

Relación entre los fallos y las variables de diagnóstico en motores diesel

Relation between the failures and the variables of diagnosis in diesel motors

M.Sc. Elio Rafael Hidalgo Batista, Dr.C. Carlos Batista Rodríguez, Dr.C. Fernando Robles Proenza

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

RESUMEN. En el trabajo se presenta el uso de las funciones de pertenencia de la lógica difusa con el propósito de relacionar los valores obtenidos por las variables de diagnóstico y los fallos ocurridos durante el funcionamiento normal de los motores de combustión interna de grupos electrógenos, y de este análisis determinar las variables que afectan sus valores durante la explotación normal cuando surgen los fallos en el equipo. En el estudio se utilizaron 46 tipos de fallos ocurridos en 22 motores y los valores de las ocho variables públicas o de diagnóstico de estos mismos equipos, obteniéndose como resultado que las variables temperatura y presión del combustible son las más afectadas durante el acontecimiento del fallo. Además el análisis permitió determinar los límites de los valores (valores preventivos) para las variables afectadas donde con mayor probabilidad pueden surgir los fallos durante el funcionamiento estable de los motores.

Palabras clave: funciones de pertenencia, lógica difusa, grupos electrógenos, valores preventivos

ABSTRACT. In the work the use of the functions of property of the fuzzy logic appears in order to relate the values obtained by the diagnosis variables and the failures occurred during the on-speed operation of the motors of internal combustion of the sets of generators, and from this analysis to determine the variables that affect their values during the normal operation when the failures in the equipment arise. In the study the were used 46 types of failures happened in 22 motors and the values of the eight public variables or of diagnosis of these same equipment, obtaining that the variables temperature and pressure of the fuel are more affected during the event of a failure. In addition the analysis allowed to determine the limits of the values (preventive values) for the affected variables where with greater probability the failures can arise during the stable operation of the motors.

Keywords: property functions, fuzzy logic, generator sets, preventive values.

INTRODUCCIÓN

Según Campos (2009), “El mantenimiento basado en condición (diagnóstico) es la supervisión del estado del activo que, en principio, implica la adquisición de datos, proceso, análisis e interpretación al extraer información útil de los valores. La información identifica la salud del activo si los valores se han desviado de lo normal”.

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.

Zhixiong *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), plantea 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. Los autores de este trabajo son de la opinión que 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.

Muchas veces el momento de aparición del defecto y su manifestación no coinciden en el tiempo (aunque son cercanos),

lo cual dificulta el proceso de diagnóstico y complica la selección del parámetro de diagnóstico. Aquí está la importancia de poder contar con pruebas capaces de detectar defectos aún en su etapa más incipiente (lo que se ha llamado detección temprana del fallo) (Rodríguez, 1997)¹.

El propio autor realiza una serie de preguntas tales como: ¿Bastará con eso al gerente de producción o de mantenimiento para satisfacer sus necesidades en estos momentos? ¿O será necesario algo más? ¿Interesaría, además de conocer la existencia o no de un defecto, *calificar* el estado de una máquina?

Si durante un proceso de diagnóstico existen varias variables que puedan indicar el surgimiento de un fallo esta condición puede dificultar la evaluación del estado técnico del equipo, debido a que se desconoce cuál de ella puede indicar el fallo, por eso la necesidad de conocer la interrelación entre ellas y el fallo para facilitar la valoración del estado técnico.

Los autores de este trabajo consideran que el especialista antes mencionado al llevar a cabo el diagnóstico de un equipo debe de realizar otra pregunta ¿Cuál de las variables de diagnóstico es la que se relaciona más fuerte con el surgimiento de los fallos?

Varios autores han estudiado a través del uso de diferentes herramientas la relación de los fallos con las variables de diagnóstico con el objetivo de seleccionar cuál de ellas se relaciona con el surgimiento del fallo.

Bajo estas premisas antes mencionadas Wei *et al.* (2009) presentan un método borroso para monitorear el estado de motores Diesel de gran potencia. Seis parámetros característicos de diagnóstico útiles han seleccionado para diagnosticar la condición de seguridad del motor Diesel de gran potencia.

Camacho *et al.* (2007), utilizan técnicas estadísticas multivariantes tales como: el Análisis Discriminante de Fisher (FDA) y el Análisis Discriminante Generalizado (GDA) para realizar el diagnóstico de fallas en un proceso industrial. Plantean también que la identificación de las fallas se realiza por medio del Análisis de pares FDA, este análisis es el que permite seleccionar las variables más relacionadas con el fallo.

Reyes y Cabrera (2007), obtienen patrones de fallos en medidores de flujo de tipo turbina a través del análisis de su señal de salida con la ayuda del análisis de series temporales, el análisis espectral y el análisis de tiempo-frecuencia.

Otros autores como Hidalgo y Batista (2012)², han determinado los valores límites del nivel de estado de las variables de salida (de diagnóstico) a través del análisis de los fallos y los valores de las variables, donde se utiliza la estadística para el cálculo de los límites, el procedimiento presentado posee como dificultad que solamente se pueden analizar los valores de las variables y los fallos relacionados con ella misma, no se realiza un análisis integral de todas las posibles variables públicas del motor de combustión interna estudiado.

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).

Dimitrios *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.

En los trabajos de Shigui *et al.* (2011), Seyed *et al.* (2010) y Zhang *et al.* (2012) se emplean la técnica de infrarrojos, las redes neuronales, las reglas y las funciones pertenencia para la predicción de fallos, el control de la emisión del NO_x, y modelar y controlar las condiciones de trabajo del sistema de enfriamiento de motores de combustión interna Diesel.

En el presente trabajo se exponen los resultados del empleo de las funciones de pertenencia de la lógica difusa en el procesamiento de los valores de las variables de diagnóstico, estas han permitido conocer primeramente las variables que más se relacionan con los fallos que ocurren en los motores de combustión interna Diesel de grupos electrógenos (en lo adelante MCIDGE) y en segundo lugar determinar dentro del rango de trabajo definido para ellas por el fabricante los valores límites (valores preventivos) de las mismas donde pueden surgir con mayor probabilidad los fallos evidenciados con más frecuencias durante la explotación de estos equipos.

MÉTODOS

A continuación se describe el equipo objeto de estudio de este trabajo, las variables de los procesos de salida, sus rangos de trabajo y los fallos ocurridos durante el periodo de análisis tales como: inyector defectuoso, humo negro y salidero de refrigerante entre otros; así como los pasos a seguir para determinar las variables que más se afectan con los fallos además se enuncian las principales funciones de pertenencia de la lógica difusa utilizadas.

Los motores de combustión interna Diesel estudiados están destinados a la generación de electricidad y presentan según el fabricante las siguientes características: 16 cilindros dispuestos en forma de V, velocidad 1800 min⁻¹, potencia máxima 1888 kW (al 100% de carga), potencia al 75% de carga 1416 kW.

Poseen un sistema de gestión que permite conocer durante el trabajo del equipo los valores de las variables de los proce-

¹ RODRÍGUEZ, J.M.: Sistema de diagnóstico técnico para motores diesel de gran potencia, Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echevarría, Ciudad de la Habana, Cuba, 1997.

² HIDALGO, E.R.B.; BATISTA, C.R.: "Procedimiento para determinar los valores límites de variables de diagnóstico", En: VII Congreso Panamericano de Ingeniería de Mantenimiento, COPIM 2012, UPADI 2012, ISBN-978-959-247-094-1, La Habana, Cuba, 2012.

sos de salida (variables de diagnóstico), siendo estas las siguientes: presión del aceite, temperatura del aceite, presión del aire, temperatura del aire del turbo, temperatura del líquido refrigerante del aire del turbo, presión del combustible, temperatura del combustible y temperatura del líquido refrigerante.

En la Tabla 1 se dan a conocer según los fabricantes los límites de trabajo o rango de trabajo de las variables de diagnóstico.

TABLA 1. Límites de trabajo de las variables de diagnóstico

| Variables | Límite inferior | Límite superior |
|---|-----------------|-----------------|
| V1 - Presión aceite (MPa) | 0,38 | 0,60 |
| V2 - Temperatura aceite (°C) | 82,0 | 95,0 |
| V3 - Temperatura líquido refrigerante (°C) | 73,0 | 97,0 |
| V4 - Presión aire (MPa) | 0,24 | 0,30 |
| V5 - Temperatura del aire (°C) | 35,0 | 67,0 |
| V6 - Temperatura del líquido refrigerante del aire (°C) | 37,0 | 67,0 |
| V7 - Presión del combustible (MPa) | 0,38 | 0,70 |
| V8 - Temperatura del combustible (°C) | 40,0 | 55,0 |

Pasos del procedimiento para determinar la relación entre las variables de diagnóstico y el surgimiento de los fallos

El conocimiento de los fallos ocurridos en los motores de combustión interna Diesel de los grupos electrógenos se realizó a través de la base de datos de fallos existente en la empresa, que comprende los periodos de enero del 2012 a enero del 2013.

En este período ocurrieron 46 fallos en 22 MCIDGE. De los fallos se conoció la fecha y hora, en que MCIDGE ocurrió y el tipo de fallo.

El procesamiento de los datos se realizó con ayuda con ayuda del software titulado FP-Failure-Patrón donde se incluyen las funciones de pertenencia de la lógica difusa siendo esta una curva que determina el grado de pertenencia de los elementos de un conjunto y puede adoptar valores entre 0 y 1, fundamento por el cual las funciones de pertenencia se usan en el trabajo debido a que permiten unificar los valores de las ocho variables en el dominio entre 0 y 1, producto a que las mismas son registradas en diferentes unidades de medidas y límites de trabajo.

A continuación se relacionan los pasos lógicos a seguir.

Conocer y registrar la fecha, tipo de fallo y motor de combustión interna donde ocurrió el fallo.

Procesar los datos a través de la utilización de las funciones de pertenencia de la lógica difusa.

Establecer las funciones de pertenencia de la lógica difusa para cada variable registrada en la Tabla 1.

Calcular los grados de pertenencia (GP) de los valores de las variables, a través de cada una de las funciones de pertenencia seleccionada, el fallo se denotará con el número 1 el día de ocurrencia del mismo.

Buscar los patrones de fallos funcionales. Determinar las variables que se relacionan con los fallos y sus valores preventivos.

Buscar el GP para el instante inmediato anterior a la ocurrencia del fallo.

Registrar en una nueva tabla los grados de pertenencia de los valores de cada variable y calcular a través de la fórmula 1

su probabilidad de coincidencia (relación) con la ocurrencia del fallo.

$$PC = \sum_i^N \bar{V}_i / N * 100 \tag{1}$$

donde:

PC – probabilidad de coincidencia;

\bar{V}_i - complemento del valor de la variable.

$$P_{xy,k} = \frac{1}{L-1} \sum_{i=1}^L (x_{k,i}^- - \hat{x}_k^-) (y_{k,i}^- - H_k(\hat{x}_k^-))^T \tag{2}$$

donde:

GP- grado de pertenencia del valor de la variable en la función de pertenencia;

N- número de fallos.

Calcular para cada variable la media y la desviación estándar del complemento del valor de la variable.

Calcular, a través de la fórmula 3 (Gutiérrez y De La Vara, 2004) los límites inferiores y superiores (valores preventivos) para los valores de las variables determinadas como de mayor probabilidad de coincidencia con la ocurrencia de los fallos.

$$\text{Límite} = \bar{X} \pm K\alpha \cdot \frac{S}{\sqrt{n}} \tag{3}$$

donde:

Límite – límite inferior y superior para los valores de la variable con mayor probabilidad de coincidencia;

\bar{X} - mediada de los valores de la variable;

S - desviación estándar de los valores de la variable;

n - tamaño de la muestra;

$K\alpha$ – constante para el 90, 95 y 99% de probabilidad de confianza en la tabla A7 de (Gutiérrez y De la Vara, 2004).

Buscar con los valores de los límites inferiores y superiores, calculados por la fórmula 3, de cada variable el patrón de fallo (valores preventivos) según la inversa de la función de pertenencia.

Fijar, para cada variable determinada como de mayor coincidencia con los fallos y sus patrones de fallos, el tipo de fallo y el elemento del equipo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados. Procesamiento de los datos

Observación y registro en la Tabla 2 de los valores de las variables durante el trabajo del MCIDGE.

En la Tabla 2 se registran los valores de las variables luego de una hora de trabajo durante el trabajo estable de un MCIDGE los mismos se registraron bajo la siguiente condición de explotación carga 75% (definida para las condiciones de explotación en Cuba).

TABLA 2. Resumen de los valores de las variables durante el trabajo estable de un MCIDGE

| Fecha | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 | V8 |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2/1/13 | 0,59 | 76,5 | 73,4 | 0,26 | 43,9 | 43,6 | 0,54 | 37,0 |
| 3/1/13 | 0,58 | 79,0 | 73,8 | 0,26 | 41,4 | 42,2 | 0,54 | 36,0 |
| 4/1/13 | 0,59 | 74,5 | 71,8 | 0,26 | 41,0 | 39,8 | 0,54 | 32,7 |
| 15/1/13 | 0,55 | 84,6 | 78,2 | 0,25 | 44,2 | 42,3 | 0,55 | 39,2 |
| 15/1/13 | 0,56 | 82,6 | 75,9 | 0,25 | 41,4 | 39,1 | 0,55 | 44,6 |
| 16/1/13 | 0,56 | 82,9 | 76,2 | 0,25 | 41,4 | 39,1 | 0,56 | 35,7 |
| 16/1/13 | 0,55 | 83,9 | 76,9 | 0,25 | 41,4 | 39,1 | 0,53 | 42,3 |
| 17/1/13 | 0,55 | 84,3 | 77,6 | 0,25 | 42,0 | 39,8 | 0,54 | 39,8 |
| 18/1/13 | 0,55 | 83,9 | 77,2 | 0,24 | 41,7 | 39,5 | 0,54 | 38,8 |
| 1/12/12 | 0,55 | 84,2 | 77,3 | 0,25 | 41,1 | 39,9 | 0,56 | 37,6 |

El tipo de fallo y código del motor de combustión interna donde ocurrió el fallo se registran en la Tabla 3.

TABLA 3. Resumen de los principales fallos ocurridos en los motores de combustión interna de grupos electrógenos durante el estudio

| Fecha | Tipo de fallo | Código del MCIDGE |
|------------|--------------------------|-------------------|
| 04/01/2012 | Manguera partida | Número 2 |
| 18/01/2011 | Filtro de aire | Número 16 |
| 23/12/2011 | Salidero de refrigerante | Número 16 |
| 23/11/2011 | Salidero de refrigerante | Número 16 |
| 24/01/2012 | inyector B3 defectuoso | Numero 12 |

1. Procesamiento de los datos

b) Establecimiento de las funciones de pertenencia

La Figura 1 muestra algunas de las principales funciones de pertenencia de la lógica difusa para determinar los grados de pertenencia del valor de una variable en un conjunto difuso.

Estas funciones poseen particularidades diferentes por ejemplo: la triangular define solamente a un número con el mayor grado de pertenencia, un grado de pertenencia, cuando X es igual a m en el conjunto difuso, la trapezoidal delimita a un conjunto de valores centrales de la variable con el máximo grado de pertenencia entre b y c y los que se encuentran entre a, b y c, d toman valores entre 0 y 1.

La gaussiana igualmente que la triangular solamente toma el máximo de grados de pertenencia de un conjunto difuso cuando X es igual a m. En la función sigmoideal los grados de pertenencia de uno se toman cuando X es mayor que b.

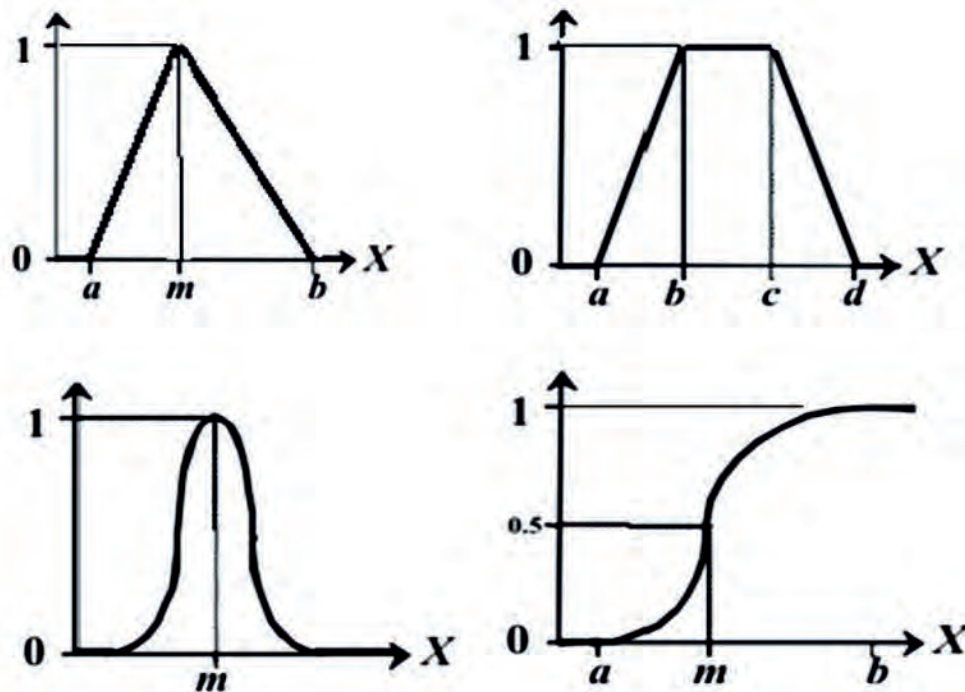


FIGURA 1. Funciones de pertenencia más habituales a) triangular, b) trapezoidal, c) gaussiana y d) sigmoideal. Fuente (Pal y Shiu, 2004).

Por lo antes expuesto y por las características definidas, (Tabla 4), por el fabricante y los explotadores de los equipos para las variables, se concluye que estas funciones de pertenencia no son válidas para calcular los grados de pertenencia de los valores de las variables de diagnóstico en el conjunto difuso perteneciente a cada una de ellas.

Esta conclusión permitió elaborar dos funciones de pertenencia para las variables que se estudian. La primera de ellas se denominó: Triangular Izquierda_1 para las presiones (Figura 2)

y la 1_Triangular Derecha para las temperaturas (Figura 3).

En la Tabla 4 se sitúan dos de las principales características de las variables de diagnóstico, la primera, los límites de trabajo definidos por el fabricante para ellas, donde se precisa para las tres variables de presiones el límite inferior como alarma y para las cinco temperaturas el límite superior de alarma. Como segunda e importante característica los explotadores de los equipos han definido valores normales de trabajo para cada variable.

TABLA 4. Principales características de las variables de diagnóstico de los motores de combustión interna Diesel MTU Br 4 000 16V G81

| Variables | El fabricante | | Explotador |
|--|-----------------|-----------------|------------------|
| | Límite inferior | Límite superior | Valores normales |
| V1 - Presión aceite (MPa) | 0,38 | 0,6 | 0,5-0,6 |
| V2 - Temperatura aceite (°C) | 82,0 | 95,0 | 82- 87 |
| V3 - Temperatura del líquido refrigerante (°C) | 73,0 | 97,0 | 73-82 |
| V4 - Presión aire (MPa) | 0,24 | 0,3 | 0,3-0,25 |
| V5 - Temperatura del aire (°C) | 35,0 | 67,0 | 35- 45 |
| V6 - Temperatura del líquido refrigerante del aire (° C) | 37,0 | 67,0 | 37- 46 |
| V7 - Presión del combustible (MPa) | 0,38 | 0,7 | 0,7-0,6 |
| V8 - Temperatura del combustible (°C) | 36,0 | 55,0 | 40-50 |

En la Figura 2 se muestra la función de pertenencia Triangular Izquierda_1 para las variables presiones del motor de combustión interna MTU Br 4 000 16V G81.

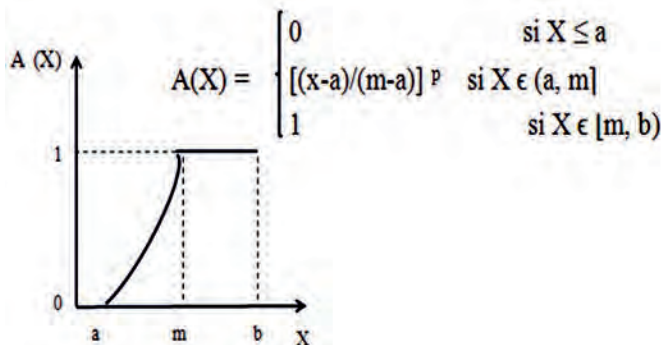


FIGURA 2. Función de pertenencia Triangular Izquierda_1. Fuente propia.

Esta función prevé para las tres variables presiones situar entre m y b los valores normales de trabajo de cada una de ellas obteniendo los mismos el máximo grado de pertenencia en cada conjunto difuso.

El valor mínimo o límite inferior de cada variable estará situado en el punto a y siempre alcanzará el menor grado de pertenencia del conjunto difuso cero grado. Los valores situados de estas variables de diagnóstico que se sitúan entre el límite inferior y el menor valor de los valores normales, punto m, de las mismas obtendrán grados de pertenencia entre 0 y 1.

La Figura 3 representa la función de pertenencia 1_Triangular Derecha para las variables temperaturas del motor de combustión interna MTU Br 4 000 16V G81.

Esta función de pertenencia elaborada para las cinco variables de temperatura posee las características siguientes: el máximo grado de pertenencia de los valores de las variables se obtienen en el conjunto difuso cuando las variables toman los valores normales definidos por el explotador, el menor grado de pertenencia se toma cuando los valores de las variables llegan o

pasan el límite superior de cada una de ellas y cuando los valores de las variables se sitúan entre el límite superior y el mayor valor del límite, punto m, definido por el explotador como de trabajo normal de la variable se logran grados de pertenencia entre 0 y 1.

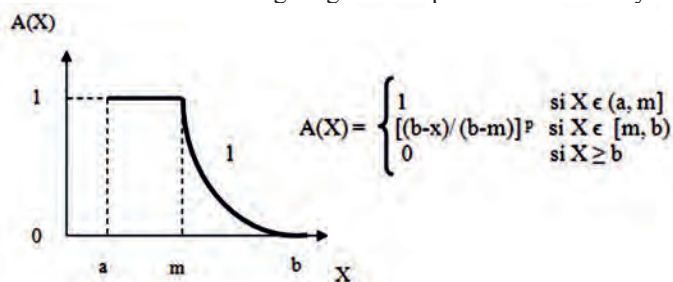


FIGURA 3. Función de pertenencia 1_Triangular Derecha. Fuente propia.

El valor de p para los cálculos de los grados de pertenencia de cada valor de las variables en el conjunto difuso se definió en 1,5 luego de varios cálculos desarrollados.

Calculo de los grados de pertenencia de los valores de las variables en las funciones de pertenencia establecidas en la tabla 5.

TABLA 5. Resumen del cálculo de los grados de pertenencia

| Fecha | Fallo | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 | V8 |
|---------|-------|----|----|----|-----|----|----|-----|-----|
| 2/1/13 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,3 | 1 |
| 3/1/13 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,3 | 1 |
| 4/1/13 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,3 | 1 |
| 15/1/13 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0,1 | 1 | 1 | 0,3 | 1 |
| 15/1/13 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0,1 | 1 | 1 | 0,3 | 0,4 |
| 16/1/13 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0,1 | 1 | 1 | 0,4 | 1 |
| 16/1/13 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0,1 | 1 | 1 | 0,2 | 0,6 |
| 17/1/13 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0,1 | 1 | 1 | 0,3 | 1 |
| 18/1/13 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0,3 | 1 |
| 1/12/12 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0,1 | 1 | 1 | 0,4 | 1 |

Los pasos se realizaron con ayuda del software FP-Failure-Patrón obteniéndose los resultados siguientes:

Al realizar el análisis con los 46 fallos ocurridos en el período de estudio las variables cuyos valores se modificaron con la ocurrencia de los fallos son las siguientes: la temperatura

del combustible y la presión del combustible con el 60,37 y 58,57% de probabilidad de coincidencia respectivamente con relación a la ocurrencia de los fallos. En la Tabla 6 se muestra el cálculo del intervalo calculado (límite inferior y superior, valores preventivos) para un nivel de significación del 68%.

TABLA 6. Variables determinadas y su patrón de fallo, valores preventivos, para los fallos estudiados

| Variable | Intervalo calculado | | Rango de trabajo definido | |
|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------------|
| | Límite inferior Valor preventivo | Límite superior Valor preventivo | Límite inferior | Límite superior |
| Temperatura del combustible (°C) | 40,0 | 52,86 | 40,0 | 55,0 |
| Presión del combustible (MPa) | 0,40 | 0,59 | 0,38 | 0,7 |

En la Tabla 7 se muestran solamente los fallos relacionados con el sistema de refrigeración tales como: salidero de refrigerante, manguera de refrigerante partida, alta temperatura del *intercooler*, radiador ponchado, salidero de refrigerante por el radiador de baja este análisis arrojó que las variables de mayor probabilidad de coincidencia con la ocurrencia de los fallos siguen siendo la temperatura del combustible y la presión del combustible invirtiéndose sus posiciones de la forma siguiente: la presión con el 53,1% y la temperatura con el 41,71%, el intervalo calculado, valores preventivos, se muestra en la tabla observándose que el mismo se define en un rango más estrecho dentro del rango determinado por el fabricante.

TABLA 7. Variables determinadas y su patrón de fallo, valores preventivos, en el sistema de refrigeración

| Variable | Intervalo calculado | | Rango de trabajo definido | |
|----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|-----------------|
| | Límite inferior Valor preventivo | Límite superior Valor preventivo | Límite inferior | Límite superior |
| Presión del combustible (MPa) | 0,46 | 0,59 | 0,38 | 0,7 |
| Temperatura del combustible (°C) | 49,56 | 55,0 | 40,0 | 55,0 |

DISCUSIÓN

Los resultados finales del análisis entre los valores de las ocho variables de diagnóstico y los fallos ocurridos en los equipos durante el trabajo estable de los mismos se muestran en la Tabla 8.

A través de la media de los valores obtenidos en las tablas 6 y 7 se determinó el límite inferior y superior (valores preventivos) de las variables relacionadas con los fallos ocurridos, intervalo que se encuentra dentro del rango de trabajo definido por el fabricante.

Los fabricantes de los equipos plantean que las posibles causas o elementos que pueden influir en la baja presión del aire pueden ser las siguientes: filtro de aire sucio, *intercooler* sucio y turbo compresor defectuoso.

Los resultados del estudio desarrollado coinciden con los criterios dados por los fabricantes sobre los fallos.

TABLA 8. Resultados finales del análisis. Variables determinadas y su patrón de fallo

| Variables | Intervalo calculado de surgimiento de los fallos (Valores preventivos) | | Tipo de fallo | Elementos del MCI que puede relacionarse con los fallos ocurridos |
|-------------------------------|--|------|---|--|
| | LI | LS | | |
| | Temperatura del combustible (°C) | 44,8 | | |
| Presión del combustible (MPa) | 0,43 | 0,59 | Baja presión del aire y problema con el filtro de combustible | Filtro de aire y de combustible, turbo compresor, falta de hermeticidad del sistema de combustible |

Los pasos desarrollados anteriormente han permitido conocer que el comportamiento de los valores, en los intervalos calculados para las variables temperatura del combustible y presión del combustible sirven de información valiosa para dar a conocer al operario, técnico y directivos cercanos a los motores de combustión interna Diesel de los grupos electrógenos el surgimiento de algunos de los fallos procesados y que elemento del equipo puede estar relacionado con el fallo potencial, este

conocimiento permitirá tomar decisiones oportunas en la corrección de los fallos surgidas durante el trabajo de los equipos.

La Figura 4 representa de forma gráfica los límites señalados por los fabricantes y el patrón de fallo (valores preventivos) calculado para la presión del combustible, esta información permite que el operador conozca que si los valores de la variable se encuentran dentro de los valores preventivos de la misma pueda estar surgiendo algunos de los fallos relacionados en la Tabla 8.

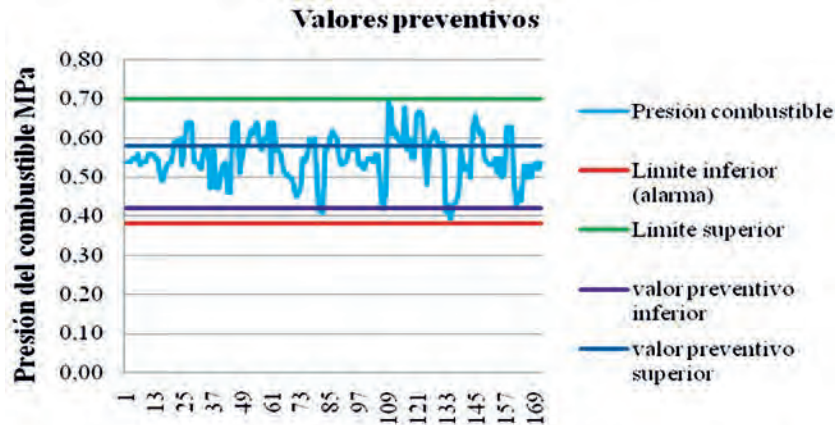


FIGURA 4. Análisis gráfico de la variable presión del combustible (valores preventivos).

CONCLUSIONES

- El uso de las funciones de pertenencia de la lógica difusa ha permitido relacionar los valores de las variables de diagnóstico de los motores de combustión interna Diesel y los fallos ocurridos durante el trabajo estable de los mismos en el período estudiado.
- Solamente dos variables (temperatura del combustible, presión del combustible) de las ocho estudiadas son las que sus valores se modifican al surgir los fallos.
- El patrón de fallos (valores preventivos) se sitúa siempre dentro del rango definido por el fabricante para cada variable.

- Este método puede ser usado en equipos similares o donde se pueda tener una data histórica de los valores de las variables y las fallas de los equipo.

AGRADECIMIENTOS

A los especialistas, técnicos y dirigentes de los emplazamientos donde se encuentran ubicados los motores de combustión interna de los grupos electrógenos, objeto de estudio del trabajo, por su ayuda en la toma de los valores de las variables durante el funcionamiento de los mismos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBARBAR, A.: "An investigation into diesel engine air-borne acoustics using continuous wavelet transforms", *Journal of Mechanical Science and Technology*, ISSN-1738-494X, 27, 2013.
- CAMACHO, O.; PADILLA, D.; GOUVENIA, J.L.: "Diagnóstico de fallas utilizando técnicas estadísticas multivariantes", *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, ISSN-0254-0770, 30 (3), 2007.
- CAMPOS, J.: "Development in the application of ICT in condition monitoring and maintenance", *Computers in Industry*, ISSN- 0166-3615, 60, 2009.
- DIMITRIOS, K.; MOSHOU, D.X.; PANTAZI, E.; GRAVALOS, I.; SAWALHI, N.; LOUTRIDIS, S.: "A machine learning approach for the condition monitoring of rotating machinery", *Journal of Mechanical Science and Technology*, ISSN-1738-494X, 28, 2014.
- FIGLUS, T.; LIŠČÁK, Š.; WILK, A.; BOGUSŁAW, Ł.: "Condition monitoring of engine timing system by using wavelet packet decomposition of a acoustic signal", *Journal of Mechanical Science and Technology*, ISSN-1738-494X, 28: 1663-1671, 2014.
- GUTIÉRREZ, H.P.; DE LA VARA, R.S.: *Control estadístico de calidad y seis sigmas*, pp. 636, McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A de C.V. ISBN-970-10-4724-9, México, D.F. 2004.
- JINMING, L.; ZHENZHEN, L.; WANG, K.: "Fault Diagnosis of Diesel Engine Based on EMD and TFD", *Journal Advances in Mechanical and Electronic Engineering*, ISSN-978-3-642-31507-7, 176: 261-266, 2012.
- PAL, S.K.; SHIU, S.C.K.: *Foundations of soft Case – Based Reasoning*, Ed. John Wiley & Sons, pp. 274, ISBN-0-471-08635-5, New Jersey, USA, 2004.
- 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*, ISSN- 1359-4311, 31, 2011.
- REYES VAILLANT, O.; CABRERA GÓMEZ, J.: "Identificación experimental de patrones de falla en flujómetros del tipo turbina", *Ingeniería Mecánica*, ISSN-1815-5944, 10 (1): 21-29, 2007.

SEYED SAEID, M.; FARZAD, A. S.; AHMAD, J.; NAVA, G. H.: "Modeling and fuzzy control of the engine coolant conditioning system in an IC engine test bed", *Journal of Mechanical Science and Technology*, ISSN- 1976-3824, 24, 2010.

SHIGUI, L.; LI, Y.; YANG, Q.: "Research on the applications of infrared technique in the diagnosis and prediction of diesel engine exhaust fault", *Journal of Thermal Science*, ISSN: 1993-033X, 20, 2011.

WEI, L.; ZHANG, L.; WANG, Z.; DUAN, L.: "Using fuzzy method to evaluate safety condition of big diesel engine", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, ISSN-0950-4230, 22, 2009.

ZHANG, S. M.; TIAN, F.; REN, F. G. F.; YANG, L.: "SCR control strategy based on ANNs and Fuzzy PID in a heavy duty diesel engine", *International Journal of Automotive Technology*, ISSN 1976-3832, 13, 2012.

ZHIXIONG, L.; XINPING, Y.; CHENGQING, Y.; PENG, Z.: "Intelligent fault diagnosis method for marine diesel engines using instantaneous angular speed", *Journal of Mechanical Science and Technology*, ISSN-1738-494X, 26, 2012.

Recibido: 12/07/2014.
Aprobado: 09/12/2014.
Publicado: 28/01/2015.

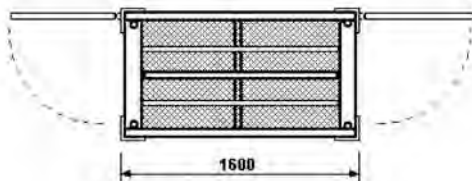
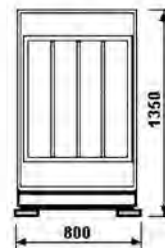
Elio Rafael Hidalgo Batista, Universidad de Holguín, Avenidad XX Aniversario s/n Reparto Piedra Blanca, Holguín, Cuba, Correo electrónico: elio@facing.uho.edu.cu



MAQUINARIA AGRICOLA & INSTRUMENTOS DE MEDICION

BALANZAS PARA CERDOS Y OVINOS

CEMA TED - 500



Display digital

Capacidad hasta 500 kg.
Precisión de 0,2 kg.
Presentación de la lectura: Digital (5 dígitos LCD).
Dimensiones de la plataforma: 1600 x 800 mm.
Altura de la jaula: 1350 mm.
Superficie de la plataforma: Metálica con alfombra de goma.

Solicitudes de ofertas a:
Dr.C. Roberto Albóniga Gil
Centro de Mecanización Agropecuaria
Autopista Nacional y Carretera de
Tapaste. km 23, San José de las Lajas,
Mayabeque, Cuba. Apdo. 18-19
Tel.: (53)(47) 864346
E_mail: ralboniga@unah.edu.cu