



Diagnóstico de Motocompresores alternativos mediante análisis de Vibraciones



**1° Jornadas Latinoamericanas sobre compresión de gas natural
Tartagal, Provincia de Salta, República Argentina**

DIAGNÓSTICO DE MOTOCOMPRESORES ALTERNATIVOS MEDIANTE ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Autores:

UNP: Daniel Barilá, Luís Bugna, Gustavo Vignolo, Fernando Vignolo
Hanover Argentina: Raúl Spinassi

Resumen:

El concepto del mantenimiento predictivo como complemento del correctivo y preventivo, ha demostrado ser una herramienta eficaz para asegurar confiabilidad, aumentar disponibilidad y bajar costos. Este tipo de mantenimiento se basa en detectar los síntomas que producen las averías cuando están en un estado incipiente.

Su avance ha sido espectacular en los últimos años, actualmente hay disponible una gran variedad de técnicas y equipos que permiten realizar diagnósticos de máquinas en servicio que hace un tiempo relativamente corto resultaban económicamente prohibitivos y solo podían ser utilizadas como herramientas de laboratorio en la etapa de desarrollo y no como elementos destinados al mantenimiento.

En particular, las técnicas basadas en el análisis de vibraciones, han tenido un desarrollo significativo como herramienta de diagnóstico de maquinaria rotativa, en el campo de las máquinas alternativas el desarrollo es incipiente. Este trabajo apunta al desarrollo de nuevos criterios de diagnóstico de motocompresores alternativos basados en el análisis de vibraciones. Se han alcanzado avances importantes en la interpretación de las señales de vibración, tanto en el aspecto cualitativo como en el cuantitativo, además, el soft necesario para realizar análisis específicos ha sido desarrollado por este grupo de trabajo. Actualmente se continúa investigando sobre esta temática..

Introducción:

Durante la operación de los motores y compresores alternativos pueden producirse muchos tipos de averías tales como fallas en los sistemas de inyección, fugas de compresión, anomalías en el sistema de encendido (motores de encendido por chispa), fallas mecánicas tales como holguras entre cilindro y pistón o en cojinetes etc. Estas fallas pueden identificarse mediante diferentes métodos que básicamente se agrupan en dos tipos:

1. Directos: Medida de presión en cilindro, caudal de combustible, caudal de aire fugado a través de los aros (blow by) etc., estas técnicas son precisas pero suelen ser de difícil ejecución y en ocasiones necesitan de modificaciones en el motor.
2. Indirectos: Oscilaciones del bloque [1, 2, 3, 4], Irregularidad de rotación [5, 6, 7, 8], vibraciones [1, 2], análisis de aceite, termografía, etc. A pesar de que en general son menos precisas cada vez tienen mas aceptación en el campo del mantenimiento predictivo debido a su más fácil implementación.

Entre muchas otras técnicas, el análisis de vibraciones ha sido utilizado ampliamente en el campo de las máquinas rotativas, permitiendo la detección de muy diversas averías tales como desequilibrio, desalineación de cojinetes, problemas de lubricación, defectos en rodamientos, etc., sin embargo, el diagnóstico por vibraciones no ha tenido tanto éxito en el campo de las máquinas alternativas en general (motores y compresores) debido a que su interpretación resulta más compleja.

En general las máquinas rotativas poseen niveles de vibración muy bajos cuando funcionan en buen estado, por lo que cuando aparece una vibración anormal se detecta rápidamente y, lo que es más importante, puede asociarse fácilmente a algún defecto característico, por el contrario, las máquinas alternativas, debido a su principio de funcionamiento, presentan niveles de vibración relativamente altos aún cuando estén funcionando en buen estado. Esta característica hace que resulte complejo detectar un pequeño nivel adicional de vibraciones provocado por una avería incipiente cuando el nivel base de vibración es muy alto, además, cuando esta vibración adicional es detectada resulta complicado relacionarla con una avería en particular. Es por esto que el diagnóstico por vibraciones ha tenido relativamente poca utilización en el campo de la maquinaria alternativa.

El trabajo realizado surge de la necesidad de contribuir al desarrollo de técnicas para mejorar el proceso de mantenimiento de motores y compresores, que es una de las principales exigencias tanto de los fabricantes como de los usuarios.

Este trabajo de investigación ha permitido desarrollar técnicas que permiten identificar fallas en los equipos y ponderar su grado de severidad, las fallas susceptibles de ser evaluadas son:

Motor

- Detonación
- Golpe de pistón
- Golpe de válvulas de admisión y escape

Compresor:

- Golpe de cruceta
- Golpes de apertura de válvulas de admisión y descarga

La mayor parte de las tareas se han realizado en el marco de un trabajo conjunto entre la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco y la empresa Hanover Argentina, en la actualidad, la investigación se está orientando a la posibilidad de obtener un programa informático de identificación de fallas automático que permita un análisis rápido a "pié de máquina".

Desarrollo:

Durante el funcionamiento de los moto compresores se generan esfuerzos internos variables que originan vibraciones detectables en la zona circundante al lugar de origen del esfuerzo, estas vibraciones pueden transmitirse a otras partes del equipo a través de la estructura elástica del mismo. En virtud de esto puede afirmarse que todo equipo en funcionamiento presenta una "firma" de vibración que es característica. El objetivo de nuestro trabajo es identificar fallas a través del análisis de las "firmas anormales" y cuantificar su grado de severidad. Se analizarán los eventos / fallas enumerados en la introducción en forma simplificada

Fallas detectables en motores a gas con encendido por chispa:

Detonación

En un proceso normal de quemado de combustible, existe un frente de llama que avanza desde el lugar de origen (bujía) hasta ocupar toda la cámara llegando al contorno físico de la misma. En este caso, se produce una liberación progresiva y gradual de energía no provocándose gradientes de presión violentos. Durante el proceso, la porción de mezcla sin quemar, adquiere presión y temperatura y estos valores no deben llegar a los de autoinflamación antes de que sea alcanzada por el frente de llama. Si

por el contrario, esta porción de mezcla se autoinflama espontáneamente antes de que llegue el frente de llama se provoca el fenómeno conocido como detonación (knocking).

Cuando esto sucede, se produce una liberación brusca de la energía de la combustión generándose altos esfuerzos detectables mediante vibraciones y ruido. Además, este hecho provoca la "rotura" de la capa límite aislante que protege las paredes de la cámara provocándose un aumento de la transmisión de calor de los gases quemados a las paredes, generando incrementos localizados de temperatura.

Si se opera el motor en estas condiciones durante un período prolongado, se corre el riesgo de generar fisuras o perforaciones por causas térmicas o roturas de aros por vibraciones. En general, la detonación comienza a ser audible cuando sus efectos ya son moderadamente altos, por esto, es necesario utilizar instrumentación adecuada para identificarla en su comienzo y evitar operar en estas condiciones. Existen motores que cuentan con sistema de detección de detonación que generan acciones correctivas inmediatas sobre el sistema de encendido para salir de estas condiciones de operación. En mediciones realizadas sobre estos motores hemos detectado fallas en el sistema automático de corrección que no son apreciables sin instrumentación de esta clase. En la figura 1a se muestra una medición en la zona de combustión sin detonación y en la figura 1 b se observa una detonación incipiente.

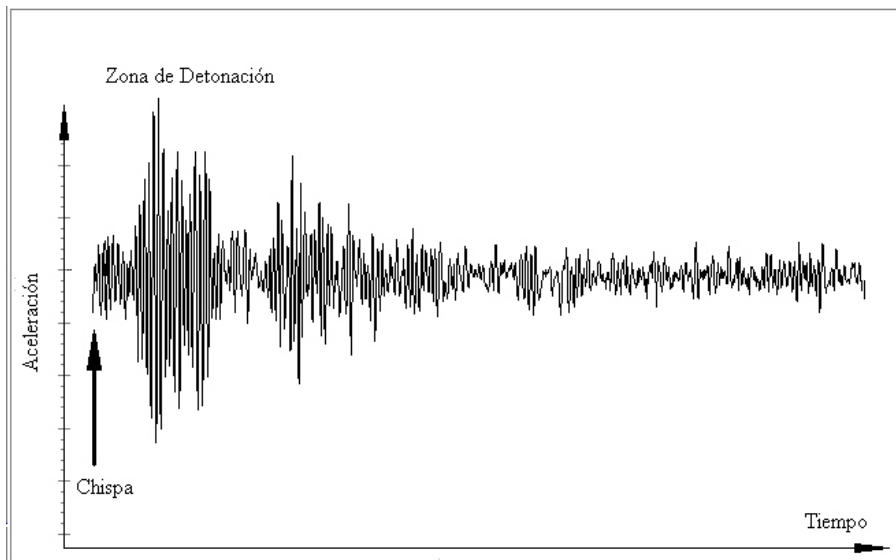


Figura 1a

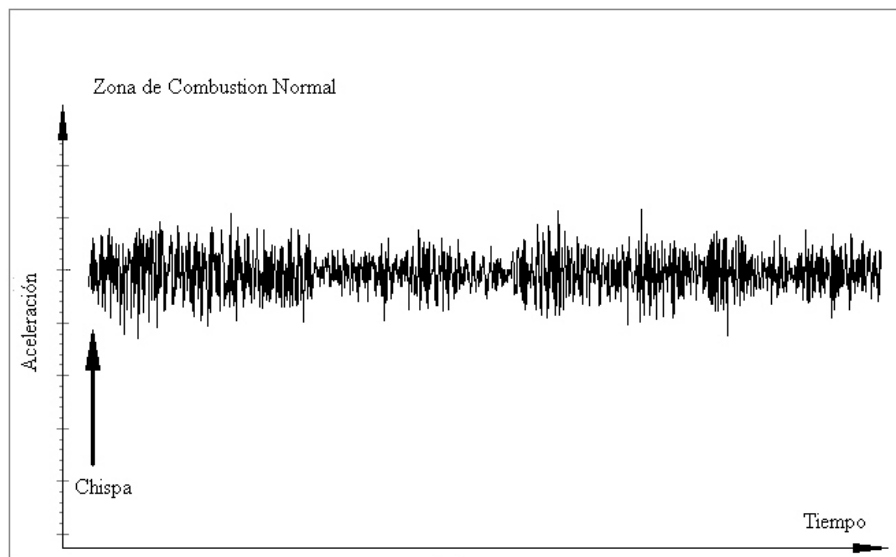


Figura 1b

Golpe de pistón

Mientras el pistón realiza su recorrido en el cilindro, aparecen fuerzas laterales debidas a la oblicuidad de la biela, a la existencia de fuerzas originadas por la presión y por la inercia. Debido a la existencia de holgura entre cilindro y pistón, cada vez que la fuerza lateral cambia de signo se produce un impacto, en caso de existir un impacto mayor a lo normal, este sería detectable mediante el análisis de vibraciones. A través de un seguimiento en las mediciones, es factible ponderar los grados de severidad del golpe y relacionarlos con los desgastes del conjunto cilindro pistón.

En la figura 2 se observa una simulación numérica del valor de la fuerza lateral de contacto entre cilindro y pistón en función del ángulo de rotación. Esta simulación tiene en cuenta tanto las fuerzas de presión como las de inercia.

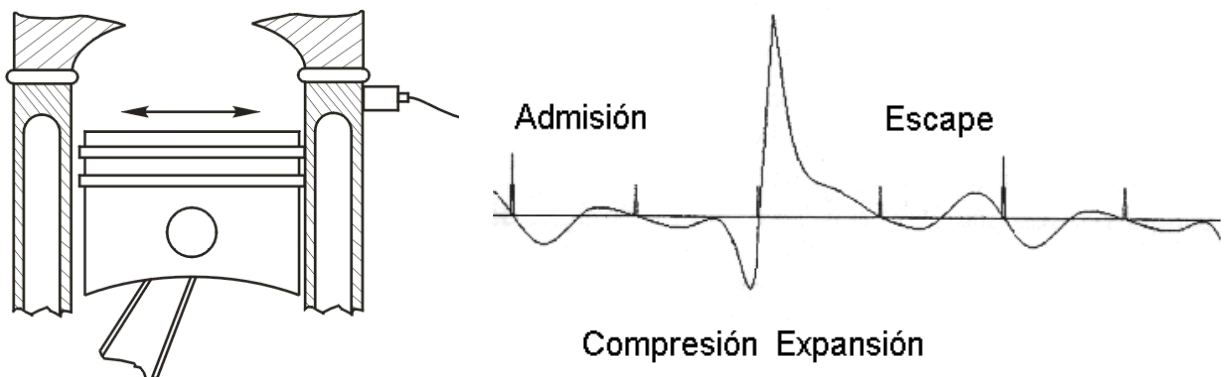


Figura 2

Golpe de válvulas de admisión y escape

En todo mecanismo de comando de válvulas existe un sistema de regulación luz cuyo valor se debe mantener dentro de las tolerancias indicadas por el fabricante, cuando estos valores están fuera de los límites se pueden generar daños.

Si la luz es insuficiente, se corre el riesgo de que la válvula no genere la estanqueidad adecuada en su período de cierre, lo que provoca no sólo deficiencias de funcionamiento sino que además se erosiona la zona de cierre de la válvula (válvula "quemada").

Si la luz es excesiva se producen impactos en el comienzo y en el final del accionamiento, esto provoca recesión de válvulas, corte de vástagos y deformaciones plásticas en los extremos de la cadena cinemática de transmisión de movimiento.

Para evitar estos inconvenientes se hace necesario realizar mantenimientos periódicos para asegurar que existan valores normales de luz de válvulas. Para simplificar el mantenimiento y evitar estos inconvenientes, algunos motores utilizan compensadores automáticos de luz (botadores hidráulicos).

En ambos casos, registrando el nivel de vibraciones en las cercanías de las válvulas se puede apreciar el impacto que se genera durante el accionamiento y el cierre. A modo de ejemplo, la figura 3 muestra el nivel de vibraciones generado durante el cierre de una válvula de admisión cuyo mecanismo está equipado con compensador automático. Se produce un golpe excesivo en forma aleatoria a raíz de una falla en la válvula del compensador, una vez corregido el defecto, los valores de vibración volvieron a la normalidad.

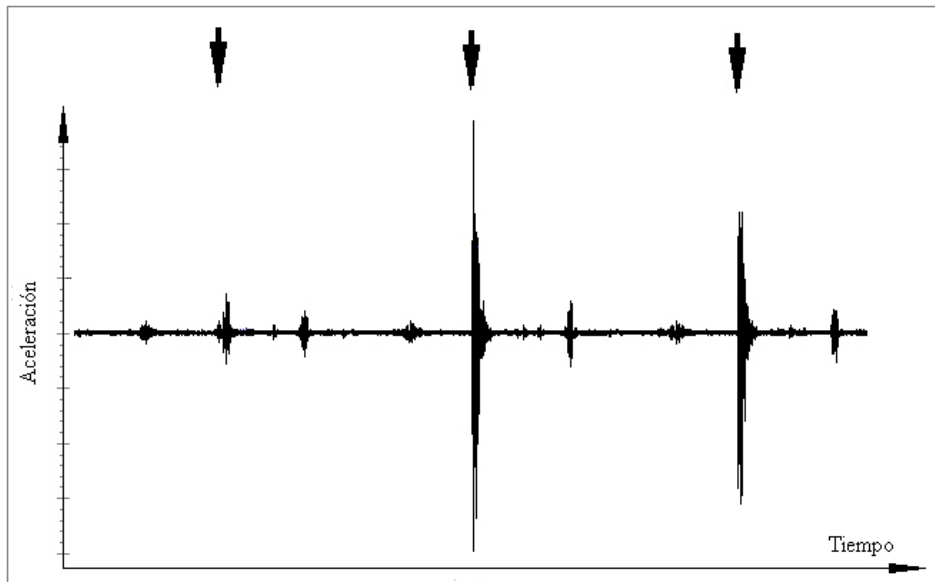


Figura 3 Las flechas indican los impactos de cierre de válvula de tres ciclos consecutivos en presencia de un defecto aleatorio del compensador hidráulico.

Fallas detectables en compresores alternativos de doble efecto:

Golpe de cruceta

El mecanismo alternativo utilizado por estos compresores se compone de un cigüeñal, bielas, crucetas, vástagos y émbolos, la figura 4 muestra un esquema simplificado del mecanismo.

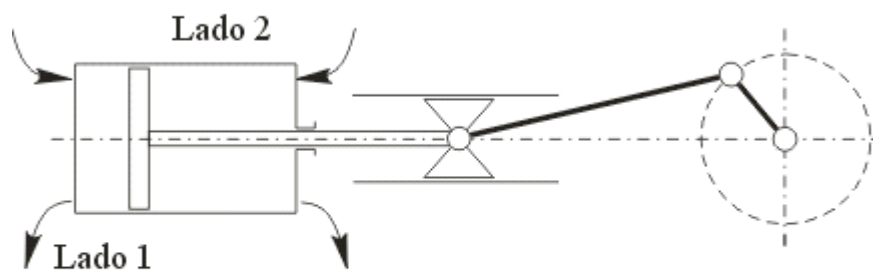


Figura 4

Durante el recorrido de la cruceta sobre las guías y debido a la oblicuidad de la biela se generan desplazamientos transversales de las crucetas, teniendo en cuenta que existe huelgo entre cruceta y guía, se producen impactos transversales. De forma similar a lo comentado para los golpes entre cilindro y pistón del motor, evaluando la severidad de las vibraciones producidas por dichos impactos se puede diagnosticar el estado del conjunto guía-cruceta.

Golpes de apertura de válvulas de admisión y descarga

Los compresores alternativos se comportan como máquinas aspirantes impelentes donde las presiones de admisión y descarga pueden variar durante la operación, este hecho establece que los mecanismos de apertura y cierre que mejor se adaptan son los de accionamiento por diferencia de presión. Para optimizar el funcionamiento, se busca que la apertura de las válvulas sea lo más rápida posible, para ello se recurre a un diseño en el que la superficie de la válvula expuesta al gas que incide sobre la misma aumenta de manera brusca al accionarse, de esta forma se garantiza un accionamiento rápido provocando vibraciones notorias durante la apertura y no en el cierre.

Además, cabe destacar que este tipo de accionamiento provoca una pequeña caída de presión en el cilindro al abrir la válvula de descarga, a raíz de ello se generan ondas de presión que se pueden detectar en caso de realizar un análisis de presión instantánea en cilindro. La figura 5 muestra las representaciones de los ciclos que se desarrollan en ambos lados del pistón.

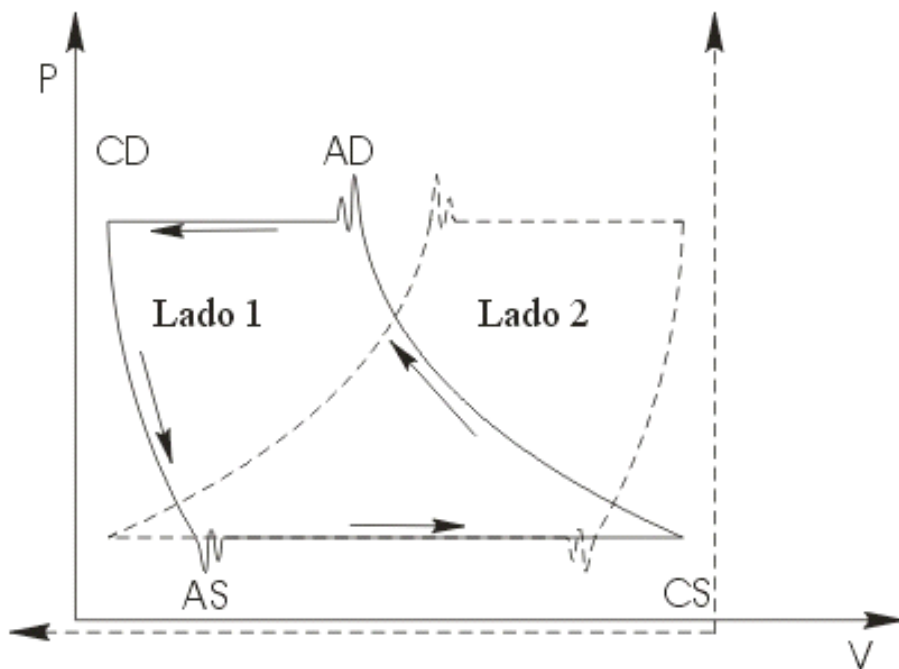


Figura 5

El nivel de vibraciones que se registra sobre las válvulas da indicaciones del funcionamiento de las mismas debiéndose tener en cuenta que las diferencias en el nivel de vibraciones no sólo se debe a anomalías de funcionamiento sino también a cambios en las condiciones de operación (diferentes presiones y velocidades).

Estrategias para la selección de los puntos de medición:

En función de los eventos que se quieren analizar es necesario identificar los puntos de medición que brindan la mejor información, para ello hay que relevar la arquitectura estructural del equipo para ubicar los puntos en los que la medición resulta más representativa. En general, los puntos deben estar lo más cerca posible de las zonas en las que se producen los eventos a evaluar, teniendo en cuenta que cuanto más directo sea el vínculo mecánico entre la ubicación del sensor y el lugar en el que se produce

el evento, la señal brindará más información. Además, deben elaborarse estrategias tendientes a identificar las vibraciones que se detectan en el punto de medición transmitidas por la estructura desde zonas alejadas dentro de la misma máquina.

Equipamiento utilizado:

Las mediciones se han realizado con acelerómetros piezoeléctricos marca Brüel & Kjaer modelo 4384 y un amplificador de carga Kistler 5011. El sistema de adquisición de datos es un desarrollo propio realizado en los laboratorios de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.

Conclusiones y desarrollos futuros:

Se puede afirmar que en caso de existir un registro de vibraciones con eventos aleatorios existe algún tipo de falla, por el contrario, cuando los registros son repetitivos, es necesario un análisis de los mismos en forma posterior para identificar si representan un buen o mal funcionamiento.

Además, se debe tener en cuenta que detectada una anomalía es necesario individualizar el lugar e instante en que se genera para poder programar las acciones correctivas a aplicar

Por la experiencia obtenida hasta el presente, se puede concluir lo siguiente:

1. Se ha confirmado que es posible identificar cualitativamente eventos que se producen en los motocompresores a través de la medición de vibraciones.
2. Se ha avanzado con gran cantidad de experiencia en el proceso de cuantificar la severidad de los eventos detectados. Esta tarea se apoya en parte en argumentaciones teóricas complementadas con la realimentación de información proveniente de la verificación experimental durante las intervenciones de mantenimiento.
3. En forma simultánea a lo expresado, actualmente la investigación se está orientando a la posibilidad de obtener un programa informático de identificación de fallas automático que permita un análisis rápido a "pié de máquina".
4. Además de las técnicas desarrolladas en el presente artículo, estamos trabajando en la interpretación de vibraciones producidas por otros eventos tales como golpes de bancada (motor y compresor), y alteraciones que se producen en el registro de vibraciones por cambios de condiciones operativas del equipo (potencia, velocidad, temperatura, etc.).
5. Paralelamente a los trabajos mencionados en el artículo, se ha hecho experiencia en el diagnóstico de compresores a tornillo, turbosobrealimentadores y trenes de engranajes de distribución de motores a gas.

El desarrollo de estas técnicas permite reemplazar algunas intervenciones de mantenimiento preventivo por mantenimiento predictivo dentro del sistema de gestión de mantenimiento general. De esta forma se puede asegurar una mayor confiabilidad y disponibilidad de los equipos además de reducir costos operativos, siendo esta una de las premisas de toda empresa que ofrece servicios de operación y mantenimiento de equipos motocompresores.

Referencias:

1. Barilá D. Bugna L., "Diagnóstico de fallas funcionales de motores de combustión interna mediante análisis de vibraciones" Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica" CONIME (UTN Gral Pacheco), 2002.
2. Barilá D. (1998) "Contribución al diagnóstico de averías en motores Diesel por análisis de vibraciones", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, España.
3. Macián V., Lerma M. And Barilá D. (1998) Condition Monitoring of Thermal Reciprocating Engines Through Analysis of Rolling Block Oscillations". S.A.E. Paper N° 980116.
4. Macián V., Torregrosa A. Y Barilá D. (1998) "Diagnóstico de Motores de Combustión Interna Alternativos a través del Análisis de las Oscilaciones del Bloque" XIII Congreso Español de Ingeniería Mecánica
5. Sohair F. Rezeka and Naeim A. Henein "A Diagnostic Technique for the Identification of Misfiring Cylinder(s)". S.A.E. Paper N° 870546.
6. Stephen J. Citron, John E. O'Higgins, and Lillian Y. Chen. "Cylinder by Cylinder Engine Pressure and Pressure Waveform Determination Utilizing Speed Fluctuations". S.A.E. Paper N° 890486.
7. Kazumasa Iida, Katsuo Akishino and Kazuo Kido "IMEP Estimation from Instantaneous Crankshaft Torque". S.A.E. Paper N° 900617.
8. Tinaut F., Melgar A., Horrillo A., Fernandez L. And Montero V. (1998) "Faults Detection in a Reciprocating Internal Combustion Engine From Instantaneous Engine Speed" 22nd CIMAC Congress.

Hoja de vida resumida de los autores:

Daniel Barilá

Edad: 37 años

Título Universitario: Ingeniero Mecánico (Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco)

Título de Post Grado: Doctor Ingeniero Industrial (Universidad Politécnica de Valencia, España).

Título de tesis: Contribución al diagnóstico de averías en motores Diesel por análisis de vibraciones.

Docente de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco en el área de Ingeniería Mecánica en asignaturas del ciclo superior.

Correo electrónico: dbarila@unpata.edu.ar

Luís Arturo Bugna

Edad: 68 años

Título Universitario: Ingeniero Industrial orientación mecánica (Universidad Nacional del Sur)

Docente de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco y de la Universidad Nacional del Sur en el área de Ingeniería Mecánica en asignaturas del ciclo superior.

Experiencia en diagnóstico y mantenimiento de motores industriales y marinos.

Correo electrónico: luisbug@surlan.com.ar

Gustavo Vignolo

Edad: 25 años

Título Universitario: Ingeniero Mecánico (Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco)

Auxiliar de docencia e investigación del Departamento de Mecánica de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.

Fernando Vignolo

Edad: 27 años

Título Universitario: Ingeniero Mecánico (Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco)

Auxiliar de docencia e investigación del Departamento de Mecánica de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.

Raúl Spinassi

Edad: 38 años

Título Universitario: Ingeniero Mecánico (Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco)

Gerente de Operaciones de Hanover Argentina SA.

Correo electrónico: rspinassi@hanover-co.com

