

# **ESQUEMA PARA LA DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS, EN UN SISTEMA DE COMBUSTIÓN INTERNA**

## *SCHEME FOR DETECTION AND LOCALIZATION OF FAILURES, IN AN INTERNAL COMBUSTION SYSTEM*

### **Airam Monserrat Sánchez Villalobos**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
*airamm.savii@gmail.com*

### **Elvia Ruiz Beltrán**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
*elvia71@hotmail.com*

### **Jorge Octavio Valdés Valadez**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
*octavio.valdes.ita@gmail.com*

### **Jorge Luis Orozco Mora**

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes  
*drorozco@mail.ita.mx*

## **Resumen**

En este trabajo se propone un método para detectar y localizar las fallas en un sistema de combustión interna, sistema analizado y modelado bajo el enfoque de redes complejas, revisando sus propiedades estructurales que indican el grado de robustez ante la presencia de fallas (ataques o fallas aleatorias). Se propone una simulación para comprobar que los elementos que son poco robustos provocan fallas en el sistema, lo anterior se logra gracias a la implementación de una interfaz gráfica en LabVIEW que permite monitorear fallas en presión, vibraciones, y temperatura, que se presentan en el sistema.

**Palabras clave:** fallas, redes complejas, propiedades estructurales, motor de combustión interna.

## **Abstract**

In this work, we propose a method to detect and locate faults in an internal combustion system under the complex networks approach, reviewing its structural

properties that indicate the degree of robustness in the presence of faults (random attacks or failures). A simulation is proposed to verify that elements that are not very robust cause failures in the system; this is achieved thanks to the implementation of a graphical interface in LabVIEW that allows monitoring failures in; pressure, vibrations, and temperature, which occur in the system.

**Keywords:** faults, complex networks, structural properties, internal combustion engine.

## 1. Introducción

A lo largo de los años, nos hemos rodeado de sistemas que tienden a tener más componentes que interactúan entre sí complicando la predicción en su funcionamiento y por ende tiene una alta posibilidad de fallar, estos sistemas se conocen como sistemas complejos. Un sistema complejo, se define como aquel que está compuesto por una cantidad enorme de partes que interactúan entre sí, cada parte tiene su propia estructura y cumple una función específica, esto quiere decir que lo que ocurra con cierta parte del sistema, influirá a todo éste. Como ejemplos de este tipo de sistemas encontramos sistemas biológicos (el cerebro humano, la naturaleza), de información (redes físicas, redes sociales, etc.) y de tecnología (infraestructuras como suministro de agua, transporte, las estaciones de combustible, energía, entre otras) [Albert-Laszló Barabási, 2016]. El análisis de fallas en sistemas complejos, ha sido recientemente abordado para analizar sistemas de manufactura flexible [Reyes Luevano, 2017] y [Reyes Lúevano, 2018], fallas en cascada en redes de distribución eléctrica [V. Buldyrev, 2010], redes de comunicación que controlan redes eléctricas [Shao, v, 2011]; dichas metodologías aplicadas resultan ser exitosas ya que permiten detectar y localizar fallas en los sistemas de manera precisa.

Actualmente, la industria en general implementa Sistemas de Manufactura Flexible (SMF) en sus procesos de producción, con el propósito de aumentar la productividad, disminuir los costos de producción y mejorar la calidad de sus productos [Reyes Lúevano, 2018]. En el caso de redes de distribución eléctrica, experimentan apagones con frecuencia, que en gran medida son resultado de una

falla en cascada entre redes interdependientes, el problema ha sido dramáticamente ejemplificado por varios apagones a gran escala que han ocurrido en los últimos años, tal es el caso de la red eléctrica y de internet de Italia implicadas en el apagón en septiembre de 2003; donde al tener identificadas las subestaciones de la red eléctrica y los servidores de internet, donde el tamaño de una red también llamada distribución de grados más amplia aumenta la vulnerabilidad de las redes de interdependientes a la falla aleatoria, que es opuesta a cómo se comporta una red única [V. Buldyrev, 2010].

En el caso de la industria automotriz, se ha convertido en un apoyo económico importante para los países más desarrollados durante los últimos años en el sector industrial [Z., H., 2008]. Con el paso de los años, los automóviles han cambiado su funcionamiento tradicional; de una máquina estructurada a una máquina electrónica compleja. Si estudiamos un automóvil como un sistema complejo, podemos dividirlo en los sub sistemas que lo integran; motor, suspensión, dirección, frenos y transmisión. El motor es la parte principal del automóvil ya que él es quien proporciona la fuente de energía al resto de los subsistemas. Es un sistema de máquina compleja, incluida su estructura. El parámetro de estado técnico del motor cambiará en diferentes formas e intensidad, que empeoran los parámetros de rendimiento. El estado del motor influye en la seguridad y fiabilidad del automóvil directamente y es una de las partes más fallidas, por lo cual es el principal objeto de detección y localización de fallas para nuestra investigación.

En [Z., H., 2008] desarrollaron un sensor avanzado que captura las características y dinámica de un motor, donde se analiza, distingue, reconoce y determina el error. Además, pronostica sus tendencias de procesamiento, descubre su razón, ubicación y severidad, permitiendo que se realice el mantenimiento correspondiente o apliquen los métodos de procesamiento para localizar en donde está situada la falla dentro del sistema que analizan. Aplican una técnica de redes neuronales; donde se detecta la falla del motor de un automóvil, adoptan una red neuronal *Back Propagation* (BP) mejorada. Otra de las investigaciones realizadas en los últimos años sobre fallas en motores de combustión es la realizada en el año 2014 por el investigador Aleksandar Vencel [Aleksandar Vencel, 2014], donde se

examinan 616 cojinetes del cigüeñal, dañados por diferentes mecanismos. Los rodamientos se instalaron en Motores diésel de alta velocidad, y se reunieron durante dos años, en las reparaciones (Revisión), es decir después de 3000-5000 horas de trabajo. Después del examen de los cojinetes, se realizó el análisis del árbol de fallas FTA (failure tree analysis, por sus siglas en inglés) para determinar las causas de raíz del motor por fallas en los cojinetes. En el trabajo se concluyó que las causas principales que conducen a daños y fallas de los cojinetes lisos son numerosas, y muy a menudo son varias causas que contribuyen simultáneamente. Además, la carcasa de cojinete y la contra-cara contra la que funciona el cojinete también contribuyen. Todas estas causas se pueden dividir en varios grupos que incluyen aspectos de diseño, selección de material, imperfecciones de material, fabricación y post-tratamiento, almacenamiento, transporte, montaje, inspección, mantenimiento, funcionamiento imprevisto (como sobrecarga) y daños mecánicos y / o químicos directos durante el funcionamiento. Los resultados que se proponen en este artículo, consideran un motor de combustión interna como un sistema complejo, identificando en principio cada uno de sus componentes y la interacción entre ellos, así como el nivel de importancia dentro del mismo. El análisis obtenido representa una serie de escenarios en los cuales podemos identificar y localizar fallas a través de la comunicación del modelo matemático con el controlador; que reciba y envíe información de nuestro sistema de combustión

## **2. Métodos**

En esta sección se profundiza en algunos conceptos básicos sobre grafos y teoría de redes complejas, basada en propuesta de Lazsló Barabási [Albert-Laszló Barabási, 2016] para modelar y analizar propiedades en sistemas complejos.

### **Redes complejas**

En este trabajo se propone el modelado de un sistema de combustión interna mediante el enfoque de redes complejas, ya que, si consideramos modelar todo el motor, éste podría tener cientos de elementos que interactúan de forma intrincada

y por ello resulta eficaz modelarlos con sistemas complejos. Los sistemas complejos se modelan mediante un grafo [Albert-Laszló Barabási, 2016] como el que se muestra en figura 1. A esta representación se le denomina Red Compleja.

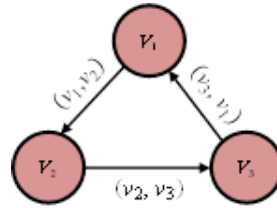


Figura 1 red compleja.

Una red compleja se define en términos de la teoría de grafos como un par ordenado de conjuntos  $\square := (V, \varepsilon)$ , donde  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$  es el conjunto de  $N = |V|$  elementos vértices (nodos) de la red. Así mismo,  $\varepsilon$  denota al subconjunto de aristas de  $[V]^2$ ; en otras palabras  $\varepsilon \subseteq (V \times V)$ . En este sentido, para una red (dirigida y no dirigida) una arista  $\varepsilon := (v_i, v_j) \in \varepsilon$  es gráficamente un arco dirigido del nodo  $v_i \in V$  al nodo  $v_j \in V$ ; donde  $i$  denota al tallo,  $j$  denota la cabeza y  $w_{\varepsilon_j}$  peso de arista.

La estructura de la red puede ser descrita a través de una representación matricial. La matriz  $A_{N \times N}$  captura la relación de adyacencia entre pares de nodos de la red, de la siguiente forma:  $A_{ij} = 1$  si existe una arista que se dirija del nodo  $j$  al nodo  $i$ , o en su caso  $A_{ij} = 0$  si no existe conexión entre los nodos  $i$  y  $j$ .

### Propiedades estructurales de las redes complejas

Existen ciertas propiedades que presentan los Nodos (N) y Links (L) dentro de un sistema complejo:

- **Grado (Degree):**  $k_i$  (llamado grado) es número de links que tiene el nodo  $i$ . En una red no dirigida, el número total de enlaces  $L$ , se puede expresar como la suma de los grados de los nodos, la ecuación 1 representa el número de links que tiene una red con  $N$  nodos.

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N k_i \quad (1)$$

- **Grado promedio:** para una red no dirigida el número de links en promedio que tiene cada nodo  $i$  se representa según la ecuación 2.

$$\langle k \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i = \frac{2N}{L} \quad (2)$$

En la ecuación 3 se muestra como en el caso de redes dirigidas distinguimos entre grado entrante,  $k_i^{in}$ , que representa el número de links que apuntan al nodo  $i$ , y grado saliente,  $k_i^{out}$ , que representa el número de links que apuntan desde el nodo  $i$  a otros nodos.

$$k_i = k_i^{in} + k_i^{out} \quad (3)$$

La cantidad total de enlaces en una red dirigida se obtiene con ecuación 4.

$$L = \sum_{i=1}^N k_i^{in} = \sum_{i=1}^N k_i^{out} \quad (4)$$

En la ecuación 5 se calcula el grado promedio de una red dirigida como:

$$\langle k^{in} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i^{in} = \langle k^{out} \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i^{out} = \frac{L}{N} \quad (5)$$

- El **grado de distribución**, representado como  $P_k$ , proporciona la probabilidad de que un nodo seleccionado al azar en la red tenga el grado  $k$ . Como  $P_k$  es una probabilidad, debe normalizarse, como se muestra en la ecuación 6.

$$\sum_{k=1}^{\infty} P_k = 1 \quad (6)$$

Para una red con  $N$  nodos, la distribución de grados es un histograma normalizado que viene dado por la ecuación 7, representada de la siguiente manera.

$$P_k = \frac{N_k}{N} \quad (7)$$

Donde  $N_k$  es la cantidad de nodos de grados  $k$ . Por tanto, se puede obtener el número de nodos de grado  $k$  a partir de la distribución de grados como  $N_k = N P_k$ .

En la expresión 8 se observa como el grado promedio de la red compleja está en función de  $P_k$ , lo cual es particularmente importante en redes con miles o millones de nodos en los cuales no se conoce de manera precisa su estructura, como en caso de un cerebro humano.

$$\langle k \rangle = \sum_{k=0}^{\infty} k P_k \quad (8)$$

- **Matriz de adyacencia:** Una descripción completa de una red requiere que hagamos un seguimiento de sus enlaces. Para propósitos matemáticos, a menudo representamos una red a través de su matriz de adyacencia  $A_{N \times N}$ . La matriz de adyacencia de una red dirigida de  $N$  nodos tiene  $N$  filas y  $N$  columnas, siendo sus elementos:

- ✓  $A_{ij}=1$  Si hay un link que apunta desde el nodo  $i$  al nodo  $j$ .
- ✓  $A_{ij} = 0$  Si los nodos  $i$  y  $j$  no están conectados entre sí.

La matriz de adyacencia de una red no dirigida tiene dos entradas para cada link. El link (1, 2) se representa como  $A_{12} = 1$  y el link (2,1) es  $A_{21} = 1$ . Por lo tanto, la matriz de adyacencia de una red no dirigida es simétrica, es decir  $A_{ij} = A_{ji}$ .

El grado  $k_i$  del nodo  $i$  mostrado en la ecuación 9, se puede obtener directamente de los elementos de la matriz de adyacencia. Para redes no dirigidas, el grado de un nodo es una suma de las filas o las columnas de la matriz, es decir:

$$k_i = \sum_{j=1}^N A_{ji} = \sum_{j=1}^N A_{ij} \quad (9)$$

Para redes dirigidas, las sumas sobre las filas y columnas de la matriz de adyacencia proporcionan los grados de entrada y salida del nodo  $i$ , los cuales se calculan como en la ecuación 10.

$$k_i^{in} = \sum_{j=1}^N A_{ij}, \quad k_i^{out} = \sum_{j=1}^N A_{ji} \quad (10)$$

Dado que en una red no dirigida el número de enlaces salientes es igual al número de enlaces entrantes, tenemos que los grados de entrada y salida se obtienen como se indica en la ecuación 11.

$$2L = \sum_{i=1}^N k_i^{in} = \sum_{i=1}^N k_i^{out} = \sum_{ij} A_{ij} \quad (11)$$

El número de elementos distintos de cero de la matriz de adyacencia es  $2L$ , o el doble de la cantidad de links. De hecho, un link no dirigido que conecta los nodos  $i$  y  $j$  aparece en dos entradas:  $A_{ij} = 1$ , un link que apunta desde el nodo  $i$  al nodo  $j$ , y  $A_{ji} = 1$ , un enlace que apunta de  $j$  a  $i$ .

En la figura 2 se muestra la matriz de adyacencia de una red no dirigida. El grado de un nodo (en este caso el nodo 2) se puede expresar como la suma sobre la columna apropiada o la fila de la matriz de adyacencia.

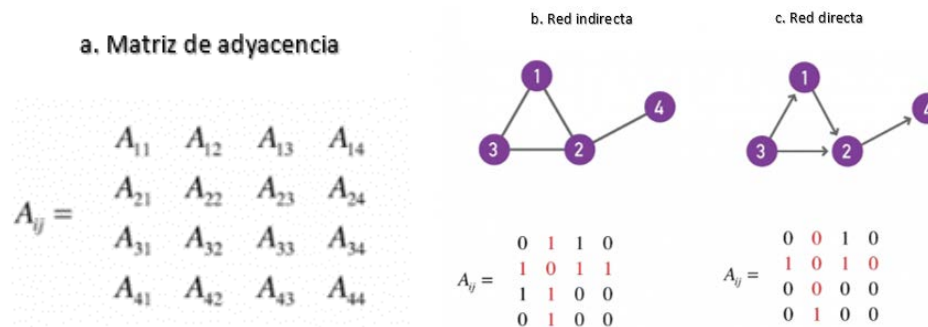


Figura 2 Ejemplo de una matriz de adyacencia [Albert-Laszló Barabási, 2016].

También muestra algunas características básicas de la red, como el número total de enlaces,  $L$  y el grado promedio  $\langle k \rangle$ , expresado en términos de los elementos de la matriz de adyacencia. Lo mismo que en (b) pero para una red dirigida.

- **Redes bipartitas:** Un gráfico bipartito es una red cuyos nodos se pueden dividir en dos conjuntos disjuntos  $U$  y  $V$  de manera que cada enlace conecta un nodo  $U$  a un nodo  $V$ . En otras palabras, si coloreamos los nodos en  $U$  en verde y los nodos en  $V$  en púrpura, entonces cada enlace debe



conectar nodos de diferentes colores; lo cual es una proyección de un conjunto a otro. En la figura 3 se muestra como es la relación entre una red bipartita, la cual tiene 2 conjuntos de nodos uno  $U$  y otro  $V$ . Los nodos en el conjunto  $U$  se conectan directamente sólo a los nodos en el conjunto  $V$ . Por lo tanto, las proyecciones generan otro grafo en base a las conexiones de la red. La proyección  $U$  se obtiene conectando dos nodos  $U$  entre sí; si se unen al mismo nodo  $V$  en la representación bipartita. La proyección  $V$  se obtiene conectando dos nodos  $V$  entre sí si se conectan al mismo nodo  $U$  en la red.

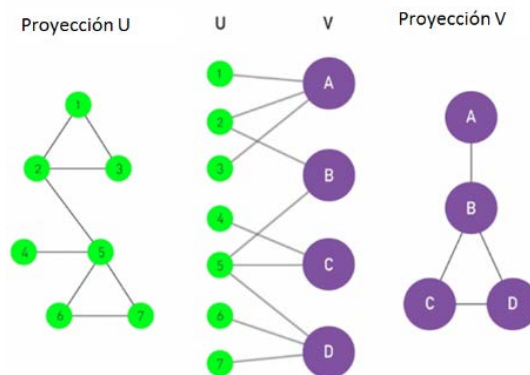


Figura 3 Ejemplo de una red bipartita [Albert-Laszló Barabási, 2016].

### Metodología de modelado

Para obtener el modelo de una red compleja (RC) de un sistema se aplica la metodología propuesta en [Reyes Lúevano, 2018]:

- Se parte del hecho de que el modelo de red compleja está dirigido a describir la estructura y la dinámica de los elementos (nodos) del sistema bajo estudio.
- Cada nodo es un elemento sensor, actuador o dispositivo de control. La interrelación entre dichos elementos se estructura a partir de aristas que permiten establecer una influencia, transporte de energía o flujo de información entre los nodos del sistema.
- Desde la perspectiva más general, la respuesta (comportamiento) de un nodo está constituida por una componente en aislamiento más una componente de interrelación.

- La componente en aislamiento en la RC se modela a través de un nodo activo. Por su parte, la componente de interrelación y total dependencia entre los elementos de una RC, se modela a través de nodos pasivos.
- Tanto la componente en aislamiento y la de interrelación poseen una estructura de RC. Entonces, el modelo de RC del sistema es el resultado de la unión lógica ( $\cup$ ) de la estructura de RC de la componente en aislamiento y bajo condición de interrelación de los nodos.

### **Modelo y análisis de un motor de combustión interna**

En este trabajo se propone el modelo en red compleja de un motor de combustión interna (véase la figura 4 para identificar sus partes), en el cual se involucra el sistema mecánico y el sistema de lubricación, los cuales tienen cierta sincronización entre sí.

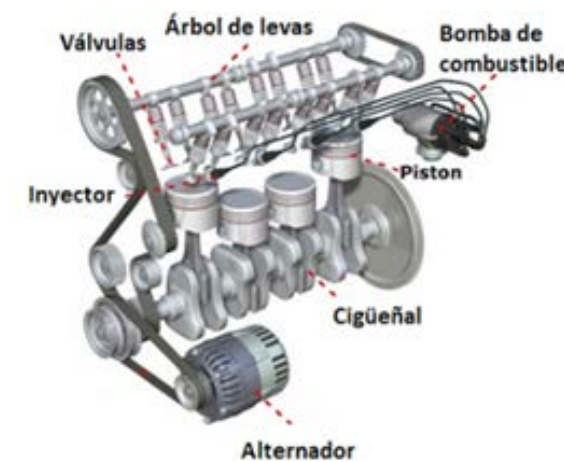


Figura 4 Sistema de combustión interna.

El funcionamiento de un motor de combustión interna consta de una serie de entradas con el fin de conseguir una salida en forma de energía mecánica. En los motores de combustión interna, el ciclo de trabajo del motor presenta varias fases, en principio se introduce en el cilindro una carga de aire y combustible que posteriormente se inflama y elevada la presión y produce la fuerza necesaria que impulsa a los pistones y hace girar al cigüeñal, transformando la energía química contenida en el combustible en energía mecánica de rotación. Posteriormente, el

gas quemado es vertido al exterior y se sucede un nuevo ciclo. Cabe resaltar que la inflamación del combustible se realiza siguiendo un ciclo de funcionamiento de dos o cuatro tiempos, logrando el encendido del combustible mediante el salto a una chispa eléctrica (esto en motores a gasolina).

El modelo en red compleja del sistema de combustión interna se muestra en la figura 5. Se usó el software Gephi [M., 2009] para su representación gráfica y obtener la matriz de adyacencia (que posteriormente se importó a Matlab para realizar el análisis de las propiedades). El modelo de RC propuesto está compuesto por 74 nodos ( $N=74$ ), 143 links ( $L=143$ ) y es una red no dirigida.

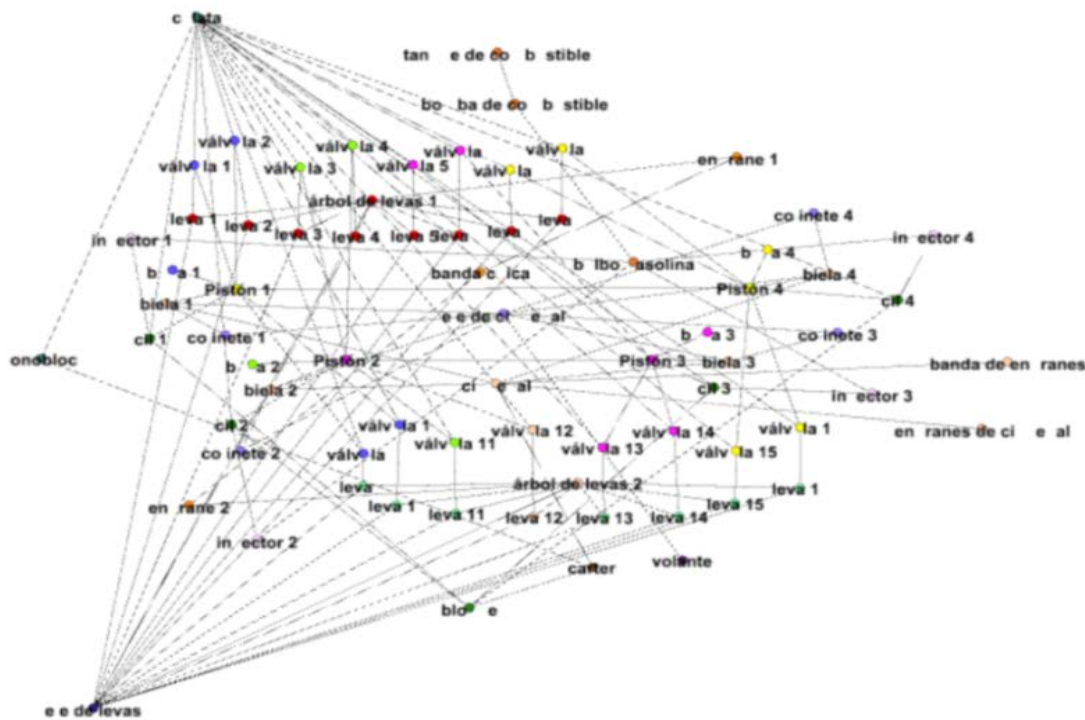


Figura 5 Modelo de red compleja del sistema de combustión interna.

La red propuesta en la figura 5, corresponde a una red no dirigida que pertenece al motor de combustión interna, descrito previamente. A continuación, se analizan algunas propiedades de la red del sistema de combustión interna (se tomó la matriz de adyacencia generada por Gephi y se importó en MatLab, donde se desarrollaron los algoritmos para llevar a cabo el análisis de las propiedades estructurales del sistema).

En la ecuación 12 se muestran los links que contiene la red.

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{63 + 11 + 16 + 53}{2} = \frac{143}{2} = 71.5 \quad (12)$$

Donde la máxima cantidad de links se presenta en la ecuación 13.

$$L_{max} = \frac{N}{2} = \frac{N(N-1)}{2}; \quad = \frac{74(74-1)}{2} = 2701 \quad (13)$$

Esto significa que el sistema de combustión interna tendrá como máximo una conexión de 2701 de nodo a nodo entre todos ellos, ya que no todos los elementos del motor se pueden relacionar con el resto de nodos de la red.

El grado promedio de la red, se muestra en la ecuación 14.

$$\langle K \rangle = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N K_i = \frac{2L}{N} = \frac{2(123)}{74}; \quad \langle K \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K_i = \frac{143}{37} = 3.8648 \quad (14)$$

El grado promedio de links que tiene cada nodo en el sistema de combustión interna será  $\langle K \rangle = 3.8648$ .

### Degree Distribution

En la figura 6 se muestra el comportamiento del sistema por medio de su grado de distribución, utilizando las funciones `plot`.m y `fit`.m de Matlab, se obtiene el exponente  $\gamma$  (gamma) de la ley de potencia mostrada en la ecuación 15. Donde  $P_k$  es la probabilidad de encontrar un nodo de grado  $K$ .

$$P_k \sim K^{-\gamma} \quad (15)$$

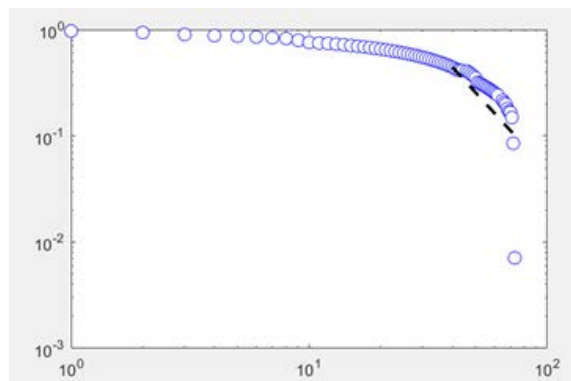


Figura 6 Grado de distribución de la RC.

Para la red compleja del sistema de combustión interna  $\gamma = 3.43$ , por lo que se concluye que el sistema complejo del motor de combustión interna se comporta como un red de mundo pequeño “Small World”. Es decir, que en esta red si existen nodos con grado alto de distribución, similares a los que se presentan en una Red Libre Escala “Scale Free” pero estos nodos concentradores no son suficientemente grandes en número para tener un impacto en la distancia entre los nodos. Para este tipo de redes con  $\gamma > 3$  la distancia promedio se calcula con ecuacion 16.

$$\langle d \rangle \sim \ln N \quad \ln(74) \sim 4.3 \quad (16)$$

Por lo que, la distancia promedio entre los nodos del sistema de combustión es  $\langle d \rangle \sim 4$ , siendo esta la dependencia que hay entre los nodos del sistema. Esta dependencia significa que, por cada nodo, aproximadamente 4 dependen de él, es decir, la red no va a colapsar por completo, únicamente bajará su rendimiento.

### Esquema propuesto

El esquema que se propone en este trabajo para detectar y localizar las fallas del sistema de combustión interna se presenta en la figura 7.

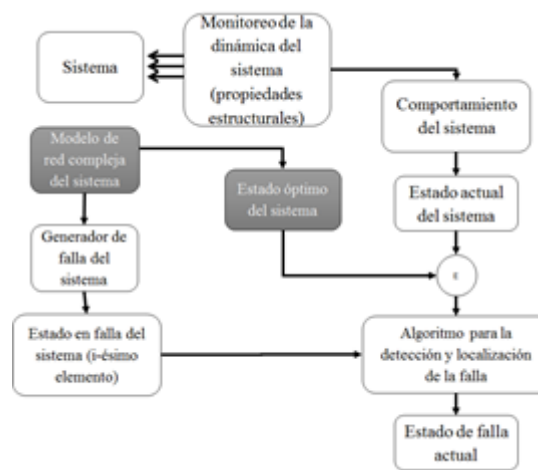


Figura 7 Esquema propuesto de detección y localización de fallas para el sistema.

El factor más importante para estimar la magnitud de una falla en la red es conocer el comportamiento del sistema. El esquema consta de los siguientes elementos:

- El módulo de monitoreo de la dinámica del sistema, integrado por los sensores que estarán evaluando las variables a estudiar.
- Una vez que obtenemos una serie de datos experimentales, es decir, evaluar el comportamiento del motor por medio del monitoreo, obtenemos el estado actual del sistema, que estima condiciones que se tienen en ese momento sobre el motor de combustión. Se hacen lecturas del comportamiento de las vibraciones, temperatura y presión del aceite, estos resultados iguales a los que se tienen en un estado óptimo del sistema derivado de la RC.
- El modelo RC representa la estructura de interacción de los elementos que integran el sistema, describiendo de esta forma su comportamiento. Al aplicar el esquema de detección activo de fallas, se procederá a obtener resultados a través de los cuales se podrán especificar las aplicaciones factibles.

### **Monitoreo de fallas del sistema de combustión interna**

En esta sección se implementa el esquema de diagnóstico de fallas propuesto para monitorear fallas en sensores de temperatura, presión y vibración del sistema de combustión interna. Se creó una interfaz gráfica en “LabVIEW” y utilizó un micro controlador tipo “Arduino” para la comunicación, lectura y exhibición de datos de los sensores del sistema de combustión interna monitoreado.

La función que tiene cada espacio de la aplicación es detectar las fallas que se presentan en el sistema, para lograr esto, es necesario tener los parámetros máximos y mínimos de las variables de temperatura, presión y vibraciones (los parámetros dependen directamente del motor que se esté utilizando, es decir lo que el fabricante nos indique como parte de sus características particulares). Estos parámetros se obtuvieron de la *data sheet* obtenida, correspondientes al motor utilizado durante la investigación.

Los datos necesarios para la interfaz se obtienen de un sensor de temperatura y un giroscopio; un giroscopio mide los movimientos de un dispositivo con un brazo de accionamiento, esto ayuda a calcular la velocidad angular. Los sensores de temperatura son dispositivos que transforman los cambios de temperatura en cambios en señales eléctricas que son procesados por equipo eléctrico o

electrónico. Dichos sensores son implementados para medir los datos reales el sistema, conocer su condición óptima e identificar un estado de falla dentro del sistema. Estos datos se exhiben en la pantalla como gráficas, las cuales al momento de salirse de los límites inferior y superior nos indican con un indicador visual (led de color rojo), que se está presentando una falla en el sistema.

En la figura 8 se presenta la interfaz para monitorear el sistema y obtener los datos de fallas del motor de combustión interna para cada una de las variables analizadas; vibración, temperatura y presión de aceite. En la figura 9 se muestra el esquema de la interfaz para el monitoreo de fallas en el sistema de combustión, misma que representa como están conectados los sensores que monitorean el comportamiento del mismo.

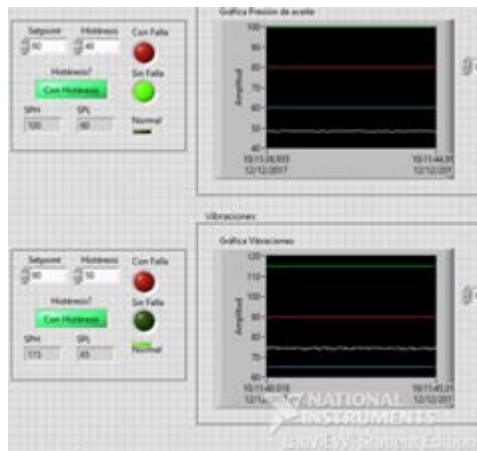


Figura 8 Interfaz para el monitoreo de fallas del sistema de combustión interna.

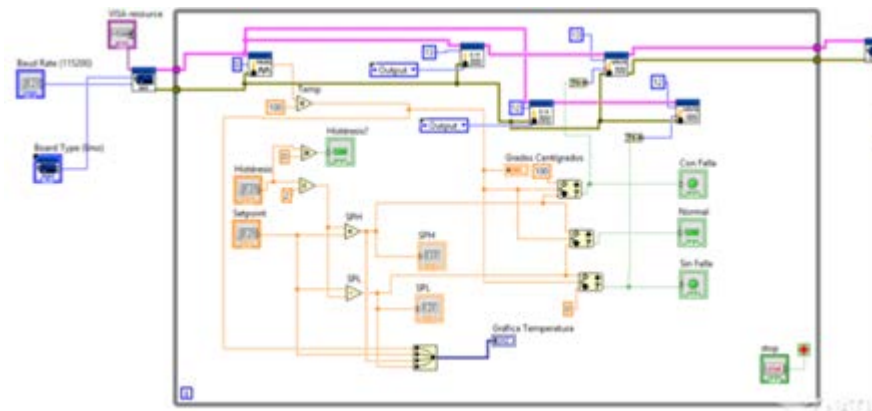


Figura 9 Esquema de conexión de la interfaz.

En la figura 10 muestra el espectro que se obtiene al monitorear fallas por temperatura en el sistema, dando un límite superior y un límite inferior como medidas máximas y mínimas de temperatura que alcanza el sistema dentro y fuera de una detección de fallas, a esto se le conoce como Setpoint e histéresis estos nos ayudan a tener delimitados los rangos (por el fabricante) ya determinados y que a su vez nos ayudan a identificar si estamos dentro de una falla o un estado óptimo en el sistema.

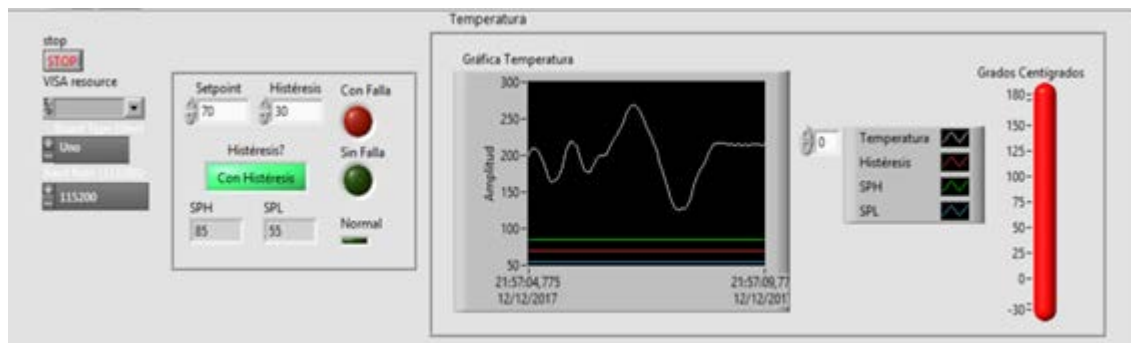


Figura 10 Gráfica de temperatura del sistema.

Para poder identificar o provocar fallas relacionadas con la presión del aceite en el sistema, es importante conocer los límites máximo y mínimo del mismo, de esta forma, se relacionan las fallas de temperatura con las de presión, ya que, si bien es conocido, un motor de combustión interna para funcionar de forma correcta requiere cierta lubricación dentro de sí mismo, el sensor mide el valor de presión la variación de la misma y lo convierte en una señal eléctrica. La señal eléctrica indica el valor de presión recibida.

En la figura 11, se muestra el espectro de la presión de aceite obtenido de nuestro controlador para recibir los datos del comportamiento del sistema, el cual se le asignó su Setpoint e Histéresis con respecto a las características del sistema. En dicha figura se muestra la presión de aceite con la que está trabajando el sistema, como han sido sus variaciones y en qué momentos se ha presentado alguna falla, se pueden apreciar los límites máximos y mínimos que se tienen considerados para esta variable y así conocer cuál es el rango para estar dentro de un buen funcionamiento.



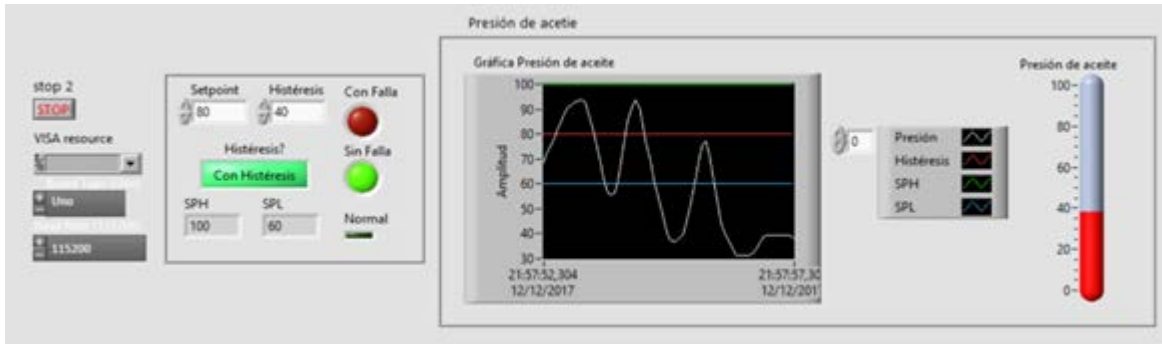


Figura 11 Gráfica de presión de aceite del sistema.

Por último, tenemos los resultados de fallas por vibración, mostrados en la figura 12, es importante mencionar que un motor de combustión interna tiene por sí mismo cierta vibración al momento de estar encendido, por lo cual es importante conocer ese registro para evitar analizar datos de forma errónea; esto no quiere decir que nuestros datos sean falsos, sino que es importante tomar en cuenta la vibración natural que presenta el sistema y no confundirla con alguna falla o avería que se pudiera estar presentando.

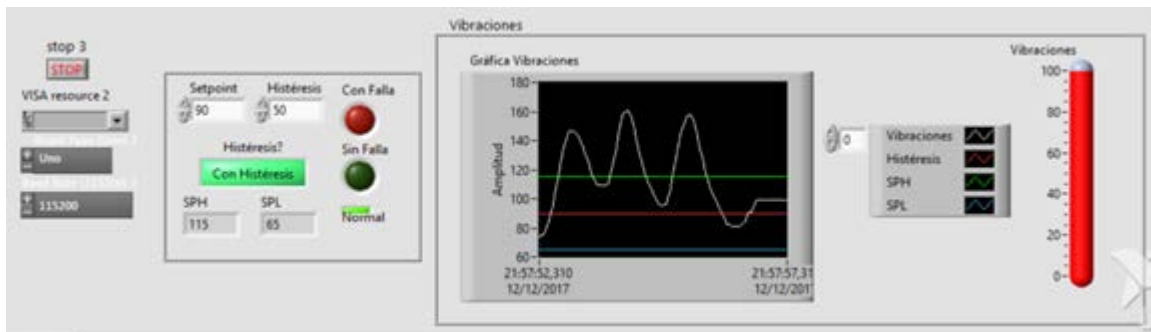


Figura 12 Gráfica de vibraciones del sistema.

### 3. Resultados

Se analizaron las propiedades del modelo en red compleja del sistema de combustión, las cuales fueron: el grado promedio de la red  $\langle K \rangle$ , el segundo momento de la distribución  $\langle K^2 \rangle$  así como la distribución de grado  $P_k$ ; con lo cual se aproximó este grado de distribución a una ley de potencia. Dando un valor de  $\gamma = 3.43$  haciendo que el sistema se comporte como un mundo pequeño o “Small

World". Es decir, que en esta red existen nodos con grado alto de distribución, similares a los que se presentan en una Red Libre Escala o "Scale Free" pero estos nodos concentradores ("hubs") no están lo suficientemente interconectados con la red compleja para tener un impacto en la distancia e influencia entre los nodos. Por lo que se infiera que el sistema no es susceptible a fallas desconocidas, pues los parámetros de medición dependen completamente de características específicas del mismo. Por tal motivo, el sistema no falla por completo, se degrada el funcionamiento únicamente.

El esquema de monitoreo propuesto, tiene como ventaja conocer el comportamiento interno en tiempo real de nuestro sistema, ya que si bien, aunque en el tablero de un vehículo se exhiben ciertos datos, los que se analizaron con este enfoque son desconocidos por el usuario. Desde el formalismo de redes complejas se modela la parte operativa del motor de combustión interna. El esquema que se propone, implementan un sistema de monitoreo al adquirir las señales del comportamiento del motor, con el propósito de detectar y localizar fallas en el mismo. El sistema de monitoreo fue desarrollado en LabVIEW™, y para la adquisición de señales, se diseñó y construyó el hardware (sistema electrónico) necesario para el acondicionamiento y filtrado de señales de interés.

#### **4. Discusión**

Con base a los resultados se verifica que, con las redes complejas, se requiere conocer el comportamiento del sistema, visualizar el mismo en diferentes escenarios, plantear situaciones en las cuales sistema falle de manera inesperada por si solo; o bien, por un ataque provocado al mismo. Es importante tomar en cuenta todos los componentes que integran el sistema e identificar la importancia que tiene dentro del mismo y como se relaciona con los demás. Al implementar el uso de LabVIEW validamos la detección de fallas en el sistema de combustión.

#### **5. Conclusiones**

Se analizaron las propiedades del modelo en red compleja del sistema de combustión, las cuales fueron: el grado promedio de la red  $\langle K \rangle$ , el segundo

momento de la distribución  $\langle K^2 \rangle$  así como la distribución de grado  $P_k$ ; con lo cual se aproximó este grado de distribución a una ley de potencia. Dando un valor de  $\gamma = 3.43$  haciendo que el sistema se comporte como un mundo pequeño o “Small World”. Es decir, que en esta red existen nodos con grado alto de distribución, similares a los que se presentan en una Red Libre Escala o “Scale Free” pero estos nodos concentradores (“hubs”) no están lo suficientemente interconectados con la red compleja para tener un impacto en la distancia e influencia entre los nodos. Por lo que se infiere que el sistema no es susceptible a fallas desconocidas, pues los parámetros de medición dependen completamente de características específicas del mismo. Por tal motivo, el sistema no falla por completo, se degrada el funcionamiento únicamente.

El esquema de monitoreo propuesto, tiene como ventaja conocer el comportamiento interno en tiempo real de nuestro sistema, ya que si bien, aunque en el tablero de un vehículo se exhiben ciertos datos, los que se analizaron con este enfoque son desconocidos por el usuario. Desde el formalismo de redes complejas se modela la parte operativa del motor de combustión interna. El esquema que se propone, implementan un sistema de monitoreo al adquirir las señales del comportamiento del motor, con el propósito de detectar y localizar fallas en el mismo. El sistema de monitoreo fue desarrollado en LabVIEW™, y para la adquisición de señales, se diseñó y construyó el hardware (sistema electrónico) necesario para el acondicionamiento y filtrado de las señales de interés.

## **6. Bibliografía y referencias**

- [1] N. Mark, A.-L. Barabási y. D. J. Watts, *The Structure and Dynamics of Networks*, Princeton: Princeton University Press and copyrighted, 2006.
- [2] J. Reyes Luevano, E. Ruiz Beltrán y L. Castañeda Ramos, *Structural Analysis and Fault Detection on Manufacturing Systems: a Complex Networks Approach*, IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC 2017). 2017.

- [3] J. Reyes Lúevano, E. Ruiz Beltrán , L. A. Castañeda Ramo y J. L. Orozco Mora , Detección y Aislamiento de Fallas en Sistemas de Manufactura desde el Enfoque de Redes Complejas, *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 00, pp. 1-12, 2018.
- [4] S. V. Buldyrev, R. Parshani, P. Gerald, H. E. Stanley y H. Shlomo, Catastrophic cascade of failures in interdependent networks, *letters*, vol. 464, n° doi: 10.1038/nature08932, pp. 1025-1028, 2010.
- [5] J. Shao, S. v, V. Buldyrev, H. Shlomo y E. H. Stanly, Cascade of failures in coupled network systems with multiple support-dependence relations, *Physical Review*, n° 83, pp. 036116-1 - 036116-9, 2011.
- [6] S. Z., Q. H. y D. W., Application of Neutral Network to Automobile Engine Failure Detecting, de *The Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2008)*, China, 2008.
- [7] Aleksandar Vencl, Diesel Engine Crankshaft journal bearings failures: case study, *ELSEVIER*, vol. 44, pp. 217-228, 2014.
- [8] Albert-Laszló Barabási, *Network Science*, United Kingdom, Cambridge University Press, 2016.
- [9] B. M., H. S. y J. M., Gephi: an open source software for exploring and manipulating networks. *International AAAI Conference on Weblogs and Social Media*, 2009: <https://gephi.org/users/publications/>.
- [10] Math works, Math work, The Math Works, Inc., 1994-2016: [es.mathworks.com](http://es.mathworks.com).
- [11] The power portal. Com: <http://www.briggsandstratton.com/~media/frequently%20asked%20questions/engine/pdfs/replacement%20engine%20specifications/horizontal%20shaft/145%20b%20gt%20horiz.pdf>.