



Evaluation of diagnosis variable values of diesel internal combustion engine

Evaluación del valor de las variables de diagnóstico en motores de combustión interna diesel

Ing. Elio Rafael Hidalgo Batista, Ing. Carlos Batista Rodríguez, Ing. Fernando Robles Proenza

Universidad de Holguín, Reparto Piedra Blanca, Holguín, Cuba.

ABSTRACT. The article approaches how to evaluate the values that the diagnosis variables take, which characterize the technical state of diesel internal combustion engine. The analysis can help to find in the data available, significant and useful information to know the causes of the changes in the diagnosis variable values. In addition, it allows evaluating them before they get to the limits defined by the manufacturer's information. That information can facilitate the opportune decision-making while the diesel internal combustion engine is operated.

Keywords: Analysis of data, variation of the value, technical state.

RESUMEN. El artículo aborda como evaluar los valores que toman las variables de diagnóstico, que caracterizan el estado técnico de los motores de combustión interna Diesel de los grupos electrógenos. El análisis puede ayudar a encontrar en los datos disponibles la información más ilustrativa, significativa y útil para conocer el porqué de los cambios de los valores de la variable de diagnóstico. Además permite evaluar a los mismos antes que lleguen a los límites definidos por el fabricante, información que puede facilitar la toma de decisiones oportunas durante el trabajo de los motores de combustión interna Diesel mientras se explotan.

Palabras clave: análisis de datos, variación del valor, estado técnico.

INTRODUCTION

The measurement and registry of the different values of the machines structural and functional parameters can be assigned to diagnosis variables (sometimes also called parameters of diagnosis). When sensors connected permanently in the system are controlled to diagnose and the values are automatically registered and kept in a historical data, not always this fact that seems simple, implies to count on suitable methods and means of this measurement procedure, which is known like continuous monitoring (*on line*) (Silva *et al.*, 2001). In opposite case, the measurements and registry of the data made every certain time interval, which is known like discreet monitoring (*off line*), is not discarded now.

Camacho *et al.* (2007), stated the following "The methods of detection and diagnosis of faults based on historical data are the most applied in the industries of processes, because they are easy to be implemented, do not need a mathematical model of the process and require little a priori knowledge of the process

INTRODUCCIÓN

La medición y el registro de los diferentes valores de los parámetros estructurales y funcionales de las máquinas pueden ser asignados a variables de diagnóstico (en ocasiones llamados también parámetros de diagnóstico). Cuando se poseen sensores conectados permanentemente en el sistema a diagnosticar y los valores son registrados automáticamente y guardados en una data histórica, no siempre este hecho que parece simple implica contar con adecuados métodos y medios de medición este procedimiento es conocido como monitorización continua (*on line*) Silva *et al.* (2001). En caso contrario, las mediciones y el registro de los datos se realizan cada cierto intervalo de tiempo, lo que es conocido como monitorización discreta (*off line*), no descartado en la actualidad.

Camacho *et al.* (2007), plantean lo siguiente "Los métodos de detección y diagnóstico de fallas basados en data histórica son los más aplicados en las industrias de procesos, debido a que son fáciles de implementar, no necesitan un modelo matemático

and the faults". That criterion is shared by the authors of this research, but it is valid whenever there is correct and reliable previous information, not always available.

Regarding the previous exposition reiterated by Camacho et al. (2007), it is important to indicate that "In the methods based on historical data, the detection and diagnosis of faults are made by means of the processing a great volume of data. Due to this, several ways exist in which the data can be changed and presented like a priori knowledge for the diagnosis system". The expert systems, the methods based on fuzzy logic and the qualitative analyses of tendency are examples of methods of qualitative extraction. For the case of methods of quantitative extraction, in Literature, neuronal networks and statistical techniques, appear widely used. Statistical techniques such as: the Square Analysis of Principal Components (PCA), Partial Minimums (PLS), the Discriminate Analysis of Fisher (FDA), the Analysis of Variables Canonicals (CVA) and the Analysis of Independent Components (ICA) have been applied in the detection and diagnosis of faults previously. These methods as used in the diagnosis, must be used together to determine the faults (Cigolini, 2009).

Specialized literature in data analysis, considers that the evaluation of the behavior of variables should be made through control graphs. For example, Escalante (2003), defines to the graphs of control like tools that show the performance of a process with respect to the time, being its objective to evaluate, to control and to improve its processes. In them, the process is evaluated as stable if the data are within the control limits and unstable if they are outside such.

The authors of this work maintain the most concrete criterion referring that the control graphs evaluate the behavior of the variable with two criteria: good (stable) and critic (unstable), and they do not only analyze the fluctuation of the variable data within the control limits. This asseveration facilitates a better interpretation of the phenomenon under study and allows objectively reaching improving proposals.

Escalante (2003) stated there are three methods of analyses to know the tendency an event: the method of visual examination of the graph, of the line of tendency and the rule of the filters. The three methods only determine if the tendency of an event is bullish or bearish, they do not look for the causes of the line of tendency abrupt rupture, therefore it is inferred that the forecast actions before indicated (logistic and of organizational assurance), are outside the problem.

"The more used means to detect the tendency of a series are based on the application of filters to the data. A filter is not more than a mathematical function that applied to the values of the series produces a new series with certain characteristics. Among those filters we found the mobile means"¹. "There are other procedures to extract the tendency, as adjustment of polynomials, smoothed by means of exponential functions, etc. A filter class, that is particularly useful to eliminate the tendency, is based on applying differences to the series until turning it stationary. A difference of first order is obtained reducing two contiguous values". These methods only allow obtaining new

del proceso y requieren poco conocimiento a priori del proceso y las fallas", lo cual se comparte, pero es válido en la medida que se cuente con una correcta y confiable información anterior, no siempre dispuesta.

Es importante señalar, a tono con el planteamiento anterior lo reiterado por Camacho *et al.* (2007), en el sentido de que "En los métodos basados en data histórica, la detección y diagnóstico de fallas se realiza mediante el procesamiento de un gran volumen de ella. Debido a esto, existen varias maneras en que la data pueda ser trasformada y presentada como un conocimiento a priori para el sistema de diagnóstico". Los sistemas expertos, los métodos basados en lógica difusa y los análisis de tendencia cualitativos son ejemplos de métodos de extracción cualitativa. Para el caso de métodos de extracción cuantitativa, en la literatura aparecen ampliamente usadas las redes neuronales y las técnicas estadísticas. Técnicas estadística tales como: el Análisis de Componentes Principales (PCA), Mínimos Cuadrados Parciales (PLS), el Análisis Discriminante de Fisher (FDA), el Análisis de Variables Canónicas (CVA) y el Análisis de Componentes Independientes (ICA) han sido aplicadas en la detección y diagnóstico de fallas con anterioridad". Estos métodos al ser utilizados en el diagnóstico deben de ser utilizados de forma conjunta para determinar las fallas (Cigolini, 2009).

En la literatura especializada acerca de análisis de datos se plantea que la evaluación del comportamiento de las variables se debe realizar a través de gráficos de control, por ejemplo Escalante (2003), define a los gráficos de control como herramientas que muestran el desempeño de un proceso con respecto al tiempo, siendo su objetivo el de evaluar, controlar y mejorar sus procesos. En ellos el proceso se evalúa estable si se encuentran los datos dentro de los límites de control e inestable si están fuera de los mismos. El criterio más concreto de que los gráficos de control solamente evalúan el comportamiento de la variable con dos criterios bueno (estable) y crítico (inestable) y no analizan la fluctuación de los datos de la variable dentro de los límites de control, con esta aseveración se puede facilitar mejor la interpretación del fenómeno objeto de estudio y llegar a propuestas de mejora de manera más objetivas.

En la actualidad el Escalante (2003), describe que para conocer la tendencia de un evento existen tres métodos de análisis que son: el método del examen visual del gráfico; de la línea de tendencia y la regla de los filtros. Los tres métodos solamente determinan si la tendencia de un evento es alcista o bajista, ninguno busca las causas del porqué de la ruptura brusca de la línea de tendencia, por tanto se infiere que las acciones antes señaladas de previsión (logística y de aseguramiento organizacional) quedan al margen del problema.

"Los medios más utilizados para detectar la tendencia de una serie se basan en la aplicación de filtros a los datos. Un filtro no es más que una función matemática que aplicada a los valores de la serie produce una nueva serie con unas características determinadas. Entre esos filtros encontramos las medias móviles"¹. "Existen otros procedimientos para extraer la tendencia, como ajuste de polinomios, alisado mediante funciones

¹ MOLINERO, L.M.: Análisis de series temporales, [en línea], 7 de junio de 2012, Disponible en: <http://www.seh.lelha.org/stat 1.htm>.

smoother series from the initial data, but they do not let to know the reason of the variation.

From the study of the methods referred by the authors previously mentioned, Batista y Urquiza, (2008), expose three methods for the analysis of the values of diagnosis variables that are within the technique of tendency analyses and that for their objectivity deserve to be analyzed:

First: comparative state of the value of the variables with respect to the warning levels or alarm that have been

established, according to recommendations of the manufacturer, well-known and studied norms that adjusts to the conditions of work of the evaluated machines, or according to established own norms for each one of the machines from its particular conditions of operation.

Second: Comparative method (MC). Through the reason of growth of value of the variables, as it is declared in ISO 2372-1974 norm.

Third: Rapidity of change of value of the variables (RCVV). This method consists in calculating the average rate of change (R_{i-j}) of the variable value between two different moments of time i and j (time interval of work), that is the time worked by the machine between two consecutive measurements.

From the analysis made to Batista y Urquiza' methods (2008), it is possible to conclude: the first presents the disadvantage to evaluate the state of the variable in good or critical, in good while the value of the variable is within the limits defined by the manufacturer and in critic when this value has exceeded the limit. The second one was elaborated to evaluate the amplitude of the vibrations (as important variable for the object of study of the present work) and to use it in the evaluation of other variables, where it is necessary to elaborate its rules again.

The third one, while calculating the rapidity of changing of the variable value, provides better information and evaluation of its state. Nevertheless, to know the RCVV, the time the machine has worked between two consecutive measurements must be place in the denominator. Such data is sometimes difficult to be obtained. In addition, in their interpretation rules, expressions such as relatively great and small are used. Due to this, the authors of the proposal state that the effectiveness of the analysis of cases, when applying this method, depends on the experience of the specialist and the way the mathematical instruments of estimation are utilized.

Through the techniques of Mining of Data, it is known that in many occasions the datum does not directly reveal its relation with a particular phenomenon, but often the datum hides the necessary and effective information to make a correct technical diagnosis and interpretation of the obtained result, which makes necessary to design technologies that allow extracting this information to be used (Larose, 2005).

In addition to the previous authors, some others have studied the conditions of monitoring or the data or variable values of the variables like method to evaluate the state of an internal combustion engine or to know the presence the faults in this equipment. These authors are:

Porteiro *et al.* (2011), who outline that the condition of the industrial equipment monitoring in general, and individual of

exponenciales, etc. Una clase de filtro, que es particularmente útil para eliminar la tendencia, se basa en aplicar diferencias a la serie hasta convertirla en estacionaria. Una diferencia de primer orden se obtiene restando dos valores contiguos". Estos métodos solamente permiten obtener nuevas series más suaves a partir de los datos iniciales pero no se conoce el porqué de su variación.

A partir del estudio de los métodos abordados por los autores anteriormente citados, Batista y Urquiza, (2008), expone tres métodos para el análisis de los valores de variables de diagnóstico que se encuentra dentro de la técnica de análisis de tendencia y que por su objetividad merecen analizarse los mismos son los siguientes:

Estado comparativo del valor de las variables con respecto a los niveles de aviso o alarma que se hayan establecido, según recomendaciones del fabricante, normas conocidas y estudiadas que se ajustan a las condiciones de trabajo de las máquinas evaluadas, o según normas propias establecidas para cada una de las máquinas a partir de sus condiciones particulares de explotación. Método comparativo (MC). A través de la razón de crecimiento del valor de la variable, según se declara en la norma ISO 2372-1974.

Rapidez de cambio del valor de la variable (RCVV). Este método consiste en calcular la rapidez media de cambio (R_{i-j}) del valor de la variable entre dos instantes de tiempo diferentes i y j (intervalo de tiempo de trabajo), que no es más que el tiempo que ha trabajado la máquina entre dos mediciones consecutivas.

Del análisis realizado a los tres métodos de Batista y Urquiza (2008), se concluye: el primero presenta la desventaja de evaluar el estado de la variable solamente en bueno o crítico, en bueno mientras el valor de la variable se encuentra dentro de los límites definidos por el fabricante y en crítico cuando este valor ha sobrepasado el límite. El segundo fue elaborado para evaluar las amplitudes de las vibraciones (como variables importantes para el objeto de estudio del presente trabajo) y para usarlo en la evaluación de otras variables donde es necesario reelaborar sus reglas.

El tercero al calcular la rapidez de cambio del valor de la variable se obtiene una mejor información y evaluación del estado de la misma. Sin embargo para conocer la RCVV se debe colocar en el denominador el tiempo que ha trabajado la máquina entre dos mediciones consecutivas. Tal dato en ocasiones es difícil de obtener, además en sus reglas de interpretación se usan expresiones tales como: relativamente grande y pequeña. Debido a esto los autores de la propuesta plantean que la efectividad del análisis de casos, al aplicar este método, está en dependencia de la experticia del especialista y como se manejan los instrumentos matemáticos de estimación.

A través de las técnicas de Minería de Datos se conoce que, en muchas ocasiones el dato no revela directamente su relación con un fenómeno en particular, pero, en cambio, muchas veces el dato oculta la información necesaria y efectiva para realizar un diagnóstico técnico correcto, y como interpretar correctamente el resultado obtenido lo cual hace necesario diseñar tecnologías que permitan extraer dicha información para ser utilizada, ver en Larose (2005).

Además de los autores anteriores varios han estudiado las condiciones de monitoreo es decir los datos o valores de las variables como método para evaluar el estado de un motor de combustión interna o conocer el surgimiento de las fallas en

diesel engines, is very important to assure the production and to reduce the costs in all the industrial facilities. The diesel engines, is very important to assure the production and to reduce the costs in all the industrial facilities.

Li *et al.* (2012), who state that the normal operation of marine diesel engines assures the completion and the effectiveness of a trip. Any fault can generate significant economic losses and to severe accidents. It is therefore crucial, to supervise the conditions of the engine in a reliable and opportune way to prevent its bad operation.

Figlus *et al.* (2014), refer that a change in the technical specification of mechanical components of internal combustion engines cannot be detected by the systems of diagnosis on board installed in vehicles. In similar cases, the measures and the analyses of the vibrant acoustics signals that are registered can be useful. The authors of this work consider that, because the systems of diagnosis register several variables, and that context makes it difficult to determine the relation between the presence of the failures and the variables of diagnosis.

Jinming *et al.* (2012), present a new method that relates, through the empirical mode of decomposition technique (EMD), the signals of the vibration of the butt surface produced by the separation of the valve with the failures of the diesel engine.

Albarbar (2013) outlines the acoustic signals emitted by the diesel engines convey useful indicators on their conditions of operation and state of functioning. The author proposes to use the technique continuous wavelet transform (CWT) to determine the relation between the variations of the speed and the load of the engine, with the fault detection during the injection of the engine and failures related to the lubrication.

Kateris *et al.* (2014) analyze that recently, the investigations have been centered in the putting into practice the analysis of the vibration signals for the diagnosis of the functioning state of the systems. In the article, the authors elaborate a diagnosis system based on neuronal networks that relates the vibrations to the failures to detect the failures in the bearings of rotatory machines.

Authors such as: Kim *et al.* (2013) and Deng y Zhao (2014) refer the importance of the diagnosis in real time. Deng y Zhao (2014) approach in his article the difficulty to extract the useful characteristics of the vibration signals and propose an integral method for the extraction of the failure characteristics based on the kurtosis and the energy of Teager. In addition, Zhang *et al.* (2014) based on the estimation of the density of Kernel and on the divergence of Kullback-Leibler, propose a statistical method for the diagnosis of failures.

Due to before exposed and to the importance of having a correct evaluation of the variables, the authors of the work, after studying the different methods of Analyses of Tendency, statistical, series of time, the graphs of control and the analysis the condition monitoring, conclude the necessity of having a procedure or method to find, in the available data, the necessary, significant and useful information to know the causes of the changes in the values of the variable and simul-

estos equipos, estos autores se relacionan a continuación:

Porteiro *et al.* (2011), esbozan que el monitoreo de la condición de los equipos industriales en general, y en particular de los motores diesel, es muy importante para asegurar la producción y reducir los costos en todas las instalaciones industriales.

Li *et al.* (2012), plantean que la operación normal de los motores Diesel marinos asegura la terminación y la eficacia de un viaje. Cualquier falla puede dar lugar a pérdidas económicas significativas y a accidentes severos. Es por lo tanto crucial supervisar las condiciones del motor de una manera confiable y oportuna para prevenir el mal funcionamiento de los mismos.

Figlus *et al.* (2014), plantean que un cambio en las condiciones técnicas de componentes mecánicos de los motores de combustión interna no puede ser detectado por los sistemas del diagnóstico a bordo instalados en vehículos. En casos similares, las medidas y los análisis de las señales vibro acústicas que sean registradas pueden ser útiles. Este planteamiento lo realizan Figlus *et al.* (2014), porque los sistemas del diagnóstico registran varias variables, contexto que dificultad determinar la relación entre el surgimiento de los fallos y las variables de diagnóstico.

Jinming *et al.* (2012), dan a conocer un nuevo método donde relaciona a través de la técnica modo de descomposición empírica (EMD sus siglas en inglés) las señales de la vibración de la superficie de la culata producidas por la separación de la válvula con las averías del motor Diesel.

Albarbar (2013), esboza lo siguiente las señales acústicas emitidas por los motores Diesel llevan indicadores útiles sobre sus condiciones de funcionamiento y estado de salud. Para determinar la relación entre las variaciones de la velocidad y la carga del motor con la detección de las fallas durante la inyección del motor y además y las averías relacionadas con la lubricación usa la técnica *continuous wavelet transform* (CWT).

Kateris *et al.* (2014), analizan que recientemente, las investigaciones se han centrado en la puesta en práctica del análisis de las señales de la vibración para el diagnóstico del estado de salud de los sistemas, en el artículo los autores elaboran en sistema de diagnóstico basado en redes neuronales que relaciona las vibraciones con los fallos para detectar las averías surgidas en los cojinetes de máquinas rotatorias.

Autores tales como: Kim *et al.* (2013); Deng y Zhao (2014), plantean la importancia del diagnóstico en tiempo real. Deng y Zhao (2014), aborda en su artículo la dificultad de extraer las características útiles de las señales de las vibraciones y propone un método integral para la extracción de las características de la avería basado en la kurtosis y en la energía de Teager. Además Zhang *et al.* (2014), se basan en la estimación de la densidad de Kernel y en la divergencia de Kullback-Leibler para proponer un método de corte estadístico para el diagnóstico de averías.

Debido a lo antes expuesto y a la importancia de disponer de una correcta evaluación de las variables es que los autores del trabajo, después de estudiar los diferentes métodos de Análisis de Tendencia, estadísticos, series de tiempo, los gráficos de control y el análisis de las condiciones de monitorización llegan a la conclusión de la necesidad de disponer de un procedimiento o método que pueda ayudar a encontrar en los datos disponibles la información más ilustrativa, significativa y útil para conocer

taneously, this knowledge is used in the technical diagnosis of the engines of internal combustion (MCI) Diesel engine of generator sets destined to the generation of electricity in the country, being this central objective of the work.

This analysis has allowed the authors the search of a theoretical procedure that allows objectively evaluating the state of a diagnosis symptom. That is also a source of information to be used in the process of equipment diagnosis and thus to evaluate correctly their technical state to propose correction measures and forecast to improve the motors operation

METHODS

In order to develop the investigation whose results are exposed in this article, authors used theoretical methods of investigation as analysis and synthesis and historical - logical for the study of the object through the time and to develop a logical analysis.

The techniques used in the harvesting of the data were participant observation, official documents of the company: technical files, internal registries of maintenances and documents.

Mathematical development of the formula to evaluate the variation of the value of the diagnosis variable

The formula to evaluate the variation of the value of the diagnosis variable will be used in a case study where the state of the diagnosis variables registered in fixed diesel internal combustion engines is going to be evaluated.

The formula to evaluate the variation of the value of the diagnosis variable will be used in a case study where the state of the diagnosis variables registered in fixed diesel internal combustion engines is going to be evaluated.

In practical life it is not only of interest to know how a function in an interval varies, but also it is of interest to determine the instantaneous variation of that function in a point within that interval, and the causes that provoke it. This variation or increase is known if differential calculus is applied to the function. This method is the one used to obtain the formula set out in the work, to evaluate the values of the diagnosis variables regarding the limits defined by the manufacturer in diesel internal combustion engines of the generator sets.

The study begins with the assumption that between two consecutive measurements there will always be a linear function so that, knowing X and Y values in the moment “n-1”, the value of the function at moment “n”, can be calculated given by expression 1:

$$f_n(x) = y_{n-1} + kx_{n-1} \tag{1}$$

Where:

y_{n-1} Value of the variable and at the moment n-1;

x_{n-1} Value of variable X at the moment n-1.;

k Constant.

If the increase of the function is calculated now, the expression 2 will be obtained, in which variable “x” can take values

el porqué de los cambios de los valores de la variable y a la vez este conocimiento sea utilizado en el diagnóstico técnico de los motores de combustión interna (MCI) Diesel de grupos electrógenos destinados a la generación de electricidad en el país, siendo este el objetivo central del trabajo.

Este análisis ha permitido la búsqueda de un procedimiento teórico que permita evaluar de forma objetiva el estado de un síntoma de diagnóstico, que a su vez sea fuente de información para ser utilizado en el proceso de diagnóstico de los equipos y así evaluar correctamente su estado técnico y poder proponer medidas de corrección y previsión para mejorar el funcionamiento en este caso de los motores.

MÉTODOS

Para desarrollar la investigación cuyos resultados se exponen en este artículo se emplearon métodos de investigación teóricos como son: análisis y síntesis e histórico – lógico para el estudio del objeto a través del tiempo y llegar a un análisis lógico.

Las técnicas empleadas en la recolección de los datos fueron: observación participante, documentos oficiales de la empresa: expedientes técnicos, registros de mantenimientos y documentos internos.

Desarrollo matemático de la expresión para evaluar la variación del valor de la variable de diagnóstico

La fórmula para evaluar la variación del valor de la variable de diagnóstico se utilizará en un caso de estudio donde se va a evaluar el estado de las variables de diagnóstico registradas en motores de combustión interna Diesel estacionarios.

En la vida práctica no solamente interesa conocer como varía una función en un intervalo, sino también es de interés determinar la variación instantánea de esa función en un punto dentro de ese intervalo, y las causas que la provocan, está variación o incremento es conocida si se le aplica el cálculo diferencial a la función. Este método es el utilizado para obtener la expresión, que se propone en el trabajo, para evaluar el paso de los valores de las variables de diagnóstico dentro de los límites definidos por el fabricante en los motores de combustión interna Diesel de los grupos electrógenos.

Para el estudio se parte del supuesto de que entre dos mediciones consecutivas se dispondrá siempre de una función lineal tal que, conocido el valor de Y y X en el instante “n-1”, se pueda calcular el valor de la función en el instante “n”, dada por la expresión 1:

$$f_n(x) = y_{n-1} + kx_{n-1} \tag{1}$$

donde:

y_{n-1} Valor de la variable Y en el instante n-1;

x_{n-1} Valor de la variable X en el instante n-1;

k Constante.

Si se calcula ahora el incremento de la función, se obtendrá la expresión 2, en la cual la variable “x” puede tomar valores en el intervalo cerrado [a, b], donde “a” y “b” son los valores

in the closed interval [a, b], where “a” and “b” are the superior and inferior value limits of the variable, respectively:

$$\begin{aligned} \Delta f_n(x) &= f_n(x + \Delta x) - f(x) \\ \Delta f_n(x) &= y_{n+1} + k(x + \Delta x) - f_n(x) \end{aligned} \quad (2)$$

Where:

$\Delta f_n(x)$ - Average variation of the function or increase of the function.

Δx - variation of the value of variable X.

From the expression 2, it is clear that the increase or decrease of the variable is given by the constant “k”, which can be cleared as it is in expression 3:

$$k = \frac{\Delta f_n(x)}{\Delta x} \quad (3)$$

The calculation of the variation of the value, that in ahead will be denoted by “V_v”, is expressed through expression 3, where the difference the images of expression 1 can be represented by (Y_n-Y_{n-1}). The difference of the value of the dominion given by the difference between the limits of the interval; in this case, they represent the superior and inferior limit defined values for the variable analyzed.

Definitively, expression 3 takes the form:

$$V_v = \frac{Y_n - Y_{n-1}}{SL - IL} \quad (4)$$

Where:

V_v -variation of the value of the variable (dimensionless);

Y_n -value of the variable at moment “n”;

Y_{n-1} -value of the variable at the moment “n-1”;

SL -superior limit of the variable studied;

IL -inferior limit of the variable studied.

The variation of the value of the variable can be found between 0 and -1 when the values of the variable studied are decreasing and it takes values between 0 and 1 when the variable is increasing.

Procedure to evaluate the variation of the value of the diagnosis variables in internal combustion engines of the generator sets

Steps:

1. To make the calculation of the variation of the value of the variable by equation 4
2. To apply the following rules for the evaluation of the variable:

Rules

1. If VV = 0 there is no change in the state of the variable. Stable State [E].
2. If VV is equal to 1 there is a significant change of the state of the variable, serious symptom for the operation of the equipment. Critical State [C].

If V_v is between 0 and 1 there is a gradual change of its state; the probability of the existence of a failure increases as the value of V_v increases and therefore its state begins to deteriorate until critical. State of analysis [An].

límites superior e inferior, respectivamente, de la variable:

$$\begin{aligned} \Delta f_n(x) &= f_n(x + \Delta x) - f(x) \\ \Delta f_n(x) &= y_{n+1} + k(x + \Delta x) - f_n(x) \end{aligned} \quad (2)$$

donde:

$\Delta f_n(x)$ - variación media de la función o incremento de la función.

Δx - variación del valor de la variable X.

A partir de la expresión 2, resulta claro que el incremento o decrecimiento de la variable está dado por la constante “k”, la cual puede ser despejada como se muestra en la expresión 3:

$$k = \frac{\Delta f_n(x)}{\Delta x} \quad (3)$$

El cálculo de la variación del valor, que en lo adelante se denotará por “V_v”, se expresa a través de la expresión 3, donde la diferencia de las imágenes de la expresión 1 se pueden representar por (Y_n - Y_{n-1}) y la diferencia del valor del dominio está dado por la diferencia entre los límites del intervalo, en este caso representan los valores límite superior e inferior definidos para la variable que se analiza.

Definitivamente, la expresión 3 toma la forma:

$$V_v = \frac{Y_n - Y_{n-1}}{SL - IL} \quad (4)$$

donde:

V_v -variación del valor de la variable (adimensional);

Y_n -valor de la variable en el instante “n”;

Y_{n-1} -valor de la variable en el instante “n-1”;

Y_s -límite superior de la variable que se estudia;

Y_i -límite inferior de la variable que se estudia.

La variación del valor de la variable se puede encontrar entre 0 y -1 cuando los valores de la variable que se estudia son decrecientes y toma valores entre 0 y 1 cuando la variable es creciente.

Procedimiento para evaluar la variación del valor de las variables de diagnóstico en motores de combustión interna de los grupos electrógenos

Pasos:

1. Realizar el cálculo de la variación del valor de la variable por la ecuación 4
2. Aplicar las reglas siguientes para la evaluación de la variable:

Reglas

1. Si V_v = 0 no existe cambio en el estado de la variable. Estado Estable [E].
2. Si V_v es igual a 1 hay un cambio significativo del estado de la variable, síntoma grave para el funcionamiento del equipo. Estado Crítico [C].

Si V_v se encuentra entre 0 y 1 existe un cambio paulatino de su estado, según aumente el valor de V_v la probabilidad de la existencia de un fallo aumenta y por ende su estado comienza a deteriorarse hasta llegar a crítico. Estado de análisis [An].

To elaborate a graphic of the normal value and the variation of the value of the variable.

RESULTS AND DISCUSSION

Example of calculation of the variation of the value of the variable

In the work, the Table 1 of random form for a period of ten days calculation is in the table of the variation of the value for a variable (fuel pressure) of an internal combustion engine of a generator set. The variation was calculated for the 8 public variables of 22 MCI of the existing 32 in a location of electricity generation, representing 61.1 % of the total. The values took within a period de10 months through of Regime of Control Book of the Engine in Operation, instituted in the company.

In Table 1 the fall of pressure of gradual form is observed being more significant between days 8 and 9. By means of the comparative method, see Table 1, the values of the variable are always in the state Good for being within the limits defined by the manufacturer for the pressure of the fuel. They are: 0,38 inferior limit and 0,7 superior limit MPa under normal conditions of work of the equipment: speed 1800 min⁻¹ and 75 % of load 1416 kW of power.

By means of the procedure to evaluate the variation of the value of the diagnosis variables, the values of the variable are in rule 1 and 3 in stable state and of analysis (Table 1)

Graficar el valor normal y la variación del valor de la variable.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ejemplo de cálculo de la variación del valor de la variable

En el trabajo se muestra en la Tabla 1 de forma aleatoria para un período de diez días el cálculo de la variación del valor para una variable (presión de combustible) de un motor de combustión interna de un grupo electrógeno. La variación se calculó para las 8 variables públicas de 22 MCI de los 32 existentes en un emplazamiento de generación de electricidad, representando el 61,1 % del total. Los valores se tomaron dentro de un período de 10 meses a través del Libro de Control de Régimen del Motor en Marcha, instituido en la empresa.

En la Tabla 1 se observa la caída de presión de forma paulatina siendo más significativa entre los días 8 y 9. Por el método comparativo, ver tabla 1, los valores de la variable se encuentran siempre en el estado Bueno por hallarse dentro de los límites definidos por el fabricante para la presión del combustible, siendo los mismos los siguientes: límite inferior 0,38 y límite superior 0,7 MPa bajo condiciones normales de trabajo del equipo: velocidad 1800 min⁻¹ y 75 % de carga 1416 kW de potencia.

Por el procedimiento para evaluar la variación del valor de las variables de diagnóstico los valores de la variable se encuentran en la regla 1 y 3 en estado estable y de análisis (Tabla 1).

TABLE 1. Calculation of the variation of the value
TABLA 1. Cálculo de la variación del valor

Days	Value of the fuel pressure. MPa	Variation of value Vv	Evaluation of the value by the comparative method	Evaluation of the variation of the value by Vv
1	0,64		B	E
2	0,64	0,00	B	E
3	0,64	0,00	B	An
4	0,60	-0,13	B	An
5	0,53	-0,22	B	An
6	0,52	-0,03	B	An
7	0,56	0,13	B	An
8	0,58	0,06	B	An
9	0,47	-0,34	B	An
10	0,57	0,31	B	

The graphs of Figures 1 and 2 are made with the data of Table 1, which allow reaching the following valuations.

In Figure 1, the graphical analysis of the behavior of the values of the fuel pressure variable of an installed internal combustion engine in a location of electricity generation. There it is possible to observe through the comparative method how the values of the variable stay within the range of work defined by the manufacturer. That visual examination of the graphic allows concluding that the variation of the values of the variable of the internal combustion engine under normal conditions of work, previously described, does not enable to know if this variation is due to the appearance of a potential failure in the equipment fuel system because the values are between 0,38 and 0,7 MPa.

Con los datos de la Tabla 1 se realizan las gráficas de las Figuras 1 y 2 las que permiten llegar a las siguientes valoraciones.

En la Figura 1, se realiza el análisis gráfico del comportamiento del los valores de la variable presión del combustible de un motor de combustión interna instalado en un emplazamiento de generación de electricidad. En la misma se observa, a través del método comparativo, cómo los valores de la variable se mantienen dentro del rango de trabajo definido por el fabricante, este examen visual del gráfico permite concluir que la variación de los valores de la variable del motor de combustión interna bajos las condiciones normales de trabajo, descritas anteriormente, no permite conocer si esta variación es producto al surgimiento de un fallo potencial en el sistema de combustible del equipo debido a que los valores se encuentran entre 0,38 y 0,7 MPa.

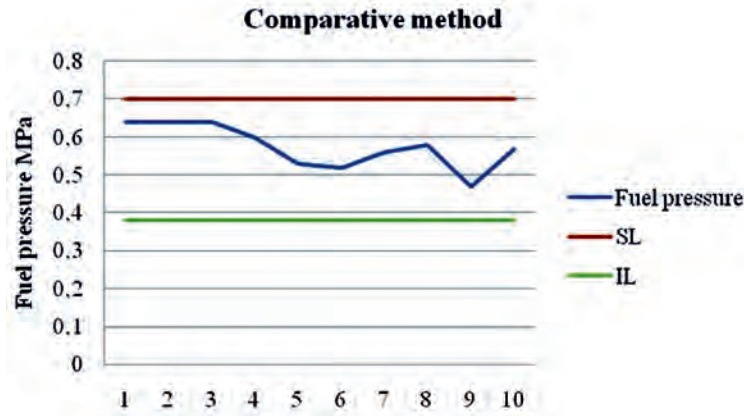


FIGURE 1. Graphical analysis of the values of the variable by the MCI.
 FIGURA 1. Análisis gráfico de los valores de la variable por el MC.

Figure 2 allows knowing how the variation of the values of the variable is within the limits from 0,7 to 0,38 MPa. For example, the variations between the eighth and ninth, and between the quarter and fifth days is of analysis because those variations are related to rule number 3, they take values from -0,34 and -0,22.

This visual and numerical examination of the values of the variable allows knowing that there is a disturbance in the process, in the structural and nonstructural elements related to the pressure fuel of the MCI. It means that a failure can be happening (a potential or a functional developed failure is identified) either in the fuel filter, the temperature or the fuel viscosity among others.

La Figura 2 permite conocer cómo es la variación o el paso de los valores de la variable dentro del límite de 0,7 a 0,38 MPa, por ejemplo el paso entre el octavo y noveno, y entre el cuarto y quinto día es de análisis producto a que la variación se enmarca en la regla número 3, toman valores de -0,34 y -0,22.

Este examen visual y numérico de los valores de la variable permite conocer que existe una perturbación en el proceso en particular en los elementos estructurales y no estructurales relacionados con la presión del combustible del MCI es decir puede estar ocurriendo un fallo (o se identifica un fallo potencial o uno funcional ya desarrollado) ya sea en el filtro de combustible, en la temperatura o la viscosidad del combustible entre otros.

El cumplimiento de los pasos del procedimiento ha permitido conocer que la variación de los valores de una variable

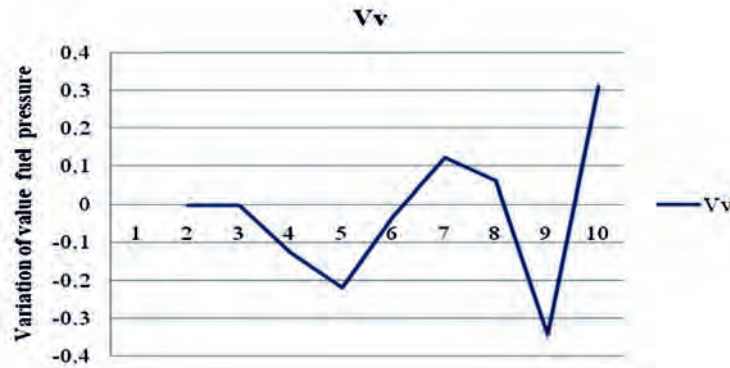


FIGURE 2. Graphical analysis of the variation of the values of the variable.
 FIGURA 2. Análisis gráfico de la variación de los valores de la variable.

The fulfillment of the procedure steps has allowed knowing that the variation of the values of a diagnosis variable, in this case, the pressure of the fuel of an internal combustion engine of the generator sets can be related to the appearance of a potential failure in the equipment or the system studied. This conclusion with the comparative method or the analysis of control graphs is not possible to be reached because both define that when the values of the variable are within the work range they do not indicate the appearance of a potential failure until they reach the value defined by the alarm manufacturer. In the case of study the alarm value is 0,38 MPa.

de diagnóstico, en este caso la presión del combustible de un motor de combustión interna de los grupos electrógenos, puede estar relacionado con el surgimiento de un fallo potencial en el equipo o en el sistema que se estudia. A esta conclusión con el método comparativo o el análisis de gráficos de control no se puede llegar por definir ambos que cuando los valores de la variable se encuentran dentro del rango de trabajo la misma no señala el surgimiento de un fallo potencial hasta no llegar al valor definido por el fabricante de alarma, en el caso de estudio el valor de alarma es de 0,38 MPa.

CONCLUSIONS

- A theoretical procedure has been designed and developed that enable to evaluate the state of a diagnosis variable (pressure of the fuel in this case) and to monitor its evolution. These analyses are not possible by any other method studied in the consulted bibliography. On the other hand the work allows inferring the kind of relationship existing between the state of the variable and the technical state of the equipment that is being analyzed.
- Due to its relevance and the technical and economical characteristics of the internal combustion engine of the generator sets, the developed procedure can be applied and generalized to similar equipment and apparatuses.

CONCLUSIONES

- Se ha diseñado y desarrollado un procedimiento teórico con el cual se puede evaluar el estado de una variable de diagnóstico y poder dar seguimiento a su evolución de manera paulatina respecto a los valores de la variable, en este caso presión del combustible. Análisis que no es posible realizar por otros métodos estudiados en la bibliografía consultada. Por otro lado el trabajo permite poder inferir qué relación puede existir entre el estado de la variable y el estado técnico del equipo que se está analizando.
- Por su pertinencia y las características tanto técnicas como económicas del motor de combustión interna de los grupos electrógenos, el procedimiento desarrollado puede ser aplicado y generalizado a equipos y aparatos similares.

REFERENCES / REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBARBAR, A.: "An investigation into diesel engine air-borne acoustics using continuous wavelet transform", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(9): 2599-2604, 19 de septiembre de 2013, ISSN: 1738-494X, 1976-3824, DOI: 10.1007/s12206-013-0703-9.
- BATISTA, R.C.; URQUIZA, S.S.: "El RCVV: Un enfoque diferente en el diagnóstico técnico.", *Ingeniería Mecánica*, 3: 29-32, 2008, ISSN: 1815-5944.
- CAMACHO, O.; PADILLA, D.; GOUVEIA, J.L.: "Diagnóstico de fallas utilizando técnicas estadísticas multivariantes", *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 30(3): 253-262, 2007, ISSN: 0254-0770.
- CIGOLINI, R.D. (ed.): *Recent advances in maintenance and infrastructure management*, no. solc. TS177 .R44 2009, Ed. Springer, London, 290 p., OCLC: ocn310400707, 2009, ISBN: 978-1-84882-488-1.
- DENG, L.; ZHAO, R.: "Fault feature extraction of a rotor system based on local mean decomposition and Teager energy kurtosis", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(4): 1161-1169, 1 de mayo de 2014, ISSN: 1738-494X, 1976-3824, DOI: 10.1007/s12206-013-1149-9.
- ESCALANTE, V.E.J.: *Seis-sigma: metodología y técnica*, Ed. Limusa-Noriega, México, 436 p., OCLC: 54022083, 2003, ISBN: 978-968-18-6391-3.
- FIGLUS, T.; LIŠČÁK, Š.; WILK, A.; LAZARZ, B.: "Condition monitoring of engine timing system by using wavelet packet decomposition of a acoustic signal", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(5): 1663-1671, 20 de mayo de 2014, ISSN: 1738-494X, 1976-3824, DOI: 10.1007/s12206-014-0311-3.
- JINMING, L.; ZHENZHEN, L.; KANGLE, W.: "Fault Diagnosis of Diesel Engine Based on EMD and TFD", [en línea], En: Jin, D. y Lin, S. (eds.), *Advances in Mechanical and Electronic Engineering*, ser. Lecture Notes in Electrical Engineering, Ed. Springer Berlin Heidelberg, vol. 176, Berlin, Heidelberg, pp. 261-266, 2012, ISBN: 978-3-642-31506-0, Disponible en: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-31507-7>, [Consulta: 3 de junio de 2016].
- KATERIS, D.; MOSHOU, D.; PANTAZI, X.-E.; GRAVALOS, I.; SAWALHI, N.; LOUTRIDIS, S.: "A machine learning approach for the condition monitoring of rotating machinery", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(1): 61-71, 23 de enero de 2014, ISSN: 1738-494X, 1976-3824, DOI: 10.1007/s12206-013-1102-y.
- KIM, H.C.; CHO, M.G.; SHIM, J.: "Multi-stage diagnostic system for reciprocating compressor using DTW technique", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(8): 2293-2298, 19 de septiembre de 2013, ISSN: 1738-494X, 1976-3824, DOI: 10.1007/s12206-013-0612-y.
- LAROSE, D.T.: *Discovering knowledge in data: an introduction to data mining*, no. solc. QA76.9.D343 L38 2005, Ed. Wiley-Interscience, Hoboken, N.J, 222 p., 2005, ISBN: 978-0-471-66657-8.
- LI, Z.; YAN, X.; YUAN, C.; PENG, Z.: "Intelligent fault diagnosis method for marine diesel engines using instantaneous angular speed", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26(8): 2413-2423, 23 de agosto de 2012, ISSN: 1738-494X, 1976-3824, DOI: 10.1007/s12206-012-0621-2.
- PORTEIRO, J.; COLLAZO, J.; PATIÑO, D.; MÍGUEZ, J.L.: "Diesel engine condition monitoring using a multi-net neural network system with nonintrusive sensors", *Applied Thermal Engineering*, 31(17-18): 4097-4105, diciembre de 2011, ISSN: 1359-4311, DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2011.08.020.
- SILVA, F. de la T.; MARÍN, E.P.; MESA, C.: "Técnica de monitoreo continuo (on-line) para la evaluación del estado técnico de los turbogrupos de 64 y 100 MW.", *Ingeniería Mecánica*, 2: 27-35, 2001, ISSN: 1815-5944.
- ZHANG, F.; LIU, Y.; CHEN, C.; LI, Y.-F.; HUANG, H.-Z.: "Fault diagnosis of rotating machinery based on kernel density estimation and Kullback-Leibler divergence", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(11): 4441-4454, 2014, ISSN: 1738-494X, 1976-3824, DOI: 10.1007/s12206-014-1012-7.

Received: 12/10/2015.

Approved: 03/06/2016.

Elio Rafael Hidalgo Batista, profesor, Universidad de Holguín, Avenida XX Aniversario s/n, Reparto Piedra Blanca, Holguín, Cuba. E-mail: elio@facing.uho.edu.cu

Carlos Batista Rodríguez, E-mail: batista@facing.uho.edu.cu

Fernando Robles Proenza, E-mail: fdroblesp@facing.uho.edu.cu