

PROCESO DE OBTENCIÓN DE MEDIDAS EXPERIMENTALES Y TRATAMIENTO DE DATOS PARA MODELADO DE MOTOR DIESEL MARINO

PAGÁN RUBIO, José Antonio (1); VERA GARCÍA, Francisco (2) ; HERNANDEZ GRAU, José (2)

japagan@navantia.es

⁽¹⁾NAVANTIA, U.P. Motores, Ingeniería de Diagnóstico y Desarrollo de Producto

⁽²⁾Universidad Politécnica de Cartagena, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos

RESUMEN

El motor diésel es una máquina ampliamente utilizada en la industria, tanto como medio de propulsión en el transporte como fuente de generación de energía eléctrica. El secreto de su gran expansión es su alta eficiencia térmica comparada con otros tipos de motores de combustión, gracias a su alta relación de compresión.

Una de las principales aplicaciones del motor diésel es la de propulsión y generación en buques. Existen tres importantes razones para su expansión en este sector, que son: su alta eficiencia, elevada de potencia y fiabilidad en comparación con otras fuentes de energía compatibles y/o alternativas.

El objetivo de este trabajo es indicar el proceso de obtención y tratamiento de datos necesarios para desarrollar un modelo termodinámico de acción de ondas 1D de motor diésel marino que sirva de base para la creación de un sistema de diagnóstico capaz de determinar el estado del motor y diagnosticar anomalías. Para la modelización del motor, se utiliza un software reconocido internacionalmente, como el OpenWam[®] o el AVLboost[®].

Cualquier fallo en propulsión principal del buque o grupos auxiliares tienen consecuencias negativas en eficiencia y/o fiabilidad, que ocasionan grandes pérdidas económicas ya sea en consumo de combustible o coste de la reparación, sin embargo es aún más importante las posibles consecuencias que afecten a la seguridad. Por lo tanto, el funcionamiento correcto y eficiente de los motores en aplicaciones marinas es fundamental, y como consecuencia también lo son los sistemas que determinan la condición actual del motor y detectan fallos en fase temprana.

Para construir un modelo válido para la diagnosis del motor, además de recopilar parámetros geométricos es necesario realizar unas pruebas experimentales en un banco dedicado y capaz para el ensayo de motor de elevada potencia disponible en las instalaciones de Navantia en Cartagena. Además, se requiere un protocolo especial de ensayo que incluya medidas de parámetros operacionales y medidas específicas para hacer posible su correcta modelización, como p.e., presión instantánea en admisión, escape y cilindro, velocidad de giro de la turbosoplante y emisiones. En esta comunicación se muestra el proceso realizado para la correcta medida de los parámetros necesarios, el procedimiento utilizado para el análisis y procesado de las medidas para poder caracterizar el proceso de combustión del motor mediante la ley de liberación de calor y concentraciones de emisiones de CO₂, CO, y NO_x, así como otros parámetros importantes a la hora de poder construir un modelo fiable que sirva de plataforma de ensayos virtual del motor modelado con el objetivo de crear un modelo de diagnosis basado en el modelo termodinámico 1D, que requerirá la simplificación de éste último para permitir diagnosis en tiempo real.

Palabras clave: motor diesel, medidas experimentales, modelo termodinámico.

1. Introducción

El presente trabajo describe el primero de los pasos realizados, de un largo camino, necesario para poder obtener un sistema de diagnóstico en tiempo real de motor diesel marino basado en modelo termodinámico, que es el objetivo final marcado por los autores.

El desarrollo del modelo, exige la búsqueda, recopilación, medida, tratamiento y análisis de una gran cantidad de datos geométricos, ambientales, operacionales, de combustión y de emisiones del motor, que serán la clave para obtener un buen modelo.

El trabajo desarrollado en el presente documento es el laborioso proceso realizado para poder obtener todos esos datos, que incluye el diseño y realización de una base de datos completa, la búsqueda y recopilación de datos geométricos del motor, la realización de medidas experimentales específicas en banco de pruebas, y el tratamiento y análisis de medidas experimentales para obtener los parámetros necesarios.

El objetivo de este trabajo es explicar el proceso llevado a cabo para la obtención y tratamiento de datos necesarios para implementarlos en un modelo termodinámico de acción de ondas 1D del motor marino NAVANTIA-MTU 12V396. Este modelo estará enfocado a la creación de un sistema de diagnóstico del motor y predecir anomalías. Estos datos se introducirán en un software de reconocido prestigio internacional, de código libre como el OpenWam[®], o comercial como el AVLboost[®].

Para poder obtener todos los datos es necesario diseñar un procedimiento organizado y sistemático que garantice realizar medidas experimentales específicas adecuadas y realizar el análisis y cálculos pertinentes de las medidas para la obtención de parámetros diversa naturaleza. A continuación se muestra una lista de los datos a recopilar, agrupados por su naturaleza:

- Datos geométricos: diámetro, carrera, longitud biela, relación de compresión, número de cilindros, orden de encendido, número de válvulas admisión / escape, diámetro de asiento de válvulas, coeficientes de flujo, curvas de levantamiento válvulas, tolerancias de válvulas, Swirl Number, planos detallados sistema admisión y escape (colectores, puertos, filtros,..etc.).
- Combustible: Poder Calorífico Inferior y relación Aire / Combustible (A/F) estequiométrica.
- Combustión: caudal másico combustible / carga ó (A/F real) y curva presión cilindro dinámica / carga.
- Datos operacionales: presiones y temperaturas operacionales del sistema de aire, escape y fluidos de sistemas auxiliares.
- Ambiente: presión, temperatura y humedad.
- Turbocompresor: mapa compresor y turbina, velocidad, temperaturas y presiones del turbocompresor / carga.
- Datos adicionales: pérdidas presión filtro aire y conductos escape después de turbo.

El procedimiento seguido se divide en cuatro pasos: (1) diseño y realización de base de datos, (2) búsqueda y recopilación de datos geométricos, (3) ensayo medidas experimentales en banco de pruebas y (4) análisis / obtención de parámetros calculados.

2. Diseño y realización de base de datos

Una vez determinado el tipo de modelo e identificados los parámetros necesarios, el primer paso es diseñar una base de datos completa que incorpore esos datos de una forma ordenada y estructurada. Para ello, se utiliza una hoja de cálculo dividida en cuatro partes: información de motor, información de familia/tipo, información de banco de ensayos y base de datos. Funcionalmente, la base de datos incluye tres tipos de datos: datos fijos, medidas y datos calculados, fáciles de distinguir por estar en colores distintos. Se diseña incluyendo toda la formulación necesaria y un texto guía para su uso.

3. Búsqueda y recopilación de datos geométricos

Los datos geométricos básicos motor se han obtenido de los manuales de operación y mantenimiento. Además, se ha recopilado información detallada de los planos constructivos y de los

ensayos de caracterización de elementos como, colectores, pipas y válvulas de admisión y de escape, datos relevantes cómo: número, diámetro asiento, levantamiento, coeficientes de flujo, de Swirl, etc. También se necesitan datos para caracterizar filtro de aire, enfriador de aire de carga, conducto escape tras turbina y turbocompresor.

4. Ensayo medidas experimentales en banco de pruebas

Se diseña un procedimiento en el que se define el ciclo de ensayos para realizar todas las medidas experimentales necesarias. En el procedimiento se define los puntos de funcionamiento y señales a medir. Estas señales pueden ser divididas en dos categorías:

- Señales de operación estándar: Medidas que se realizan normalmente durante rodaje y prueba oficial de motor marino tras su fabricación y montaje para comprobar su correcto estado de funcionamiento y certificar cumple los requisitos que exige la normativa y el cliente.
- Señales específicas adicionales necesarias para modelado: Medidas especiales que no se realizan normalmente. Básicamente presiones dinámicas en cilindro y colectores y velocidad de turbocompresor. Para ello ha sido necesario utilizar equipos de medición portátiles específicos no disponibles en el banco de pruebas. Estos equipos han sido proporcionados por la UPCT y por el departamento de ingeniería de Navantia Motores.

4.1. Banco de pruebas

Las medidas experimentales se realizan en uno de los bancos de pruebas que tiene Navantia U.P. Motores en Cartagena, figura 1. El banco está preparado para realizar pruebas de grupos diesel eléctricos de hasta 2.000 kW y de propulsión de hasta 10.000 kW.



Figura 1. Motor NAVANTIA-MTU 12V396 en banco de pruebas

4.2. Condiciones del Ensayo

Para tener una buena medida, se comprueba que los instrumentos están correctamente calibrados antes de realizar el ensayo. Según la normativa aplicable [1], las prestaciones del motor se definen en condiciones estándar (25°C, 25°C, 100 kPa). Por lo tanto se registran las condiciones de presión, temperatura y humedad ambiente durante la prueba para poder realizar la corrección pertinente.

Los fluidos utilizados, cumplen la normativa de fluidos del fabricante original MTU: Aceite lubricante viscosidad grado SAE 40, combustible diesel marino (MDO) y refrigerante de agua destilada mezclada con anticorrosivo Glysacorr P113 (9-11 % volumen).

4.3. Programación de la prueba

Se definen cinco (5) puntos de operación representativos de todo el rango operativo real, que se muestran a continuación:

Puntos de operación en el ensayo.

Po int	*time (minutes)	Lo ad (%)	Sp eed (rpm)	Engine Brake power (kW)	Alternator efficiency (η)	Genset Electric power (kW)
1	30	0 %	18 00	0	-	-
2	30	10 %	18 00	120	0.883	106
3	30	25 %	18 00	300	0.887	266
4	30	50 %	18 00	600	0.937	562
5	30	75 %	18 00	900	0.954	859
6	60	10 0%	18 00	1200	0.960	1153

4.4. Señales operativas estándar

En cada uno de los puntos de funcionamiento definidos anteriormente, se miden y registran los valores de los parámetros operativos estándar que se indican a continuación:

Señales medidas estándar.

Code	Description	Code	Description
Input Signals		Output Signals	
MT98	Relative Humidity	TT50-1A - 6A y TT50-1B - 6B	Cylinder Outlet Exhaust gas temperature (12 cylinders)
ST80	Engine Velocity	TT51-A	Inlet turbo A temperature
PT96	Barometric pressure	TT51-B	Inlet turbo B temperature
TT03	Sea water pressure	TT52-A	Outlet turbo A temperature
TT-01	Inlet sea water temperature	TT52-B	Outlet turbo B temperature
TT-03	Outlet sea water temperature	Alternator Signals	
TT97	Ambient temperature	IT70	Alternator Current
PT36-A	Charge air pressure (manifold A)	TT71-R	Alternator winding R temperature
TT31-A	Charge air temperature (manifold A)	TT71-S	Alternator winding S temperature
PT-41	Fuel pressure	TT71-T	Alternator winding T temperature
TT-41	Inlet fuel temperature	TT72	Alternator air cooling temperature
TT-43	Outlet fuel temperature	TT74	Alternator inlet water cooling temperature
FF-43	Fuel consumption	TT75	Alternator outlet water cooling temperature
FF-44	Fuel rack	TT78	Alternator Coupling Side Bearing temperature
TT-11	Inlet Refrigeration water temperature	TT79	Alternator Opposite Coupling Side Bearing temperature
TT-13	Outlet Refrigeration water temperature	UT70	Alternator Voltage
PT-11	Inlet Refrigeration water pressure	WT70	Alternator Active Power
TT-53	Outlet Lubricating Oil temperature		
PT-51	Lubricating Oil pressure		

4.5. Medidas Adicionales

Presión dinámica en cilindro

La presión cilindro es la más importante de todas para a modelización posterior del motor. La evolución de la presión en un ciclo termodinámico nos permite calcular la ley de liberación de calor y

con ésta saber el ritmo en el que se va quemando el combustible inyectado [2]. Por lo tanto, esta señal es la base para la construcción del modelo de combustión que lleva incorporado el modelo termodinámico del motor.

Para medir y registrar la señal de presión en cilindro se ha utilizado un equipo desarrollado por el Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos de la UPCT [3]. Utiliza hardware CompactRIO® de cuatro canales para captadores de velocidad, referencia punto muerto superior (TDC), presión cilindro (piezoeléctrico) y presiones en colector (piezoresistivo). El software está desarrollado sobre LabView®.



Figura 2. Sensor presión en cilindro instalado en motor

Para que las medidas sean correctas es necesario realizar una captación precisa de la señal de referencia del punto muerto superior (TDC). Se puede observar en la figura 3 cómo se manifiesta una perturbación en la señal de presión en el inicio de la combustión. Esta alteración de la onda de presión es debido al efecto conducto. Esta distorsión se produce con tasas de variación de presión elevadas y el resultado es un pequeño retraso y un aumento de la presión máxima, como se demuestra en [4]. La señal bruta en estas condiciones no es apta para analizar el proceso de combustión en cilindro, por lo tanto es necesario eliminar el rizado. Teniendo en cuenta un análisis realizado sobre los tipos de filtro que se pueden utilizar, se decide aplicar un filtro paso bajo sobre el espectro de frecuencia (FFT).

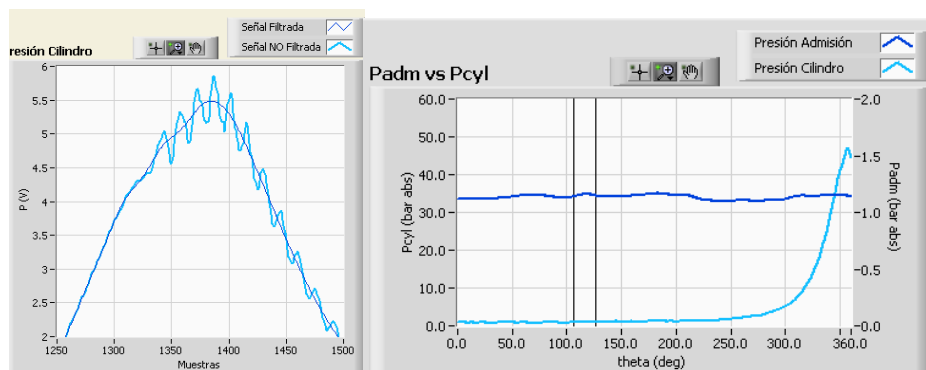


Figura 3. Presión Cilindro (100% carga) y referencia presión absoluta

Una vez filtrada y registrada, la señal debe ser referenciada para obtener la presión absoluta [5]. Para ello, se busca el punto muerto inferior (BDC) entre las carreras de admisión y compresión, que es el momento en el que la válvula de admisión está abierta y la velocidad del flujo es aproximadamente cero. En ese momento se considera que las presiones de admisión y de cilindro son iguales, zona marcada en figura 3. Aunque sensor de presión se coloca muy cerca de la cámara de combustión y se enfría para evitar la deriva térmica, sigue siendo necesario realizar un filtrado adecuado de la señal para evitar el uso de una medida poco realista para el desarrollo del modelo de combustión, como queda demostrado en la figura 4, que muestra el calor liberado acumulado calculado a partir de la señal sin filtrar y filtrada.

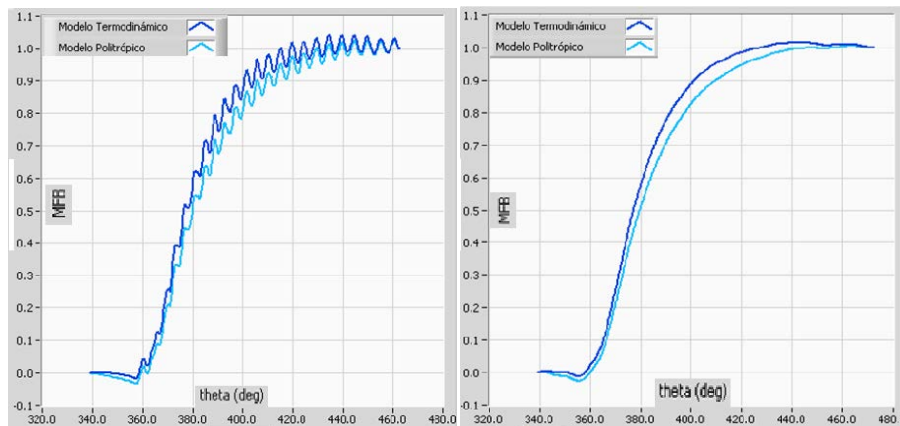


Figura 4. Calor liberado acumulado sin filtrar y filtrado (100% carga).

Velocidad turbocompresor

El motor cuenta con dos turbocompresores, turbinas y compresores son del mismo modelo y trabajan en las mismas condiciones, lo que permite hacer una modelización simétrica. No dispone de sensor de velocidad de turbocompresor ni sitio en el que poder colocarlo. Por lo tanto, se decide utilizar un acelerómetro para captar la vibración del eje del turbocompresor en un punto de funcionamiento estacionario del motor. Se utiliza una unidad de adquisición de datos PULSE® (Briel & Kjaer) y el software LabShop® del mismo fabricante.

Emisiones

Para poder analizar las emisiones de gases de interés en motores diesel (CO₂, CO, O₂ y NO_x) se utiliza un analizador TESTO 360. Este analizador proporciona la concentración de las emisiones de acuerdo con la normativa [6].

5. Análisis de medidas experimentales y obtención de parámetros calculados

Una vez se ha realizado los ensayos experimentales, es necesario obtener los parámetros característicos importantes del motor calculados a partir de los datos medidos como son las prestaciones del motor, parámetros del diagrama indicador, dosado, caudal de aire, composición de humos, etc.

Todos los cálculos derivados de las medidas de presión cilindro, a excepción de la ecuación que representa la ley de liberación de calor, pueden ser realizados automáticamente con el software de medida. No obstante, son realizados manualmente de forma exhaustiva para verificar los cálculos automáticos y tener la garantía de que son fiables en medidas posteriores. A continuación, se presenta un resumen de datos calculados para el punto de funcionamiento del 100% de carga.

Prestaciones del motor: Utilizando como base los datos básicos geométricos del cilindro del motor y tras análisis de la señal de presión en cilindro, se pueden obtener las medidas de presiones medias, par y potencia. Se realiza corrección de potencia efectiva al estar en condiciones de ensayo distintas a las estándar según [1].

$$IMEP_{GROSS} = \frac{1}{2V(\theta)} \sum_{i=1+\frac{540^\circ}{\Delta\theta}}^{\frac{180^\circ}{\Delta\theta}} [P(i) + P(i + 1)][V(i + 1) - V(i)] \quad IMEP_{PUMP} = \frac{1}{2V(\theta)} \sum_{i=1+\frac{540^\circ}{\Delta\theta}}^{\frac{180^\circ}{\Delta\theta}} [P(i) + P(i + 1)][V(i + 1) - V(i)]$$

$$\dot{W}_i(KW) = \frac{1}{1000} \frac{n(rpm)}{60} \left(\frac{1}{2} \frac{1}{10} IMEP_{neta}(bar)V(cc) \right) T_i(Nm) = \frac{1}{2} \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{10} IMEP_{neta}(bar)V(cc) \right)$$

Coefficientes politrópicos de procesos de compresión y escape: Se determinan calculando la recta de los procesos de compresión y expansión mediante interpolación por mínimos cuadrados. Se utilizan los valores desde el cierre de admisión (IVC) hasta 10° antes del inicio de la combustión para la compresión y el rango de ángulos comprendido entre el final de la combustión y la apertura de la

válvula de escape para el de expansión. Este procedimiento, además permite tener una primera aproximación de los ángulos de inicio y fin de la combustión.

Calor liberado por el combustible: Utilizando el primer principio de la termodinámica y calculado numéricamente en cada ángulo se puede calcular mediante la expresión:

$$Q_{ch} |_{\theta}^{\theta+\Delta\theta} = \left[\frac{1}{\gamma-1} V(\theta) \left(\frac{P(\theta+\Delta\theta)}{\Delta\theta} \right) + \frac{\gamma}{\gamma-1} P(\theta) \left(\frac{V(\theta+\Delta\theta)}{\Delta\theta} \right) \right] \Delta\theta + \frac{60}{n(\text{rpm})} \frac{1}{360} \dot{Q}_{ht}$$

Donde γ = cociente de calores específicos y \dot{Q}_{ht} el calor transmitido a las paredes. Realizando el sumatorio de los valores anteriormente calculados se obtiene el valor del calor total liberado por el combustible (15.802,19 J/ciclo*cilindro).

Fracción de masa quemada: Se determina dividiendo el sumatorio de calor liberado por el combustible desde el inicio de la combustión hasta un ángulo concreto de la combustión, entre ese mismo sumatorio extendido a toda la combustión (entre ESOC y EEOC).

$$xb = \frac{\sum_{ESOC}^{\theta} Q_{ch}(\theta)}{\sum_{ESOC}^{EEOC} Q_{ch}(\theta)}$$

Una vez calculada la fracción de masa quemada del combustible, se determinan de manera exacta los puntos de inicio y final de combustión como aquellos en los que es $xb=0,01$ y $xb=0,99$ respectivamente.

Temperatura en el interior del cilindro: con la ley de los gases ideales ($T=PV/mR$), “m” la masa de gases en el cilindro (supuesta constante durante la combustión) y R la constante de los gases ideales.

Calor transferido a las paredes \dot{Q}_{ht} : Se utiliza la ecuación:

$$\dot{Q}_{ht,i} = h_{gas}(\theta) A_{w,i} (T_{gas}(\theta) - T_w)$$

Siendo h_{gas} el coeficiente de transferencia de calor de los gases del cilindro, $A_{w,i}$, cada una de las superficies de contacto con los gases y T_w la temperatura de las superficies de contacto. El resultado del calor transferido a las paredes al 100% así calculado es de 1717 J/ciclo*cilindro.

Ley de Vibe: La liberación de calor para un motor de encendido por compresión puede dividirse en dos fases: premezcla y difusión. En el caso del motor que nos ocupa, se ha comprobado el modelo del proceso de combustión utilizando una sola función de Vibe, la cual corresponde a:

$$xb = 1 - \exp\left(-a \left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta}\right)^{m+1}\right)$$

donde θ es el giro del cigüeñal, θ_0 el ángulo de inicio de combustión, m y a parámetros de ajuste.

Relación Aire-Combustible (AFR) y exceso de aire (λ): Se utiliza un método indirecto a partir de la medida de gases y composición del combustible. La normativa [6] permite realizar el cálculo utilizando el balance de carbono (CO₂), balance de oxígeno (O₂) y el método de Brettschneider. Se decide realizar por este último método, bien descrito en la bibliografía.

Se ha definido una base de datos completa de parámetros de motor que incluye datos geométricos, datos medidos en banco de ensayos y datos calculados a partir de los anteriores.

Además, se han analizado presiones dinámicas en cilindro, colectores admisión y escape a partir de los cuales se calculan los parámetros secundarios que definen el proceso de combustión en el interior del cilindro, obteniendo como resultado la ley de liberación de calor caracterizada por una función de Vibe.

Asimismo, se ha obtenido la relación real aire-combustible y la composición de gases no medidos a partir de la composición del combustible, composición de gases medidos y consumo de combustible.

Si se sigue la metodología indicada en el presente trabajo, recopilando y analizando todos los datos, se obtienen todos los datos de entrada que permite realizar un modelo termodinámico completo del motor.

El tratamiento de la señal de presión en cilindro para eliminar la perturbación producida por el efecto conducto y su posterior análisis ha permitido calcular adecuadamente la ley de liberación de calor, fundamental para simular el proceso de combustión. Una función de Vibe ha resultado ser suficiente para simular adecuadamente la ley de liberación de calor.

El cálculo de prestaciones y parámetros de interés de la señal de presión y de la ley de liberación de calor que realiza automáticamente el software de análisis de presión en cilindro desarrollado por la UPCT produce los mismos resultados que los realizados manualmente. Por lo tanto, se trata de una herramienta muy útil para evitar la realización de cálculos manuales en futuros análisis.

Como siguiente paso para alcanzar el objetivo marcado por los autores, está previsto realizar el modelo termodinámico del motor, calibrarlo y validarlo con datos operacionales reales. Una vez validado, se utilizará como base para crear un sistema de diagnóstico en tiempo real.

Un profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas de NAVANTIA y de la UPCT que han apoyado el desarrollo de un sistema de diagnóstico en tiempo real que ayude a mejorar la fiabilidad de motores diesel marinos. Un agradecimiento especial a la responsable del departamento de producción de la U.P. Motores de NAVANTIA, por hacer posible la realización de las medidas experimentales.

6. Referencias

ISO 3046-1 Reciprocating internal combustion engines – Performance-. Part 1: Declarations of power, fuel and lubricating oil consumptions, and test methods – Additional requirements for engines for general use.

HEYWOOD, J.B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw - Hill Book Company, ISBN 0-07-100499-8, 1988. 386-388 pp.

HERNANDEZ GRAU,J., MUÑOZ, A.IndicatorCal - Software de Adquisición y Tratamiento de Señales de Presión en Cilindro de Motores de Combustión Interna Alternativos, 2012, Trabajo no publicado.

HERNANDEZ GRAU,J. Tratamiento Señal de Presión en Cilindro de Motores Diesel Marinos de Media Velocidad Medidas desde Válvula de Purga. Informe Interno UPCT – NAVANTIA 2007.

BRUNT, M. F. J. and POND, C. R., Evaluation of Techniques for Absolute Cylinder Pressure Correction. SAE 970036, 1997.

ISO 8178-1 Reciprocating internal combustion engines - Exhaust emission measurement - Part 1: Test-bed measurement of gaseous and particulate exhaust emissions.