15,20	795,10	99,40	726,20	96,80	775,20	207,50
16:48:00	16,20	819,80	102,50	727,00	96,90	799,30	207,70
16:48:01	17,20	831,40	103,90	725,80	96,80	810,60	207,40
16:48:02	18,20	816,50	102,10	724,10	96,50	796,10	206,90
16:48:03	19,20	817,70	102,20	723,20	96,40	797,30	206,60
16:48:04	20,20	816,30	102,00	722,00	96,30	795,90	206,30

Tabla 3.1 – Verificación de Potencia.

Y calcular fácilmente mediante herramientas ofimáticas la media de los valores:

	ENGINE POWER (kW)	ENGINE POWER (%)	ENGINE SPEED (rpm)	ENGINE SPEED (%)	PROPELLER SHAFT POWER [kW]	PROPELLER SHAFT SPEED [rpm]
MAX	831,40	103,90	733,30	97,80	810,60	209,50
MEAN	786,62	98,33	720,47	96,06	766,95	205,85
MIN	717,50	89,70	699,10	93,20	699,60	199,70

Tabla 3.2 – Verificación de Potencia: valores medios.

Para mostrar las Curvas Características, es necesario conocer el consumo específico del combustible (cec) hallado a partir del flujo másico (kg/s) y la potencia (kW), así.

$$cec_{real;GN} = \frac{\dot{m}_{GN}}{P_{e;real}} \cdot 1000 \cdot 3600 \cdot 1 \quad [g/kW-h] \quad (3.1)$$

Se prueba el ejemplo de un motor marino donde:

$$\dot{m}=127,2 \text{ kg/h}$$

Potencia efectiva 590,2 kW

En EES:

- Al 91% del régimen de giro:

$$m_dot_GN=127,2/3600 \text{ [kg/s]} \quad \text{"input, (caudalímetro)"}$$

$$P_e_real=599 \text{ [kW]} \quad \text{"POTENCIA EFECTIVA REAL DEL MOTOR: (INPUT, TORSIÓMETRO):"}$$

$$cec_real_GN=(m_dot_GN/P_e_real)*(1000*3600)[g/kW-h]$$

$$cec_real_GN=212,4 [g/kWh]$$

- Al 80% del régimen de giro:

$$m_dot_GN=80.9/3600 [kg/s] \quad \text{"input, (caudalímetro)"}$$

$$P_e_real=599 [kW] \quad \text{"POTENCIA EFECTIVA REAL DEL MOTOR: (INPUT, TORSIÓMETRO):"}$$

$$cec_real_GN=(m_dot_GN/P_e_real)*(1000*3600)[g/kW-h]$$

$$cec_real_GN=212,4 [g/kWh]$$

Con varias medidas de este tipo tomadas a diferente régimen de giro del motor es posible obtener las curvas de Potencia efectiva, Par Motor y consumo específico del combustible.

TÍTULO: “MAIN ENGINE EFFICIENCY STUDY”

PLIEGO DE CONDICIONES

**GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS
ENERGÍA Y PROPULSIÓN**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

FECHA: SEPTIEMBRE 2016

AUTOR: José Luis Ferreiro Castiñeira

Fdo.:

ÍNDICE PLIEGO DE CONDICIONES

1 LISTA DE EQUIPOS Y APARATOS DE MEDIDA.....	68
2 ANALIZADOR DE GASES TESTO 350 MARITIME.....	69
3 CAUDALÍMETRO COMBUSTIBLE KRAL BEM 1000.....	71
3.1 Medida diferencial de combustible consumido.....	72
3.2 Variaciones de temperatura del combustible.....	72
3.3 Compensación de ondas de presión.....	73
4 TACÓMETRO DIGITAL RM-1501.....	74
5 TORSIÓMETRO DEL FABRICANTE KTR.....	75
6 MEDIDOR DE T Y HUMEDAD COMET T7511.....	77
7 MEDIDOR DE T DANFOSS, MODELO MBT 5250.....	78
8 PORTÁTIL TOSHIBA 13,3" SATELLITE Z30-B-15M.....	79
9 TABLA CARATERÍSTICAS APARATOS/EQUIPOS DE MEDIDA.....	80
10 NORMAS Y/O CERTIFICADOS CALIDAD.....	81

1 LISTA DE EQUIPOS Y APARATOS DE MEDIDA

Este documento del Proyecto tiene como objetivo establecer las condiciones técnicas, económicas, administrativas y legales para que el objeto del Proyecto pueda materializarse en las condiciones especificadas.

A continuación se definen las especificaciones de los materiales y elementos constitutivos del objeto del Proyecto, los equipos a utilizar son los siguientes:

- Analizador de gases de escape TESTO 350 Maritime como analizador de NO_x, CO, CO y O₂.
- Caudalímetro del fabricante KRAL, modelo J5025, BEM 500.
- Tacómetro Digital RM-1501.
- Torsiómetro del Fabricante KTR.
- Medidor de T y humedad (-30/70 °C) del aire de entrada al Turbocompresor del fabricante COMET, modelo T7511.
- Medidor de T (-50/200 °C) del aire de admisión del motor, del combustible. Fabricante DANFOSS, modelo MBT 5250.
- Portátil Toshiba 13,3" Satellite Z30-B-15M.

2 ANALIZADOR DE GASES DE ESCAPE, TESTO 350 MARITIME



Figura 2.1 El equipo Testo Maritime 350.

Este equipo es utilizado en este proyecto como analizador de gases de escape del motor.

Cumple con la Normativa de Anexo VI del convenio MARPOL: Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques (entrada en vigor: 19 de mayo de 2005), y con el Código Técnico del NO_x del 2008 de la OMI. Además de estar aprobado por la Sociedad de Clasificación Germanischer Lloyd(GL).

Este equipo requiere únicamente para su instalación la conexión de un sensor de gas electroquímico (ECS) en la tubería de escape después de pasar éstos por la turbosoplante que nos ofrece una medida exacta de los diferentes componentes de los gases de escape del motor: O₂, CO, CO₂ y NO_x (NO y NO₂ por separado).

Una vez conectado el sensor al conducto de escape, puede ponerse en marcha el equipo y una bomba comenzará a succionar los gases a analizar. El equipo permite ver los resultados en una pantalla propia en tiempo real o bien utilizar un software incluido con el equipo llamado "easyEmission" que permite entre otras cosas guardar en varios formatos los datos obtenidos en un PC o portátil, por ejemplo en formato .txt .

Parámetro	Rango de medición	Precisión
T gas	0-1000 °C	+/- 5°C
O ₂	0-25 % vol.	-
CO	0-3000 ppm	-
NO	0-3000 ppm	-
NO ₂	0-500 ppm	-
SO ₂	0-3000 ppm	-
CO ₂	0-40% vol.	-
p	600-1150 hPa	+/-5 hPa a 22°C

Tabla 2.1 - Datos Técnicos del equipo.

3 CAUDALÍMETRO. KRAL BEM 1000.

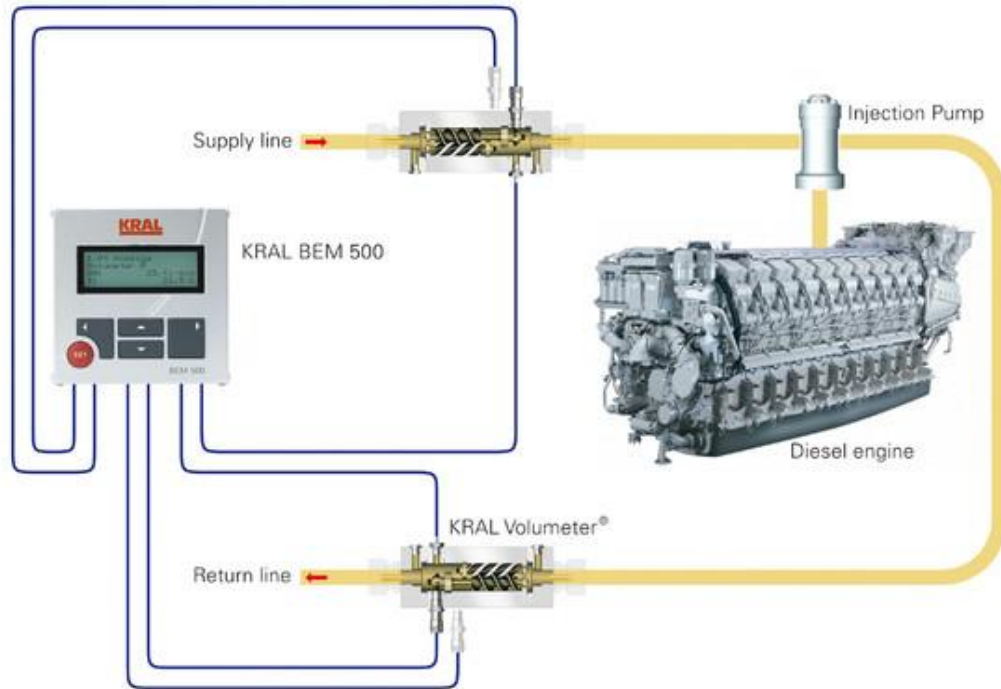


Figura 3.1 – Instalación del equipo.

El sistema está compuesto de la Unidad electrónica KRAL BEM 1000 y de dos caudalímetros, que son del tipo de desplazamiento positivo o de tornillo lo que permite que no se vean afectados por las vibraciones aumentando la precisión en el cálculo. La Unidad electrónica KRAL BEM 1000 calcula el flujo másico de combustible.

Este modelo de unidad Electrónica KRAL BEM 1000 nos permite fácil comunicación con un PC, pudiendo guardar los valores obtenidos que nos interesen en formato .txt, por ejemplo.

La precisión de los caudalímetros varía entre $\pm 0,1\%$ y $\pm 0,4\%$ a plena carga del motor.

3.1 Medida diferencial de combustible consumido.

El equipo funciona en los motores marinos, donde el retorno de combustible sobrante se envía a tanque de combustible, con dos caudalímetros. Así, uno va instalado en la línea de alimentación, después de la bomba de inyección y otro en la línea de retorno. La Unidad electrónica KRAL BEM 1000 calcula esta diferencia, obteniéndose los kg/s que se consumen.

3.2 Variaciones de temperatura del combustible.

La diferencia de temperaturas entre la línea de suministro de combustible al motor y la de retorno no puede ser ignorada. El combustible está más caliente en la línea de retorno debido a la energía cinética que adquiere el combustible cuando los pistones de la bomba de inyección de cierran, la fricción de los pistones de la bomba o el calor por radiación adquirido del propio motor provocan este hecho. En torno a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ puede ser la diferencia entre ambas.

Al comenzar a usar el equipo debe especificarse qué tipo de combustible estamos midiendo. Se halla el flujo másico haciendo el producto del caudal volumétrico, en m^3/s , y la densidad, cambiante en todo momento mientras haya variación de temperatura.

densidad (kg/m^3)*volumen (m^3/s)=flujo másico (kg/s).

3.3 Compensación de ondas de presión.

Para compensar el vacío creado por el movimiento de bajada del pistón de la bomba de inyección que provoca en su descenso una succión en el fluido, los caudalímetros de este equipo tienen un segundo sensor para corregir este efecto. Además de que la Unidad electrónica KRAL BEM 1000 también tiene en cuenta el cambio de giro del tornillo.

4 TACÓMETRO DIGITAL RM-1501

Para medir las rpm del motor. La lectura se realiza a distancia, el tacómetro capta la presencia de una célula reflectora instalada en el eje de cola.

Mediante este dispositivo se podrá relacionar la potencia (kW) en el eje obtenida por el torsiómetro con la velocidad en revoluciones por minuto (rpm) del motor en cada instante.

Las características más destacadas de este dispositivo son las siguientes:

Rango de medida: 10,00 to 99.999 RPM

Distancia de medida: 50 to 300 mm

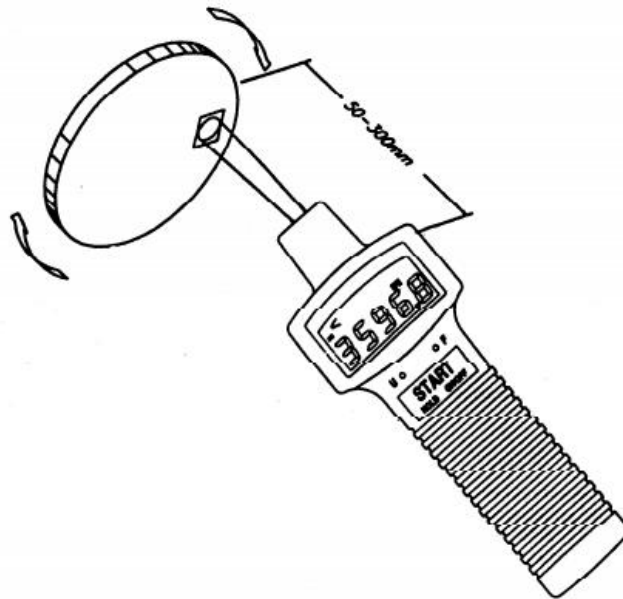


Figura 4.1 - Tacómetro digital.

Batería: Cuatro pilas 1,5 V (AA, UM-3)

Consumo: 1.5mA

27mA (Non-contact, measurement)

34mA (contact, measurement)

T operación: 0 to 50°C

Tamaño: 172 mm x 63 mm x 36 mm

Peso: 190 g

El tacómetro RM-1501 puede comunicarse con un PC a través de un conector RS-232 de 8 pin (conector serie) para realizar varias medidas a distintas potencias, por ejemplo.

5 TORSIÓMETRO. FABRICANTE KTR

La función del torsiómetro consiste en disponer de una herramienta de monitorización de alta precisión para el control de la torsión del eje de cola.

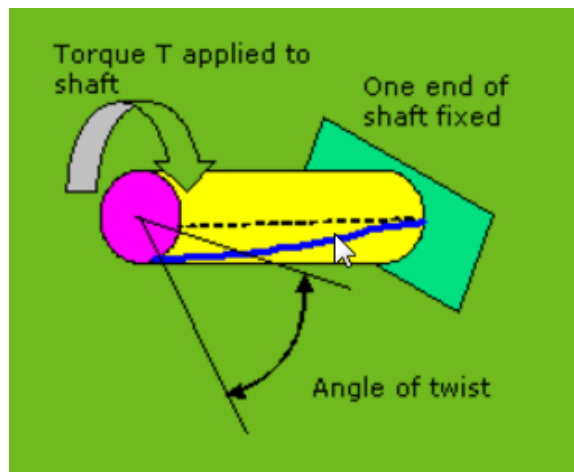


Figura 5.1 - Principio en que se basa el Torsiómetro.

En este tipo de Torsiómetro utilizado, se halla el Par motor mediante la medida de la deformación de una galga especial, como la mostrada en la siguiente imagen.



Figura 5.2 - Instalación galga detectora de la torsión del eje de cola.

Además del cálculo del par motor, el torsiómetro también entrega el valor, en kW, de la Potencia Efectiva (\dot{W}_e), ya que ésta es una medida del Par Motor medio (\bar{M}_m) por el régimen de giro (n), como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\dot{W}_e = \bar{M}_m * 2 * \pi * n \quad (5.1)$$

6 MEDIDOR DE TEMPERATURA/HUMEDAD. FABRICANTE COMET, MODELO T7511



Figura 6.1 - Medidor T, p y Humedad Relativa. Comet T7511

- Instalado a la entrada del aire del Turbocompresor.
- Mide la temperatura del aire en un rango de $-30/70$ °C, la humedad relativa y presión atmosférica.
- Comunicación con un PC mediante cable Ethernet o por WiFi mediante el software "Web Sensor".

7 MEDIDOR DE T. DANFOSS, MODELO MBT 5250



Figura 7.1 - Medidor T Danfoss MBT 5250

Se trata de un sensor muy versátil en cuanto a que permite hacer medidas tanto en agua de refrigeración, aceite de lubricación o hidráulico, plantas de refrigeración...

El sensor viene insertado en un cable de silicona que lo hace muy estable ante las vibraciones del motor.

Características:

- Para realizar mediciones en medios gaseosos o líquidos: aire gas, vapor, agua o aceite...
- Hasta +200 °C puede medir.
- Permite elegir entre resistencias Pt100 o Pt1000.
- Conexión con cable de dos o tres hilos.
- Alta calidad de materiales en su conector macho y hembra.

8 PORTÁTIL TOSHIBA 13,3" SATELLITE Z30-B-15M

Este PC portátil, Figura 8.1, será utilizado a bordo para la recepción de datos de los aparatos y equipos de medida utilizados en este Proyecto. Se utilizarán 2 equipos.



Figura 8.1 – Ordenador portátil utilizado en este Proyecto.

La comunicación se realizará a través de puerto serie (RS-232), Figura 8.2 .



Figura 8.2 – Conexión por puerto serie RS-232.

9 TABLA CARACTERÍSTICAS APARATOS/EQUIPOS DE MEDIDA

La siguiente Tabla engloba la función y características de cada dispositivo.

Measurement equipment						
	Manufacturer	Model	Measurement ranges	Calibration		
				Span gas conc.	Deviation of calibration	
Analyser						
Nox Analyser	TESTO	350 Maritime	100 - 2000 ppm	1167 ppm	± 2 %	
CO Analyser	TESTO	350 Maritime	0 - 2000 ppm	993 ppm	± 2 %	
CO ₂ Analyser	TESTO	350 Maritime	0 - 25 %	10,65%	± 2 %	
O ₂ Analyser	TESTO	350 Maritime	0 - 25 %	20,96%	± 2 %	
HC Analyser			ppm			
Speed	RS	RM-1501	0 - 10000 rpm		± 1 %	
Torque	KTR	PR	0 - no limit Nm		± 1 %	
Power, if applicable			kW		± 1 %	
Fuel flow	KRAL	J5025	0,1 - 2700 l/h		± 0,1 %	
Exhaust flow					%	
Temperatures						
Charge air coolant inlet	DANFOSS	MBT 5250	-50 - 200 °C		± 2 °C	
Exhaust gas	TESTO	350 Maritime	0 - 1000 °C		± 1 %	
Inlet air	COMET	T7511	-30 - 70 °C		± 2 °C	
Charge air	DANFOSS	MBT 5250	-50 - 200 °C		± 2 °C	
fuel	DANFOSS	MBT 5250	-50 - 200 °C		± 2 °C	
Pressures						
Exhaust gas	TESTO	350 Maritime	-20 - 20 kPa		± 0,2 kPa	
Charge air	DANFOSS	MBS3000	0 - 600 kPa		± 0,3 kPa	
Atmospheric	TESTO	350 Maritime	60 - 115 kPa		± 0,1 kPa	
Humidity						
Intake air	COMET	T7511	0 - 100 %		± 3 %	

9.1 - Tabla resumen características.

10 NORMAS Y/O CERTIFICADOS CALIDAD

Normas y/o Certificados de Calidad que cumplen los equipos a utilizar en este Proyecto.

Analizador de gases de escape TESTO 350 Maritime.

El equipo cumple con:

- Las exigencias descritas en el ANEXO VI del Convenio MARPOL.
- NOx Technical Code 2008 de la OMI: "Amendments to the technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engines".

Caudalímetro del fabricante KRAL, modelo J5025, BEM 500.

- MSA RINA Statement No. 2014/TS/299/01.
- DNV GL Recognition Certificate.
- CCS Certificate of Type Approval for KRAL Flowmeter.

Tacómetro Digital RM-1501.

- DIN EN ISO 9001.

Torsiómetro del Fabricante KTR.

- DIN EN ISO 9001.

Medidor de T y humedad (-30/70 °C) del aire de entrada al Turbocompresor del fabricante COMET, modelo T7511.

- ISO 9001 2008

Medidor de T (-50/200 °C) del aire de admisión del motor, del combustible.
Fabricante DANFOSS, modelo MBT 5250.

- EN 175301-803-A, Pg 9
- ISO 9001 2008

Approvals & Certificates:

- Lloyds Register of Shipping, LR
- Germanischer Lloyd, GL
- Det Norske Veritas, DNV
- Registro Italiano Navale, RINA
- Nippon Kaiji Kyokai, NKK
- American Bureau of Shipping, ABS
- Korean Register of Shipping, KR
- Bureau Veritas, BV
- China Classification Society, CCS



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
NÁUTICA Y MÁQUINAS

TÍTULO: “MAIN ENGINE EFFICIENCY STUDY”

PRESUPUESTO

**GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS
ENERGÍA Y PROPULSIÓN**

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y MÁQUINAS

FECHA: SEPTIEMBRE 2016

AUTOR: José Luis Ferreiro Castiñeira

Fdo. :

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1. MEDICIONES.....	85
2. PRESUPUESTO.....	88
3. MEDICIONES Y PRESUPUESTO. PRECIOS DESCOMPUESTOS.....	90
4. RESUMEN DE CAPÍTULO (COEFICIENTES).....	94

	Presupuesto Proyecto "Main Engine Efficiency Study"	Pág.: 1
	MEDICIONES	Ref.: promed2
	Precios Descompuestos	Fec.:

N.º Orden	Descripción de las unidades de obra	Uds.	Longitud	Latitud	Altura	Total
-----------	-------------------------------------	------	----------	---------	--------	-------

Presupuesto Proyecto "Main Engine Efficiency Study"

01 Precios Descompuestos

01.01 Caudalímetro combustible

Total partida: 01.01 1,00

01.02 Analizador de gases de escape

Total partida: 01.02 1,00

01.03 Tacómetro Digital

Total partida: 01.03 1,00

01.04 Torsiómetro

Total partida: 01.04 1,00

01.05 Medidor temperatura, presión y Humedad Relativa

Total partida: 01.05 1,00

01.06 Termómetro (-50/200 °C) del aire de admisión y escape del motor y del combustible.

Total partida: 01.06 1,00

01.07 Ordenador Portátil para lectura de datos

Total partida: 01.07 1,00

02 Precios auxiliares de cableado y conectores

02.01	Ud Conector de color amarillo de sección máxima 2-7,5mm ² . Marca 3M Serie SCOTCHLOK Y ref. 012468		
		Total partida: 02.01	10,00
02.02	Ud Conector tipo 558 de color rojo de sección máxima 0,5-1mm ² . Marca 3M Serie SCOTCHLOK 500 ref. 376780		
		Total partida: 02.02	10,00
02.03	Ud Conector tipo 560B de color azul de sección máxima 0,75-2,5mm ² . Marca 3M Serie SCOTCHLOK 500 ref. 225664		
		Total partida: 02.03	10,00
02.04	Ud Conector tipo 564B de color blanco de sección máxima 2,5-4/0,75-1mm ² . Marca 3M Serie SCOTCHLOK 500 ref. 256016		
		Total partida: 02.04	10,00
02.05	Ud Conector tipo 901REF6107 de color negro de sección máxima 1,5 RUN. Marca 3M Serie SCOTCHLOK 900 ref. 259937		
		Total partida: 02.05	10,00
02.06	MI. Cable flexible cobre 2x0.75 mm ² , paralelo, tensión nominal 300 V HO3VH-H, con cubierta de PVC.Según normas UNE 21031.		
		Total partida: 02.06	15,00
02.07	MI. Cable de 4 pares apantallado,categoría 6 FTP-Caja 305 m, tipo de cubierta PVC, utilizado para transmisiones LAN de alta velocidad, cumple los borradores actuales de categoría 6, supera los requerimientos de compatibilidad electromagnética exigidos por la normativa EN 55022 para sistemas de cableado estructurado,color gris, cód. SC6F-GYII. MARCA KRONE		
		Total partida: 02.07	15,00

ÍNDICE MEDICIONES

01	Precios Descompuestos	1
01.01	Caudalímetro combustible	1
01.02	Analizador de gases de escape	1
01.03	Tacómetro Digital	1
01.04	Torsiómetro	1
01.05	Medidor temperatura, presión y Humedad Relativa	1
01.06	Termómetro (-50/200 °C) del aire de admisión y escape del motor y del combustible.....	1
01.07	Ordenador Portátil para lectura de datos	1
02	Precios auxiliares de cableado y conectores	1
02.01	CONECTOR AMARILLO 2-7,5 SCOTCHLOK 3M	1
02.02	CONECTOR ROJO 0,5-1mm²SCOTCHLOK558 3M.....	1
02.03	CONECTOR AZUL 0,75-2,5mm²SCOTCHLOK560B 3M	1
02.04	CONECTOR BLANCO 2,5-4mm²SCOTCHLOK564B 3M.....	1
02.05	CONECTOR NEGRO 1,5RUN SCOTCHLOK901REF6107 3M	1
02.06	CABLE FLEX.PARAL.2x0.75 (HO3VH-H).....	1
02.07	CABLE 4 PARES APANTALLADO,CATEGORÍA 6 FTP,CUBIERTA PVC KRONE.....	1

	Presupuesto Proyecto "Main Engine Efficiency Study"	Pág.: 1
	PRESUPUESTO	Ref.: propre1
	Precios Descompuestos	Fec.:

N.º Orden	Descripción de las unidades de obra	Medición	Precio	Importe
-----------	-------------------------------------	----------	--------	---------

Presupuesto Proyecto "Main Engine Efficiency Study"

01 Precios Descompuestos

01.01 01.02	Caudalímetro combustible	1,00	2.277,33 €	2.277,33 €
01.02 01.01	Analizador de gases de escape	1,00	16.015,05 €	16.015,05 €
01.03 01.03	Tacómetro Digital	1,00	682,02 €	682,02 €
01.04 01.04	Torsiómetro	1,00	2.442,08 €	2.442,08 €
01.05 01.05	Medidor temperatura, presión y Humedad Relativa	1,00	1.040,06 €	1.040,06 €
01.06 01.06	Termómetro (-50/200 °C) del aire de admisión y escape del motor y del combustible.	1,00	680,08 €	680,08 €
01.07 01.07	Ordenador Portátil para lectura de datos	1,00	2.576,26 €	2.576,26 €

Total Capítulo 01 25.712,88 €

02 Precios auxiliares de cableado y conectores

02.01 T05BC3100	Ud. Conector de color amarillo de sección máxima 2-7,5mm ² . Marca 3M Serie SCOTCHLOK Y ref. 012468	10,00	12,77 €	127,70 €
--------------------	--	-------	---------	----------

E.T.S.N.M.		Tecnologías Marinas – Energía y Propulsión	TFG/GTM/E-15-16		
02.02 T05BC3206	Ud.	Conector tipo 558 de color rojo de sección máxima 0,5-1mm ² . Marca 3M Serie SCOTCHLOK 500 ref. 376780	10,00	0,30 €	3,00 €
02.03 T05BC3207	Ud.	Conector tipo 560B de color azul de sección máxima 0,75-2,5mm ² . Marca 3M Serie SCOTCHLOK 500 ref. 225664	10,00	0,16 €	1,60 €
02.04 T05BC3209	Ud.	Conector tipo 564B de color blanco de sección máxima 2,5-4/0,75-1mm ² . Marca 3M Serie SCOTCHLOK 500 ref. 256016	10,00	0,12 €	1,20 €
02.05 T05BC3225	Ud.	Conector tipo 901REF6107 de color negro de sección máxima 1,5 RUN. Marca 3M Serie SCOTCHLOK 900 ref. 259937	10,00	0,51 €	5,10 €
02.06 T05BS0002	MI.	Cable flexible cobre 2x0.75 mm ² , paralelo, tensión nominal 300 V HO3VH-H, con cubierta de PVC. Según normas UNE 21031.	15,00	0,46 €	6,90 €
02.07 T05EEK009	MI.	Cable de 4 pares apantallado, categoría 6 FTP-Caja 305 m, tipo de cubierta PVC, utilizado para transmisiones LAN de alta velocidad, cumple los borradores actuales de categoría 6, supera los requerimientos de compatibilidad electromagnética exigidos por la normativa EN 55022 para sistemas de cableado estructurado, color gris, cód. SC6F-GYII. MARCA KRONE	15,00	0,93 €	13,95 €
Total Capítulo 02					159,45 €
Total Presupuesto					25.872,33 €

Presupuesto Proyecto "Main Engine Efficiency Study"		Pág.: 1
MEDICIONES Y PRESUPUESTO		Ref.: promyp2
Precios Descompuestos		Fec.:

Nº Orden	Descripción de las unidades de obra	Uds.	Longitud	Latitud	Altura	Subtotal	Medición	Precio	Importe
----------	-------------------------------------	------	----------	---------	--------	----------	----------	--------	---------

Presupuesto Proyecto "Main Engine Efficiency Study"

01 Precios Descompuestos

01.01 Caudalímetro combustible

01.02

O03E00002	H. OFICIAL 1ª ELECTRÓNICO	5,00				12,82		64,10
O03E00004	H. AYUDANTE ELECTRÓNICO	5,00				12,19		60,95
T28DZ0050	Ud. Caudalímetro de combustible	1,00				2.152,28		2.152,28

Clase: Mano de Obra 125,05
Clase: Material 2.152,28

Total partida 01.01 1,00 .2.277,332.277,33

01.02 Analizador de gases de escape

01.01

O03E00002	H. OFICIAL 1ª ELECTRÓNICO	5,00				12,82		64,10
O03E00004	H. AYUDANTE ELECTRÓNICO	5,00				12,19		60,95
T16CD1001	MI. Analizador de gases de escape TESTO 350 Maritime	1,00				15.890,00		15.890,00

Clase: Mano de Obra 125,05
Clase: Material 15.890,00

Total partida 01.02 1,00 16.015,0516.015,05

01.03 Tacómetro Digital

01.03

T24DGI651	Ud. Tacómetro Digital RM-1501	1,00				632,00		632,00
O03E00002	H. OFICIAL 1ª ELECTRÓNICO	2,00				12,82		25,64
O03E00004	H. AYUDANTE ELECTRÓNICO	2,00				12,19		24,38

Clase: Mano de Obra 50,02
Clase: Material 632,00

Total partida 01.03 1,00682,02 682,02

01.04 Torsiómetro

01.04

O03E00002	H. OFICIAL 1ª ELECTRÓNICO	8,00				12,82		102,56
O03E00004	H. AYUDANTE ELECTRÓNICO	8,00				12,19		97,52
T24DGI614	Ud. Torsiómetro del Fabricante KTR, Modelo 620	1,00				2.242,00		2.242,00

Clase: Mano de Obra 200,08
Clase: Material 2.242,00

	Total partida 01.04	1,00	.2.442,08	.....2.442,08
01.05	Medidor temperatura, presión y Humedad Relativa			
01.05				
	T24DGI652 Ud. Detector T, p y humedad relativa COMET T7511	1,00	890,00	890,00
	O03E00002 H. OFICIAL 1º ELECTRÓNICO	6,00	12,82	76,92
	O03E00004 H. AYUDANTE ELECTRÓNICO	6,00	12,19	73,14
	Clase: Mano de Obra			150,06
	Clase: Material			890,00
	Total partida 01.05	1,00	.1.040,06	.....1.040,06
01.06	Termómetro (-50/200 °C) del aire de admisión y escape del motor y del combustible.			
01.06				
	T24DGI623 Ud. Medidor de T. DANFOSS, modelo MBT 5250.	3,00	160,00	480,00
	O03E00002 H. OFICIAL 1º ELECTRÓNICO	8,00	12,82	102,56
	O03E00004 H. AYUDANTE ELECTRÓNICO	8,00	12,19	97,52
	Clase: Mano de Obra			200,08
	Clase: Material			480,00
	Total partida 01.06	1,00	....680,08	..... 680,08
01.07	Ordenador Portátil para lectura de datos			
01.07				
	T24DGI601 Ud. Portátil Toshiba 13,3" Satellite Z30-B-15M	2,00	1.188,09	2.376,18
	O03E00002 H. OFICIAL 1º ELECTRÓNICO	8,00	12,82	102,56
	O03E00004 H. AYUDANTE ELECTRÓNICO	8,00	12,19	97,52
	Clase: Mano de Obra			200,08
	Clase: Material			2.376,18
	Total partida 01.07	1,00	.2.576,26	.....2.576,26
	Total capítulo 01			25.712,88

02 Precios auxiliares de cableado y conectores

02.01 T05BC3100	Ud.	CONECTOR AMARILLO 2-7,5 SCOTCHLOK 3M Conector de color amarillo de sección máxima 2-7,5mm². Marca 3M Serie SCOTCHLOK Y ref. 012468			
Total partida 02.01			10,00	.....12,77	.....127,70
02.02 T05BC3206	Ud.	CONECTOR ROJO 0,5-1mm²SCOTCHLOK558 3M Conector tipo 558 de color rojo de sección máxima 0,5-1mm². Marca 3M Serie SCOTCHLOK 500 ref. 376780			
Total partida 02.02			10,00	.....0,30	..... 3,00
02.03 T05BC3207	Ud.	CONECTOR AZUL 0,75-2,5mm²SCOTCHLOK560B 3M Conector tipo 560B de color azul de sección máxima 0,75-2,5mm². Marca 3M Serie SCOTCHLOK 500 ref. 225664			
Total partida 02.03			10,00	.....0,16	..... 1,60
02.04 T05BC3209	Ud.	CONECTOR BLANCO 2,5-4mm²SCOTCHLOK564B 3M Conector tipo 564B de color blanco de sección máxima 2,5-4/0,75-1mm². Marca 3M Serie SCOTCHLOK 500 ref. 256016			
Total partida 02.04			10,00	.....0,12	..... 1,20
02.05 T05BC3225	Ud.	CONECTOR NEGRO 1,5RUN SCOTCHLOK901REF6107 3M Conector tipo 901REF6107 de color negro de sección máxima 1,5 RUN. Marca 3M Serie SCOTCHLOK 900 ref. 259937			
Total partida 02.05			10,00	.....0,51	..... 5,10
02.06 T05BS0002	MI.	CABLE FLEX.PARAL.2x0.75 (HO3VH-H) Cable flexible cobre 2x0.75 mm², paralelo, tensión nominal 300 V HO3VH-H,con cubierta de PVC.Según normas UNE 21031.			
Total partida 02.06			15,00	.....0,46	..... 6,90
02.07 T05EEK009	MI.	CABLE 4 PARES APANTALLADO,CATEGORÍA 6 FTP,CUBIERTA PVC KRONE Cable de 4 pares apantallado,categoría 6 FTP-Caja 305 m, tipo de cubierta PVC, utilizado para transmisiones LAN de alta velocidad, cumple los borradores actuales de categoría 6, supera los requerimientos de compatibilidad electromagnética exigidos por la normativa EN 55022 para sistemas de cableado estructurado,color gris, cód. SC6F-GYII. MARCA KRONE			

Total partida 02.07	15,00	.....0,93	..... 13,95
Total capítulo 02			159,45
Total presupuesto			25.872,33

	Presupuesto Proyecto "Main Engine Efficiency Study"	Pág.: 1
	RESUMEN DE CAPÍTULOS	Ref.: prores1
		Fec.:

Nº Orden	Descripción de los capítulos	Importe	%
01	Precios Descompuestos	25.712,88	99,38 %
02	Precios auxiliares de cableado y conectores	159,45	0,62 %

TOTAL EJECUCIÓN MATERIAL 25.872,33 €

6 % Beneficio Industrial 1.552,34 €

TOTAL EJECUCIÓN POR CONTRATA 27.424,67 €

21 % I.V.A..... 5.759,18 €

TOTAL PRESUPUESTO C/IVA..... 33.183,85 €

Asciende el presupuesto proyectado, a la expresada cantidad de:

TRÉINTA Y TRES MIL CIENTO OCHENTA Y TRES EUROS CON OCHENTA Y CINCO CÉNTIMOS

1 de Septiembre de 2016

LA PROPIEDAD

LA DIRECCIÓN TÉCNICA

LA CONSTRUCTORA

Fdo.:

Fdo.:

Fdo.: