

Detección y Aislamiento de Fallas en Sistemas de Manufactura desde el Enfoque de Redes Complejas

Juan Reyes-Luévano ^{a,*}, Elvia Ruiz-Beltrán ^b, L. A. Castañeda-Ramos ^c, J. L. Orozco-Mora ^c

^a Departamento de Posgrado e Investigación, ^b Departamento de Sistemas y Computación, ^c Departamento de Eléctrica-Electrónica.
^{a,b,c} Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Av. Adolfo López Mateos No. 1801 Ote. Aguascalientes, Ags. 20240, México.
juanreyes.luevano@gmail.com, (erui, drorozco)@mail.ita.mx, lacr347@yahoo.com.mx

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología de modelado, detección y aislamiento de fallas en la parte operativa de los Sistemas de Manufactura Flexible (SMF), desde el enfoque de la teoría de Redes Complejas (RC). Como resultado, se propone un esquema en línea de detección y localización de fallas, basado en la simetría estructural de interrelación y la dinámica no distinguible del modelo de red compleja. Además, se implementa un segundo esquema que se basa en la detección de una falla, a través de la observación de un cambio abrupto (producido por la falla) en la derivada de i -ésimo orden de las variables de estado, de una red de sistemas Lineales e Invariantes en el tiempo (LIT). En este contexto, un sistema de monitoreo en línea y adquisición de señales es desarrollado para validar los esquemas antes descritos en una Línea de Proceso de Enlatado (LPE). Los resultados teóricos y experimentales validan los esquemas y confirman la existencia de fenómenos como auto regulación, simetría y organización, en los sistemas de manufactura.

Palabras Clave:

Detección, Aislamiento, Falla, Monitoreo en línea, Sistemas Complejos, Sistemas de Manufactura.

Failure Detection and Location on Manufacturing Systems: a Complex Network Approach

Abstract

This paper presents a modeling methodology, detection and isolation of faults on the operative part of Flexible Manufacturing Systems (FMS) through a Complex Networks (CN) approach. As a result, an online fault detection and location scheme is proposed, based on the structural symmetry of interrelation and the non-distinguishable dynamic of the complex network model. Moreover, a second scheme is implemented, which is based on the detection of a fault through the observation of an abrupt change (produced by the fault) in the i th order derivatives of the state variables on Linear Time-Invariant (LTI) system's networks. In this context, an online monitoring and signal acquisition system was developed to validate the schemas described above on a Canning Process Line (CPL). The theoretical and experimental results validate the schemas and confirm the existence of phenomena like self-regulation, symmetry and organization, in manufacturing systems.

Keywords:

Detection, Isolation, Failure, Online Monitoring, Complex Systems, Manufacturing Systems.

1. Introducción

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. Lo anterior, con el fin de adaptarse y competir en el mercado. Sin embargo, los SMF son susceptibles a la presencia de fallas en la parte operativa (sensores y actuadores) que ocasionan paros de proceso no programados. En consecuencia, se generan pérdidas económicas significativas para la organización. Por ello, el tiempo de reactivación del proceso es un factor importante que depende principalmente de la detección, aislamiento y reparación de la falla.

En este sentido, el diagnóstico de fallas en SMF ha sido abordado desde distintos formalismos. En (Kuo and Huang, 2000), un modelo basado en redes de Petri coloreadas y temporizadas es usado para detectar y corregir conductas anormales en los procesos de un SMF. Así mismo, en (Lepuschitz *et al.*, 2012), un enfoque basado en el modelo oculto de Markov usa una topología distribuida de agentes para detectar conductas inesperadas de proceso y fallas en componentes del sistema. Sin embargo, un proceso de aprendizaje es necesario para el reconocimiento correcto de una falla. Por su parte, en (Zhang *et al.*, 2013), se propone un modelo estadístico para eliminar fallas en la región temprana de la vida útil de la parte operativa de un SMF. En este mismo sentido, en (Nguyen *et al.*, 2014), se propone un enfoque

*Autor para correspondencia: juanreyes.luevano@gmail.com (Juan Reyes-Luévano).

basado en redes bayesianas para reducir el espacio de búsqueda de fallas, que originan desviaciones en la calidad de los productos de un SMF.

Los trabajos antes descritos presentan resultados en relación a la detección de la falla; sin embargo, no se trata el aislamiento y propagación de la misma. Además, abordan el concepto de falla como un cambio en la conducta de los procesos de un SMF. Es decir, cambios en las secuencias de procesos. No obstante, estas desviaciones son producidas por cambios internos en el equipo o fallas en elementos actuadores y/o sensores. Por esta razón, el diagnóstico de falla debe plantearse a un nivel más profundo. En otras palabras, debe estudiarse la detección y aislamiento de una falla, en la dinámica interna de la parte operativa de un SMF. Abordar el problema de esta forma implica tratar con un número significativamente alto de variables y su interrelación. Sin embargo, el modelo de redes complejas permite tratar con la complejidad organizada (Weaver, 1948) que presentan estos sistemas. La ventaja de este formalismo es la posibilidad de capturar la dinámica y la estructura de interrelación del sistema a diferentes niveles de abstracción, a través de un tratamiento matemático simple; que permite derivar las propiedades estructurales y dinámicas del sistema. En este contexto, el mantenimiento de un SMF a mediana y gran escala puede llegar a ser complejo y costoso, por la cantidad de elementos que lo integran. No obstante, es indispensable para mantener la eficiencia y calidad de los procesos de producción. Por ende, surge la necesidad de desarrollar esquemas de detección y aislamiento de fallas en SMF cada vez más rápidos y precisos.

Hoy en día, los trabajos en la materia presentan diversos métodos de detección y aislamiento de fallas. Las técnicas cuantitativas parten del modelo del sistema y teorías de control para generar señales residuales (Ding, 2008) sensitivas a la falla e insensibles al ruido, perturbaciones y componentes de incertidumbre (Patton and Chen, 1997). En este sentido, se tienen trabajos basados en filtros de detección (Park *et al.*, 1994), (White and Speyer, 1987), observadores de estado (Patton and Chen, 1997), (Frank *et al.*, 1987) y de entradas desconocidas (Chen *et al.*, 1996), relaciones de paridad (Gertler, 1997), estimación de parámetros (Isermann, 1984), filtros de Kalman (Hanlon and Maybeck, 2000) y algoritmos robustos de prueba de hipótesis para evaluar residuos (Shiryayev, 1978). Por su parte, las técnicas cualitativas usan modelos de Inteligencia Artificial (Gentil *et al.*, 2004) como redes bayesianas, algoritmos genéticos, lógica difusa y redes neuronales artificiales; para implementar la detección de fallas por reconocimiento de patrones. Finalmente, trabajos recientes presentan resultados basados en técnicas de procesamiento de señales que permiten interpretar las propiedades de una señal por medio de transformaciones al dominio tiempo-frecuencia y tiempo-escala. Entre estas se tienen, la transformada de Fourier de tiempo reducido y la Transformada discreta Onduleta (Trutié-Carrero *et al.*, 2018).

Por su parte, el diseño del diagnosticador difiere de acuerdo a los siguientes criterios (Rajaoarisoa and Sayed-Mouchaweh, 2017): 1) la dinámica del proceso (discreta, continua o híbrida) desde la cual se aborda el problema, 2) la implementación del método de diagnóstico (en línea o fuera de línea) y 3) la topología de distribución del diagnosticador; que puede ser centralizada, descentralizada o distribuida. Los investigadores consideran las características antes descritas en el diseño del diagnosticador e implementan uno de los tres posibles enfoques. El primer enfoque es el integral o integrado y consiste en incluir el diagnóstico durante el diseño del sistema de control, al integrar todos los estados de falla. Por ende, la condición normal y de falla, son manejadas por el sistema de control (Diao and Passino, 2002) y (Xianzhi and Wen, 2010). El segundo enfoque es denominado un

enfoque separado. Éste considera al diagnóstico como una función propia e independiente del sistema de control. Por consiguiente, el diagnosticador debe ser agregado al control del proceso (Paoli *et al.*, 2011) y (Chakkor *et al.*, 2014). Finalmente, el último enfoque es un punto medio entre el integral y el separado. En este mismo sentido, desde el marco de referencia de sistemas de eventos discretos, el diseño del diagnóstico de falla en línea es realizado usando el formalismo de redes de Petri (Ramírez-Treviño *et al.*, 2007) y (Ramírez-Treviño *et al.*, 2012).

Un aspecto importante es el hecho de que diversas propuestas para el diagnóstico requieren que las fallas a ser diagnosticadas sean definidas previamente e incluidas en el modelo. Esto da lugar a un diagnosticador estático, incapaz de detectar nuevos tipos de falla. En (Rajaoarisoa and Sayed-Mouchaweh, 2017), se expone el diseño de un diagnosticador adaptivo usando el formalismo de especificación de sistemas de eventos discretos. Esto permite al diagnóstico incluir nuevas conductas de falla a través del uso de un sistema experto.

Por otro lado, en los últimos años, debido a la cantidad de variables que se tienen en los sistemas, el uso de formalismos de la ciencia de las redes para estudiar sistemas complejos ha tenido un auge acelerado. La investigación en el área de detección y aislamiento de fallas busca modelos de diagnóstico basados en la estructura y la dinámica de la red. En (Rahimian and Preciado, 2015), el diagnóstico de fallas en aristas de redes homogéneas de subsistemas LIT, se basa en el monitoreo y detección de cambios abruptos en la derivada de i -ésimo orden de la variable de estado del nodo de observación. Así mismo, en (Shao *et al.*, 2011), se plantea un modelo de propagación de fallas en cascada, en redes acopladas por una relación interdependiente de múltiple soporte-dependencia, el cual describe de una manera más fiel, la forma en que coexiste la estructura y la dinámica en los sistemas reales. En este sentido, (Reyes-Luévano *et al.*, 2017) presenta un estudio que evidencia el grado de tolerancia a una falla aleatoria y la extrema vulnerabilidad a falla inducida que exhiben los sistemas de manufactura; a partir del análisis de la estructura de interrelación del modelo de Red Compleja (RC) de un caso de estudio. De esto se concluye, que estudiar la forma en que coexiste e interactúa la estructura y la dinámica del modelo de RC de sistemas de tecnología; ha de permitir comprender los fenómenos de propagación y vulnerabilidad a fallas que presentan los sistemas. Así mismo, nuevos esquemas de detección pueden ser propuestos, dada la existencia de más información para estructurar las firmas de falla.

En resumen, un enfoque de diagnóstico en SMF debe garantizar las siguientes características: el diagnóstico debe ser fácil de implementar, concebible algorítmicamente, y finalmente, ser factible en tiempo real. Esto con el propósito de reducir el tiempo de reactivación de proceso e implementar acciones de reconfiguración como se describen en (Hwang *et al.*, 2010). De esta forma, se pretende desarrollar SMF más robustos ante una falla.

Lo antes descrito ha motivado el presente trabajo y los resultados que se presentan son: 1) una metodología que permite abordar el modelado de sistemas de tecnología desde el enfoque de redes complejas, 2) la propuesta de un esquema de detección y aislamiento de fallas, basado en las propiedades estructurales y dinámicas del modelo de RC, y 3) el diseño y construcción de un sistema de monitoreo y adquisición de señales para implementar y validar experimentalmente el esquema propuesto, así como un segundo método basado en la observación de un cambio abrupto en la derivada de i -ésimo orden de las variables de estado del modelo de RC, el cual está explícitamente relacionado a la presencia de una falla. Cabe mencionar que las investigaciones en el área no han presentado resultados sobre la manera en que se influyen los nodos de la red, ni tampoco sobre los fenómenos

que surgen de la forma en que coexisten la estructura y la dinámica, en la RC. En este trabajo mostramos como el comportamiento de los nodos es descrito en términos de la estructura de la red, además, se expone la forma en que los nodos se influncian en base a dicha estructura de interrelación. Finalmente, se muestra la existencia de fenómenos como auto regulación, organización y simetría; en la dinámica global de la RC, los cuales pueden ser observados en sistemas reales de naturaleza tecnológica, biológica y social. En este contexto, el contenido de este artículo es organizado como sigue: en la sección 2 se presenta información preliminar necesaria para abordar el tema de RC y se propone una metodología de modelado. En la sección 3 y 4 se exponen dos esquemas de detección y aislamiento de fallas, basados en el formalismo de redes complejas. Por su parte, en la sección 5 se muestra la Línea de Proceso de Enlatado (LPE) en la que se implementan los esquemas y la metodología de modelado. Así como el sistema de monitoreo en línea y adquisición de señales que se ha desarrollado para la implementación y validación de dichos esquemas. Finalmente, los resultados teóricos y experimentales se muestran en la sección 6.

2. Información Preliminar y Modelo Dinámico de una RC

2.1. Redes Complejas

En este trabajo, se modela a los sistemas de manufactura flexible como sistemas complejos. La razón de ello reside en que los SMF de mediana y gran escala presentan cientos de miles de elementos que interactúan de forma intrincada. Parte de dicha interacción es explícita; sin embargo, gran parte está implícita en la estructura y dinámica de estos sistemas. Entonces, los sistemas complejos se modelan mediante un grafo (Barabási 2016) como el que se muestra en la Fig. 1. A esta representación se le denomina Red Compleja (RC).

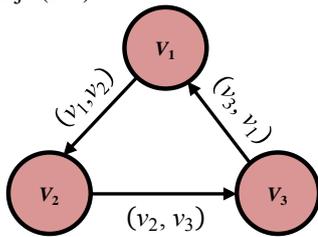


Figura 1: Red Compleja.

Una red compleja se define en términos de la teoría de grafos como un par ordenado de conjuntos $G := (V, \varepsilon)$, donde $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ es el conjunto de $N=|V|$ elementos vértices (nodos) de la red. Así mismo, ε 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 a la cabeza y w_{ej} el peso de la arista.

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

En una RC existen dos tipos de camino, un camino cerrado (subestructura cíclica) y un camino abierto. Un camino de longitud m en G está dado por el recorrido de una secuencia ordenada de nodos distintos de la forma $W := ((v_{i0}, v_{i1}), (v_{i1}, v_{i2}), \dots, (v_{i2}, v_{im}))$ a través de aristas dirigidas; donde v_{im} denota al nodo i -ésimo tal que $v_i \in V$; de tal forma que para $m=0, 1, \dots, m-1$, los vértices v_{im} y v_{im+1} son adyacentes, v_{i0} y v_{im} se denominan nodos termina-

les. Cuando los nodos terminales son iguales ($v_{i0} = v_{im}$) en un camino de longitud m , éste es llamado ciclo, en caso contrario, es una trayectoria de camino abierta. El conjunto de todos los caminos dirigidos del vértice v_i al v_j con longitud m se denota $w^m(v_i, v_j)$. La longitud m de un camino se define como sigue: $m = \text{dist}(v_i, v_j) = 0$ bajo la suposición de que no existen auto lazos en la red, en caso contrario $\text{dist}(v_i, v_j) = 1$, así mismo $m = \text{dist}(v_i, v_j) = \infty$ si y sólo si, $w^m(v_i, v_j) = \{\emptyset\}$, y finalmente, $\text{dist}(v_i, v_j) = m$ para toda trayectoria dirigida de camino W tal que $w^m(v_i, v_j) \neq \{\emptyset\}$.

2.2. Modelo Dinámico de una RC con nodos activos y pasivos

El modelo dinámico de una RC se caracteriza por que involucra la estructura y la dinámica de sus elementos (nodos y/o aristas) y expone la relación que existe entre la ciencia de las redes y la teoría de control. Estudios recientes de (Rahimian and Preciado, 2015) exponen una red que presenta un modelo dinámico en cada nodo con una dinámica Laplaciana. En este mismo sentido, (Cowan et al., 2012) estructuran el modelo dinámico de una red compleja considerando elementos integradores con una constante de tiempo finita en cada nodo. En el presente trabajo se concuerda en parte con el modelo tratado por (Rahimian and Preciado, 2015), dado el nivel de generalización. Sin embargo, nuestro estudio se enfoca en tratar con sistemas de tecnología y modelar su comportamiento natural, sin considerar dinámicas nodales como del tipo Laplaciana. El modelo dinámico de RC que se emplea en este trabajo se presenta en la Fig. 2.

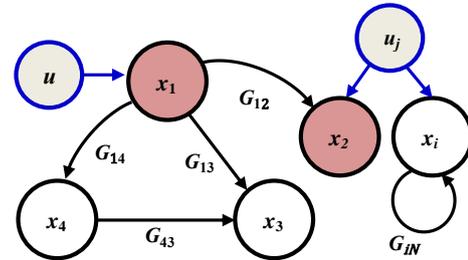


Figura 2: Modelo Dinámico de una Red Compleja.

El modelo considera una red de N subsistemas LTI (en inglés *Linear Time-Invariant*). De esta forma, cada nodo es un subsistema que se interrelaciona con otros, a través de una variable de estado cuya estructura de interacción la define la matriz de adyacencia G_{ij} . El comportamiento en el tiempo t de la variable de estado de cada nodo v_i , se denota por $x_i(t)$, y su dinámica interna está definida para un $t > t_0 \in \mathbb{R}$ por (1).

$$\begin{aligned} \dot{x}_{(i)}(t) &= Ax_{(i)}(t) + B \left(\sum_{j=1}^N G_{ij} \Gamma y_{(j)}(t) + u_{(i)}(t) \right) \\ y_{(i)}(t) &= Cx_{(i)}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

Donde $y_{(i)}(t) \in \mathbb{R}^h$ es la salida del i -ésimo subsistema. Así mismo, $u_{(i)}(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de señales de entrada inyectadas al i -ésimo subsistema. Las matrices $A \in \mathbb{R}^{d \times d}$, $B \in \mathbb{R}^{d \times n}$, $C \in \mathbb{R}^{h \times d}$ describen el comportamiento de cada subsistema en aislamiento. Por su parte, $\Gamma \in \mathbb{R}^{n \times h}$ corresponde a la matriz de acoplamiento interno; y describe la forma en que los nodos vecinos a un primer nivel, influncian el estado del i -ésimo subsistema. Cabe mencionar que el primer nivel de la red asociado a un i -ésimo nodo lo constituye el conjunto de nodos vecinos, y se caracteriza por que la longitud de camino m (número de aristas) del i -ésimo nodo a los nodos vecinos es $m=1$. Entonces, de esta misma forma existe un segundo, tercero o m -ésimo nivel en la red.

Desde esta perspectiva, cada nodo es una entidad funcional si presenta una entrada $u_{(i)}(t)$ que puede ser independiente de las entradas asociadas a otros nodos. En esencia, cada nodo es una función de transferencia generalizada a un orden arbitrario; que puede poseer o no una entrada independiente. Cabe mencionar, que existen nodos activos y pasivos en un modelo de RC. Puede observarse en la Fig. 2. que x_1 , x_2 y x_i corresponden a nodos activos. Por otro lado, x_4 y x_3 son nodos pasivos, debido a que su comportamiento depende totalmente de su respuesta interna ante las señales de interrelación que guarda con otros nodos.

2.3. Metodología de modelado

Para obtener el modelo de RC de un sistema se propone la siguiente metodología:

I. Se parte del hecho de que el modelo de RC 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.

II. Desde la perspectiva más general, la respuesta (comportamiento) de un nodo está constituida por una componente en aislamiento más una componente de interrelación.

III. 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.

IV. Tanto la componente en aislamiento y la de interrelación poseen una estructura de RC.

V. 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.

3. Esquema de detección y aislamiento de fallas basado en la observación de cambios abruptos en la dinámica de la Red Compleja.

El primer esquema que se aborda en este trabajo y se implementa con el propósito de detectar y aislar fallas en la parte operativa de los SMF, está basado en la idea de que una falla en el modelo de red compleja produce un cambio abrupto (no linealidad) que se propaga en su estructura (Rahimian and Preciado, 2015). Dicho esquema se estructura a partir del modelo descrito por (1) y puede expresarse empleando (2). Donde \otimes representa el producto Kronecker.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= (I_N \otimes A_{(i)} + G \otimes B_{(i)}) \Gamma C_{(i)} x_{(i)}(t) + (I_N \otimes B_{(i)}) u_{(i)}(t) \\ y(t) &= (I_N \otimes C_{(i)}) x(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Cabe mencionar que el esquema está limitado a la detección y aislamiento de una única falla en el mismo instante de tiempo, en redes con alta simetría estructural. La falla es detectada a través de la observación de un cambio abrupto en la k -ésima derivada de las variables de estado de los nodos de la red. El orden de la derivada está asociado a la longitud de camino dirigido desde el punto de origen de la falla, al punto de observación, y el mínimo grado relativo de la función de transferencia de los nodos. La expresión que relaciona el orden de la derivada k que se requiere para detectar el cambio abrupto producido por una falla en cierta región de la red, con la longitud de camino m del punto de falla al nodo de observación y el grado relativo r de la función de transferencia de cada nodo; corresponde a (3).

$$k = r(m+1) \quad (3)$$

La función de transferencia $G(s)$ de cada nodo es descrita por

(4). Por lo que una falla es detectable si y sólo si, existe un camino dirigido desde el punto de falla al nodo de observación de la red. El cambio abrupto $\Delta_{p,k}(t)$ es definido empleando (5).

$$G(s) = C(sI_d - A)^{-1}B \quad (4)$$

$$\Delta_{p,k}(t) := \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \left(\left. \frac{d^k y_{(p)}}{dt^k} \right|_{t+\varepsilon} - \left. \frac{d^k y_{(p)}}{dt^k} \right|_{t-\varepsilon} \right) \quad (5)$$

La ecuación (6) caracteriza el efecto de una falla en la arista (v_j, v_i) en la k -ésima derivada de la variable de estado del nodo de observación v_p , como una función de la distancia (número de aristas) de la cabeza de la arista en falla v_i , al nodo de salida v_p ; como se muestra en la Fig. 3.

$$\Delta_{p,k}(t_f) = \begin{cases} 0, & k < (\text{dist}(v_i, v_p) + 1)r \\ \neq 0, & k = (\text{dist}(v_i, v_p) + 1)r \end{cases} \quad (6)$$

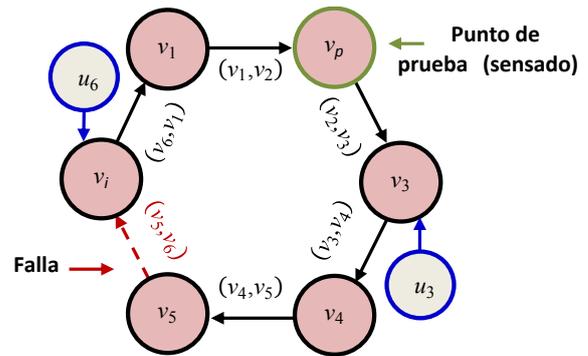


Figura 3: Escenario de falla y su propagación en la Red Compleja.

3.1. Aislamiento de la falla

Específicamente, si $\Delta_{p,k}(t_f) \neq 0$ para cualquier nodo de observación v_p que pertenece al conjunto de nodos sensores N_S ($v_p \in N_S$), entonces, una arista ha fallado en la red en t_f . Dada la ocurrencia de la falla, el proceso de aislamiento implica determinar los valores de p y k para quién $\Delta_{p,k}(t_f) \neq 0$ (Rahimian and Preciado, 2015). Así mismo, se construye una matriz de búsqueda D que tiene como columnas el índice de las aristas y como índice de filas, los nodos sensores. Esta matriz es descrita por (7). Donde z denota el orden de la máxima derivada de las variables de estado de la red que puede ser implementada (restricción de hardware) y ε denota el conjunto de las aristas de la red.

$$d_{pe} = [D]_{pe} \in \{0, 1, \dots, z\}^{|N_S| \times |\varepsilon|} \quad (7)$$

Entonces, para cada arista $\varepsilon := (v_j, v_i)$ y nodo v_p existe una d_{pe} que corresponde a la longitud de camino $d_{pe} := (\text{dist}(v_p, v_i) + 1)r$, bajo la condición descrita por (8). Es decir, d_{pe} corresponde a la mínima k que existe desde el nodo sensor v_p , al origen de la falla v_i ; que permite detectar la perturbación producida por la misma.

$$\min_{k \leq z} \{k: \Delta_{p,k}(t_f) \neq 0\} = d_{pe} \quad (8)$$

Por lo tanto, en términos de la matriz D , la arista en falla es aquella columna que coincide con el vector columna V/k descrito por (9).

$$V/k = (k_1, \dots, k_{|N_S|})^T \quad (9)$$

Para $k_p := \min_{k \leq z} \{k: \Delta_{p,k}(t_f) \neq 0\} = d_{pe}$.

4. Esquema de detección y aislamiento de fallas basado en la simetría estructural de interrelación y la dinámica no distinguible de la Red Compleja (RC)

El esquema que se propone en este trabajo se basa en la simetría estructural de interrelación de los nodos de una RC. Este

aspecto da lugar a un fenómeno de organización en la dinámica de la red en términos de la estructura de interacción global. Es decir, el comportamiento de los nodos da lugar a lo que denominamos bandas y componentes de banda. Por ende, cuando una falla (aristas con trazo a segmentos) ocurre en la red (Fig. 4), el comportamiento de los nodos cambia, es decir, se reorganiza como lo muestra la Fig. 5. Se modela una falla abrupta como la remoción de una arista y una falla incipiente como un cambio en el peso w_{ij} de las aristas de la RC. Cabe mencionar, que dos aspectos importantes son presentados en este estudio, y surgen de la estructura de interacción. Estos son: el fenómeno de organización y el de auto regulación; ambos presentes en el comportamiento de los nodos de la RC.

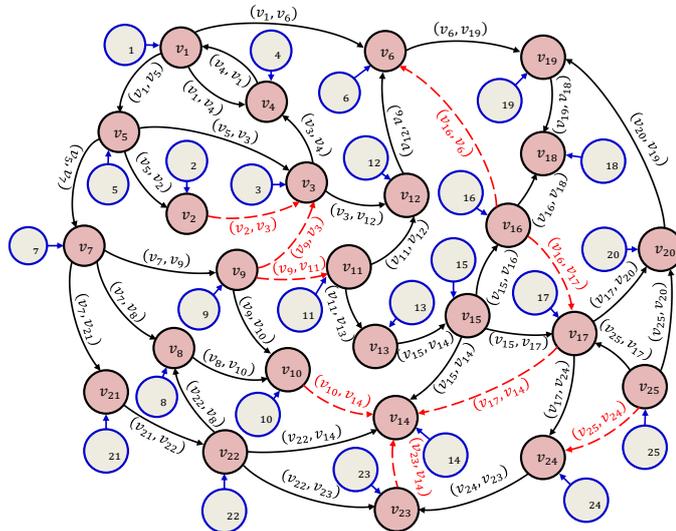


Figura 4: Modelo de RC con escenario de falla.

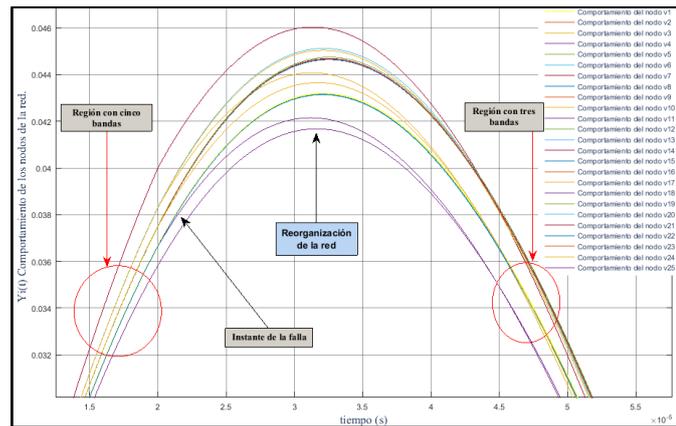


Figura 5: Organización del comportamiento de los nodos de la RC de la Fig. 4 en bandas y componentes de banda.

En este contexto, se propone un método para detectar y aislar fallas en nodos y aristas de una RC homogénea (dirigida y/o no dirigida) de subsistemas LTI. El principio en el que se basa la detección y aislamiento de la falla es la reorganización de los comportamientos de los nodos en términos del cambio estructural de interrelación que produce una falla única o múltiple en la red. El esquema es capaz de trabajar con modelos de red dirigida y no dirigida, con redundancia (múltiples aristas que transportan la misma información a distintos nodos), y auto lazos. El modelo de RC del que se parte es (1). En este sentido, el comportamiento $Y(s)$ de un nodo i de la red es descrito por (10) desde el dominio de la frecuencia y el concepto de función de transferencia $G(s)$.

$$Y_{(i)}(s) = G_{(i)}(s) \left[\sum_{j=1}^N G_{ij} J Y_{(j)}(s) + U_{(i)}(s) \right] \quad (10)$$

Por ende, cada nodo se trata como una función de transferencia descrita por (11), que recibe una señal de influencia de la red, y así mismo, su respuesta ante ella, genera un efecto sobre la red, como se muestra en la Fig. 6.

$$G_{(i)}(s) = C_{(i)}(sI - A_{(i)})^{-1} B_{(i)} \quad (11)$$

4.1. Organización del comportamiento de los nodos de la RC

En RC activas se ha encontrado que, bajo la condición de una dinámica nodal homogénea, una RC presenta un conjunto característico de bandas de comportamientos y componentes de banda (ver Fig. 5). Por lo tanto, es posible caracterizar la estructura de una red en términos del comportamiento dinámico de los nodos. Los resultados muestran, que el número de bandas de comportamientos en una red lo define el número de clases de equivalencia N_B que induce el grado de entrada k^{in} (número de aristas que arriban al nodo). Lo antes descrito se tiene de lo siguiente: el grado de entrada de cada nodo j -ésimo es el conjunto α_j con un único elemento ($|\alpha_j|=1, \forall j|j=1, 2, \dots, N$) y está definido por (12).

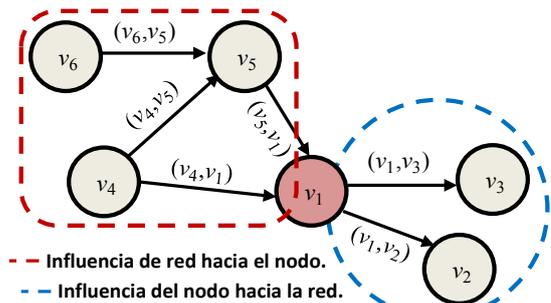


Figura 6: Estructura de influencia de un nodo v_1 de la Red Compleja.

$$\alpha_j = \{x | x = \sum_{i=1}^N G_{ij}, \forall i, j=1, 2, \dots, N\} \quad (12)$$

Por lo tanto, el conjunto formado por el grado de entrada de cada uno de los nodos de la red se denota por B , y está descrito por (13).

$$B = \cup \alpha_j, \forall j | j=1, 2, \dots, N \quad (13)$$

Las clases de equivalencia inducidas por el grado de entrada k^{in} están descritas por (14). Donde R es una relación de equivalencia sobre el conjunto B . Para cada $b \in B$.

$$[k^{in}] = \{b \in B | b R k^{in} \text{ Para } k^{in} \in B\} \quad (14)$$

Entonces:

$$\chi = \{[k^{in}] | k^{in} \in B\} \quad (15)$$

En donde el número de bandas de comportamientos (bandas de referencia B_R) de la red N_B es descrito por (16). La Fig. 8 muestra el comportamiento $y_i(t)$ de los nodos de la red de la Fig. 7. Se considera un modelo nodal interno arbitrario $G_i(s)$ y una entrada $u_i(s)$. Los resultados muestran la formación de una única componente de banda y una sola banda. De esto se tiene que el comportamiento de un nodo está relacionado con la estructura de interrelación de la RC.

$$N_B = B_R = |\chi| \quad (16)$$

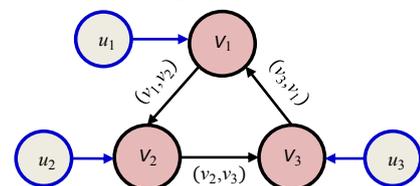


Figura 7: RC con estructura de interrelación cíclica.

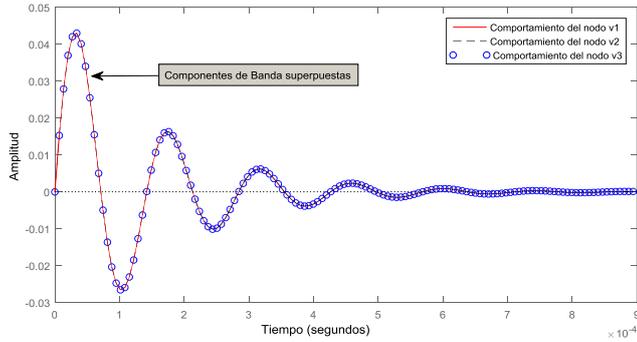


Figura 8: Bandas y componentes de banda de la RC de la Fig. 7.

4.2. Descripción del comportamiento de un nodo de la RC en términos de la estructura de interrelación

Se ha encontrado que, el comportamiento de un nodo de la red está relacionado con tres factores: 1) dinámica nodal, 2) la longitud de camino y 3) el grado de entrada. En una red, el comportamiento de un nodo se define como su respuesta ante la influencia total que recibe de los nodos de distintas regiones de la red y la suya propia si es que la interrelación en la red lo permite.

Entonces, la estructura de interrelación (influencia de la red sobre el nodo) la conforman todos los nodos que genera una influencia sobre el nodo de interés (nodo destino). Esto ha llevado a establecer que un nodo v_i genera una influencia sobre un nodo v_j , si y sólo si, existe un camino dirigido de longitud m del nodo v_i al nodo v_j . Por ende, dada la contribución interna de la dinámica nodal de un nodo v_j , éste genera un efecto sobre sí mismo, si y sólo sí, existe un camino dirigido de longitud m del nodo v_j al nodo v_j (condición suficiente para una estructura cíclica). En términos de estas consideraciones, la estructura de interrelación de un nodo j -ésimo de la red puede ser construida en base a una matriz φ . Cada entrada φ_{ijr} corresponde a la longitud de camino del i -ésimo nodo al j -ésimo nodo. Esto para toda posible trayectoria de camino dirigida r del nodo i -ésimo al nodo j -ésimo. El máximo número de trayectorias de camino dirigidas de un nodo i -ésimo a uno j -ésimo se denota por T_{jr} . Cada entrada φ_{ijr} debe satisfacer las siguientes condiciones: 1) una trayectoria de camino dirigida del nodo i -ésimo al j -ésimo es válida si y sólo si, cada nodo del recorrido es visitado una única vez. Sólo en trayectorias cíclicas, el nodo inicial es visitado dos veces. Esta es la única excepción. 2) La longitud de camino m del nodo v_i al v_j sigue las siguientes consideraciones: a) $m=dist(v_i,v_j)=\infty$ si no existe una trayectoria de camino dirigida del nodo v_i al nodo v_j . Es decir, el nodo v_i no genera una contribución de influencia sobre el nodo v_j . b) $m=dist(v_i,v_i)=0$ si no existe una trayectoria de camino dirigida del nodo v_i al nodo v_i . En caso contrario, deben tomarse en cuenta dos componentes de influencia: $m=dist(v_i,v_i)$ y $m=dist(v_i,v_i)=0$. Esto considera el hecho de que el nodo v_i genera un efecto sobre sí mismo; al propagarse su influencia a lo largo de la red, y retornar hacia sí mismo. c) $m=dist(v_i,v_j)$ si existe una trayectoria de camino abierta dirigida del nodo v_i al nodo v_j . En otras palabras, v_i genera una influencia sobre el nodo v_j . d) $m=dist(v_i,v_i)=1$ si existe un auto lazo del nodo v_i al nodo v_i . Bajo estas consideraciones, la matriz es descrita por (17).

La interpretación física de la matriz φ es la siguiente: la j -ésima columna de la matriz $\forall r$, contiene todas las contribuciones de influencia de los nodos de la red sobre el nodo v_j . Por su parte, la i -ésima fila de la matriz $\forall r$, corresponde a las contribuciones de influencia que el nodo v_i genera sobre la red. En este sentido, para trayectorias de camino abiertas del nodo v_i al nodo

v_j , el comportamiento dinámico de un j -ésimo nodo es en esencia un polinomio de funciones de transferencia $G(s)$ descrito por (18). Para el caso de estructuras cíclicas donde coexiste la simetría dinámica y la estructural, el comportamiento dinámico del j -ésimo nodo está dado por (19). Estos polinomios se estructuran en términos de las entradas de la matriz φ en su j -ésima columna.

$$\varphi_{ijr} = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \dots & \varphi_{1j} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \vdots & \varphi_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \varphi_{i1} & \varphi_{i2} & \dots & \varphi_{ij} \end{bmatrix}_{r=1} \dots \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \dots & \varphi_{1j} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \vdots & \varphi_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \varphi_{i1} & \varphi_{i2} & \dots & \varphi_{ij} \end{bmatrix}_{r=T_{jr}} \quad (17)$$

Donde $H(s)$ denota la entrada natural a cada uno de los nodos de la red. Por su parte, $k_{inr(m)}$ se asocia al número de caminos de longitud m para $m > 1$, que existen desde un nodo v_i a un nodo v_j . Así mismo, $\Omega_{(m+1)}$ corresponde al exponente de la $G(s)$ que se deriva del producto de las funciones de transferencia a lo largo de un camino de longitud m . Finalmente, $k_{in(m)}$ describe el número de caminos de longitud $m \leq 1$ que existen desde un nodo v_i a un nodo v_j . Estructuras de interrelación que presentan estructuras cíclicas y abiertas se definen en términos de la combinación de (18) y (19). Una sencilla manipulación de (19) muestra que una estructura cíclica es una condición de auto regulación del comportamiento de los nodos de una RC. Esto es, el comportamiento de un nodo genera un efecto sobre sí mismo.

$$X_{(j)}(s) = H(s) \left[k_{in(0)}G(s)^1 + k_{in(1)}G(s)^2 + \dots + k_{inr(m)}G(s)^{\Omega_{(m+1)}} \right] \quad (18)$$

$$X_{(j)}(s) = \frac{H(s) \left[k_{in(1)}G(s)^1 + k_{inr(2)}G(s)^2 + \dots + k_{inr(m)}G(s)^{\Omega_{(m)}} \right]}{1 - k_{inr(m)}G(s)^{\Omega_{(m)}}} \quad (19)$$

Los resultados indican, que una simetría estructural de interrelación $X_{(j)}(s)$ entre los nodos, da lugar a una simetría dinámica entre los mismos. La matriz φ permite analizar la simetría estructural de interrelación entre los nodos de la red. Dos factores definen la simetría estructural: el grado de entrada $k_{in(1)}$ y la longitud de camino m , a través del término $k_{inr(m)}$. Entonces, el análisis estructural de interrelación permite estimar la tendencia a que dos nodos de la red presenten un comportamiento simétrico. El conjunto formado por las trayectorias de influencia de longitud m sobre un nodo j se denota por T_j y está definido por (20).

$$T_j = \{x | x = \varphi_{ijr} \} \forall i, j = 1, 2, \dots, N, \text{ y } \forall r = 1, 2, \dots, T_{jr} \quad (20)$$

Por lo tanto, la formación de subconjuntos de trayectorias de influencia de longitud de camino m hacia el nodo j -ésimo, St_{jm} para toda posible trayectoria de influencia, es descrita por (21). Donde C_m denota al conjunto formado por la longitud de camino m de todas las posibles trayectorias de camino dirigido en la red.

$$St_{jm} = \{t_j | t_j \in T_j \forall t_j = m, m \in C_m, m \neq \infty \text{ y } \forall j = 1, 2, \dots, N\} \quad (21)$$

Entonces, sea R una relación de equivalencia sobre el conjunto St_{jm} , para cada elemento $x \in St_{jm}$.

$$[m] = \{x \in St_{jm} | x R m \forall m \in C_m, m \neq \infty \text{ y } \forall j = 1, 2, \dots, N\} \quad (22)$$

Por lo tanto, el conjunto de componentes de influencia asociado al j -ésimo nodo y longitud de camino m , está definido por (23). Siendo el conjunto de longitudes de camino efectivas $Cm_e = C_m \setminus \{\infty\}$. Esto es, las estradas ∞ de la matriz φ sólo indican que los nodos i, j no interactúan, por lo que su efecto es nulo. Es preciso mencionar que las componentes de influencia que conforman el comportamiento de un nodo j -ésimo, provienen de tres fuentes. La primera fuente corresponde a la dinámica nodal que proviene de una longitud de camino $m=0$. Es decir,

corresponde a su modelo interno (naturaleza propia). La segunda fuente de influencia corresponde a las estructuras de primer nivel, para $m=1$. En otras palabras, es la influencia asociada al grado de entrada y sus primeros vecinos. Finalmente, la tercer fuente de influencia corresponde a la de los nodos ubicados en otras regiones de la red, para $m>1$. En esta última puede incluirse la contribución asociada a estructuras cíclicas. En redes activas, esta es la menos significativa. Lo antes descrito es consistente en sistemas reales. Por ejemplo en el ser humano, donde las personas más cercanas generan la mayor influencia sobre él.

$$C_{I_{jm}} = \{ |S_{I_{jm}}| [m] \quad \forall m \in C_{m_e} \text{ y } j=1, 2, \dots, N \} \quad (23)$$

Por ende, el conjunto de componentes de influencia asociadas al j -ésimo nodo $\forall m \in C_{m_e}$ es descrito por (24).

$$C_{e_j} = \{ x | x \in C_{I_{jm}} \quad \forall j=1, 2, \dots, N \text{ y } \forall m \in C_{m_e} \} \quad (24)$$

En este contexto, una falla en la RC da lugar a un proceso de reorganización en el comportamiento de los nodos de la red en términos de su estructura de interrelación.

4.3. Detección de falla en la RC

En base a lo anterior, una falla en una RC se define como un cambio estructural que da origen a un cambio en la dinámica global de la red. Tres parámetros se ven modificados cuando ocurre una falla en una RC activa. Estos son: 1) el número de bandas de referencia, 2) el orden y la pertenencia de las componentes de banda, y 3) la simetría dinámica entre las mismas.

El estado de la red sin falla E_O es descrito por tres parámetros: 1) El número de bandas de referencia B_R que inducen las estructuras de primer nivel, 2) El orden y la pertenencia de las componentes de banda O_{CB} y 3) La simetría entre las componentes de banda E_S . Entonces, el estado óptimo posee un identificador constituido por estos tres parámetros $E_O = (B_R, O_{CB}, E_S)$. Una falla en la red (única o múltiple) produce cambios en la estructura de interrelación de cada nodo, entonces, el estado que la caracteriza es $CF_f = (B_{RF_f}, O_{CB_f}, E_{SF_f})$. Por su parte, el estado actual de la red lo define $E_A = (B_{RA}, O_{CBA}, E_{SA})$. Así mismo, el estado de falla de la red es $E_F = (B_{RF}, O_{CBF}, E_{SF})$. Puesto que una RC posee L aristas, el número posible de estados de falla f está dado por (25).

$$f = 2^L - 1 \quad (25)$$

Por lo tanto, para cada f -ésima falla, el estado característico de la misma es $C_{F(f)} = (B_{RF(f)}, O_{CBF(f)}, E_{SF(f)})$. Entonces, una falla existe si y sólo si, se satisface lo siguiente:

$$E_A = (B_{RA}, O_{CBA}, E_{SA}) \neq E_O = (B_R, O_{CB}, E_S)$$

Esto implica que para cada f -ésima falla, es necesario determinar el número de bandas de referencia que origina, el número y orden de las componentes de banda, y la simetría entre componentes de banda.

4.4. Estimación de las componentes de banda en una RC

Las componentes de banda son todos los comportamientos de los nodos que poseen en su estructura de interrelación una componente estructural con el mismo grado de entrada k^{in} para $m=1$. Entonces, si se toma el grado de entrada como referencia de la banda $B_{k^{in}}$, el conjunto de componentes de la banda $B_{k^{in}}$ se denota por $CB_{k^{in}}$ y se define por (26).

$$CB_{k^{in}} = \{ (x, j) | (x \in T_j) \text{ y } (x = k^{in}) \} \quad \forall j=1, \dots, N \text{ y } \forall k^{in} \in B \quad (26)$$

Entonces, el número de componentes por banda $NCB_{k^{in}}$ se tiene de lo siguiente:

$$NCB_{k^{in}} = |CB_{k^{in}}| \quad \forall k^{in} \in B \quad (27)$$

Se identifica la procedencia (vértice de origen) de cada componente de la banda $B_{k^{in}}$ con el índice j de (x, j) . El orden de las bandas de referencia lo determina la magnitud del término $k_{in(m=1)}$ de la componente estructural $C_{I_{j1}} = k_{in(1)}[1]$ de las componentes de banda. Es decir, la banda de referencia superior es aquella conformada por las componentes de banda que presentan el mayor grado de entrada $k_{in(m=1)}$ en su estructura de interrelación. La banda inferior está integrada por las componentes de banda que presentan el menor grado de entrada $k_{in(m=1)}$.

4.5. Algoritmo para determinar el orden de las componentes de banda

Determinar el orden de las componentes de banda O_{CB} implica analizar la simetría de las componentes estructurales de influencia de las componentes de banda a un primer nivel, segundo nivel, ..., m -ésimo nivel. Para este propósito se tiene el siguiente algoritmo: 1) determinar el conjunto de componentes de banda $CB_{k^{in}}$ y sus componentes estructurales de influencia $C_{I_{jm}}$. 2) Para $m>1$ encontrar la mínima longitud de camino m que rompe la simetría de las componentes estructurales de interrelación de las $NCB_{k^{in}}$ componentes de banda. 3) El término que rompe la simetría posee un grado relativo asociado $k_{inr(m)}$ para toda componente de banda. Entonces, la banda que posee el mayor $k_{inr(m)}$ será la banda superior. Para un orden $o | o=1, 2, \dots, NCB_{k^{in}}$. En este sentido, para la componente superior $o = NCB_{k^{in}}$. De la misma forma, la banda con menor $k_{inr(m)}$ será la inferior y por ende, su orden será $o=1$. Entonces, el conjunto que asocia a cada j -ésima componente de banda su respectivo orden, es (28).

$$OCB_{k^{in}}^o = \{ x | x \in o \quad \forall j, o=1, 2, \dots, NCB_{k^{in}} \} \quad (28)$$

Por convención, si todas las componentes de banda presentan simetría estructural completa y no pertenecen a un subgrupo, su orden está indefinido. Es decir $o=0$. Si dos componentes presentan simetría estructural completa y pertenecen a un subgrupo, estas toman el mismo orden, y se asigna de acuerdo al algoritmo. Un caso similar se tiene para componentes de banda que poseen un grado de entrada $k^{in}=0$. Bajo esta condición, son simétricas y su orden $o=0$. 4) Si existe un subgrupo de componentes de banda en las que persiste la simetría de componente estructural de influencia para el $k_{inr(m)}$, encontrar una nueva mínima m para este subgrupo de tal forma que se rompa la simetría. Entonces repetir paso 3). 5) Aplicar el procedimiento para cada conjunto de componentes de banda de referencia.

4.6. Análisis de simetría de las componentes de banda

El análisis de simetría E_S de las componentes de banda permite estimar la tendencia a que dos componentes de banda de la misma banda; presenten una simetría en sus componentes estructurales de influencia. Existen fallas en una RC que dan lugar al mismo número de bandas de referencia y orden de componentes de banda. Entonces, el grado de simetría entre las componentes de banda permite aislar dichas fallas. Sea el conjunto de componentes estructurales de influencia asociadas el j -ésimo nodo:

$$C_{e_j} = \{ x | x \in C_{I_{jm}} \quad \forall j=1, 2, \dots, N \text{ y } \forall m \in C_{m_e} \}.$$

La fracción efectiva de componentes estructurales para el análisis de simetría es definida por (29)

$$F_e C_{e_j} = \{ x | x \in C_{I_{jm}} \quad \forall j=1, 2, \dots, N \text{ y } \forall (m > 1) \in C_{m_e} \} \quad (29)$$

Esto considerando que la componente estructural de influencia asociada a la longitud de camino $m=1$, es común para todas las componentes de banda. Entonces, el grado de simetría estructural entre las componentes de banda $B_{k^{in}}$ se define por (30)

$$K_s CB_{k^{in}} = F_e C_{e_i} \cap F_e C_{e_j} \quad \forall i, j=1, 2, \dots, NCB_{k^{in}} \text{ e } (i \neq j) \quad (30)$$

Por ende, los pares de componentes de banda (i, j) que presentan el más alto grado $K_s CB_{k^{in}}$ tienden a exhibir una simetría en sus estructuras de interrelación. El más alto grado de simetría estructural que pueden exhibir dos o más componentes de una misma banda $K_{s_{max} B_{k^{in}}}$ es descrito por (31).

$$K_{s_{max} B_{k^{in}}} = \text{máxima} |F_e C_{e_j}|, \forall j=1, 2, \dots, NCB_{k^{in}} \text{ y } (k^{in} \in B) \quad (31)$$

4.7. Esquema propuesto

El esquema que se propone en este trabajo (Fig. 9) permite detectar y aislar fallas múltiples en una Red Compleja.

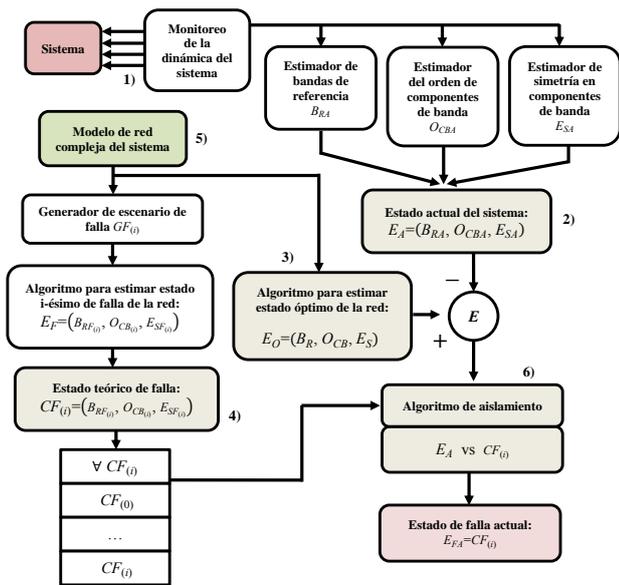


Figura 9: Esquema propuesto de detección y aislamiento de fallas en RC.

En esencia, tres factores sirven de base para estimar la magnitud de una falla en la red y su origen. Estos son: el número de bandas de referencia B_R , el orden de las componentes de banda O_{CB} y finalmente, el grado de simetría de las componentes de banda E_S . El esquema consta de seis elementos principales: 1) el módulo de monitoreo de la dinámica del sistema lo integra el hardware (sensores y acondicionamiento de señales) necesario para el sensado de las variables. 2) a partir de los datos experimentales que provienen del monitoreo del sistema, el módulo de estado actual del sistema, estima la condición de operación de la planta. Para ello, computa B_{RA} , O_{CBA} y E_{SA} . Se espera que bajo condición óptima de operación de la planta, el estado actual de la misma sea igual al estado óptimo que se deriva del modelo de RC del sistema. 3) El módulo que computa el algoritmo para obtener el estado óptimo de la red, parte del conocimiento del modelo de RC del sistema. En base a él, se obtiene el estado óptimo de operación E_O , el cual se estructura en términos de tres parámetros: B_R , O_{CB} y E_S . 4) El estado teórico de falla está constituido por la firma de falla $CF_{(i)}$ de cada uno de los posibles escenarios de falla (i) del modelo de RC del sistema. Dicho identificador (i) se obtiene a partir del análisis de la estructura del modelo de RC, al inducir (de forma teórica) cada una de las posibles (i) fallas. Cabe mencionar, que cada identificador está constituido por los parámetros: $B_{RF(i)}$, $O_{CB(i)}$ y $E_{SF(i)}$. 5) Por su parte, el

modelo de RC representa la estructura de interacción de los elementos del sistema, y describe así mismo su comportamiento. 6) Finalmente, el algoritmo de aislamiento se activa cuando existe una diferencia ($E \neq 0$) entre el E_O y E_A del sistema. En este sentido, el aislamiento consiste en determinar la firma de falla $CF_{(i)}$ que presenta los mismos parámetros que el E_A . Entonces, el estado actual de falla E_{FA} es aquél que satisface: $E_{FA}=CF_{(i)}$.

5. Caso de estudio: línea de proceso de enlatado (LPE)

La Fig. 10 presenta una línea de proceso de enlatado que sirve como caso de estudio. El sistema lleva a cabo tres etapas del proceso: 1) llenado de la lata, 2) colocación de tapa en la lata y 3) engargolado de la lata.

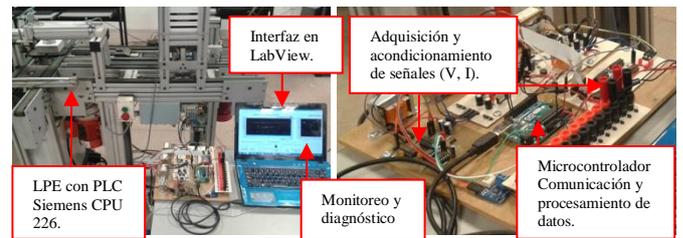


Figura 10: Sistema de Manufactura que corresponde a una línea de proceso de enlatado.

Desde el formalismo de redes complejas se modela la parte operativa de la LPE. Los esquemas que se presentan en la sección 3 y 4 se implementan en un sistema de monitoreo en línea y adquisición de señales, con el propósito de detectar y aislar fallas en la LPE. 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. Modelación de la parte operativa de la LPE e implementación de los esquemas de detección y aislamiento de fallas

En lo siguiente, se describe el modelado y la implementación del esquema basado en la observación de cambios abruptos, en la región del modelo de red que corresponde al sistema de electroválvulas de la línea de proceso de enlatado.

Dicho sistema consta de 13 elementos tipo on-off. Sin embargo, por cuestiones de espacio, en este trabajo se estudia un subconjunto (5 electroválvulas). El modelado que a continuación se describe, parte de tres consideraciones: la primera de ellas consiste en establecer que el modelo de red compleja está dirigido a describir la estructura y la dinámica de las i -ésimas electroválvulas que intervienen en el sistema bajo estudio. La segunda consideración implica, que la variable de estado de interrelación en el modelo de red, corresponde a la corriente de las electroválvulas. Esto es, la variable de estado a través de la cual interactúan entre sí las electroválvulas, corresponde a la corriente eléctrica. Finalmente, se parte de la idea de que la respuesta en corriente R_C de cada electroválvula es el resultado de la suma de la respuesta en aislamiento R_{CA} y la respuesta bajo interrelación R_{CI} ; como se describe en (32).

$$R_C = R_{CA} + R_{CI} \quad (32)$$

En este sentido, se aproxima el modelo de la electroválvula al sistema de la Fig. 11. El modelo dinámico dado en (33), describe el comportamiento de cada electroválvula y permite obtener la componente en aislamiento de su respuesta global. Donde x_1 denota la variable de estado de corriente, x_2 define el despla-

miento del vástago de la electroválvula y x_3 describe la velocidad de desplazamiento del mismo. Por su parte, K_v corresponde a la tensión inducida en el vástago y K_i es una contante que relaciona la corriente con la fuerza que induce. Los parámetros estimados para el modelo de las electroválvulas se muestran en la Tabla 1. La variabilidad de R y L considera el efecto de la temperatura y perturbaciones. Así mismo, la Fig. 12 presenta la respuesta en corriente x_1 (teórica y experimental) de una electroválvula.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{K_v}{L}[x_3] - \frac{R}{L}[x_1] + \frac{V_i(t)}{L} \\ \dot{x}_2 &= [x_3] \\ \dot{x}_3 &= -\frac{b}{M}[x_3] - \frac{K_r}{M}[x_2] + \frac{K_i}{M}[x_1] \end{aligned} \tag{33}$$

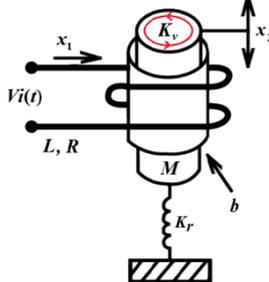


Figura 11: Sistema electromecánico de una electroválvula.

Tabla 1: Parámetros eléctricos y mecánicos de las electroválvulas.

Parámetros estimados		Fabricante SMC TM
Eléctricos y Mecánicos		Nominales
$V_i(t) = 24 \text{ Vcd}$	$K_v = 0.5 \text{ V/s}$	$P = 0.35 \text{ Watts}$
$R = 1540.93097 \ \Omega$	$P = 0.3738 \text{ Watts}$	$V_i(t) = 24 \text{ Vcd}$
$I = 15.575 \times 10^{-3} \text{ A}$	$M = 0.0090 \text{ Kg}$	Variabilidad: R y L de $\pm 6.255\%$
$L = 9.358 \text{ Henrios}$	$K_r = 2.365 \text{ N/m}$	
$K_i = 9.09 \text{ N/A}$	$b = 0.236 \text{ N/(m/s)}$	

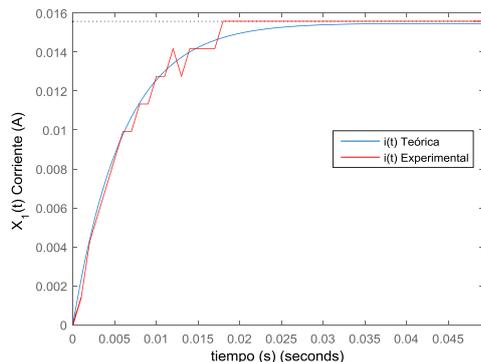


Figura 12: Comportamiento de corriente x_1 (teórica vs experimental) de una electroválvula.

Por su parte, la componente en interrelación surge al considerar la influencia que existe entre las electroválvulas del sistema eléctrico de la Fig. 13. Entonces, el modelo que describe la estructura de interacción entre las electroválvulas se determina considerando solamente los parámetros eléctricos de éstas en el sistema de la Fig. 13, dado que el modelo de respuesta en aislamiento ya incluye el efecto de la velocidad x_3 del vástago de la electroválvula en la respuesta de corriente. Por lo que la respuesta global de las electroválvulas se estructura agregando las componentes de interacción al modelo de respuesta en aislamiento, que no se encuentran en éste. De esta forma se estructura el modelo global de interrelación.

El modelo de red compleja del sistema eléctrico de la Fig. 13 presenta cinco nodos ($e = 1, 2, \dots, 5$). Cada uno de los mismos está asociado a la variable de estado de corriente de cada electro-

válvula ($x_e = i_e$). En este contexto, la respuesta de cada electroválvula en aislamiento es descrita por (34).

$$\dot{x}_{(e)}(t) = \frac{di_e}{dt} = \left[-\frac{R_e}{L_e} \right] [i_e(t)] + \left[\frac{V_i(t)}{L_e} \right] \quad \forall e \tag{34}$$

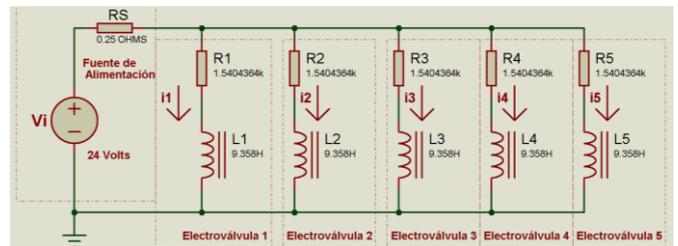


Figura 13: Sistema eléctrico de un subconjunto de electroválvulas de la LPE.

Por su parte, un análisis de la interrelación de las electroválvulas desde el aspecto de las variables de estado, permite verificar que la matriz de adyacencia G_{ej} es la que se muestra, con una matriz de pesos interrelación w_{ej} . Así como una matriz de acoplamiento interno $\Gamma = [1]$.

$$G_{ej} = [1] \quad \forall e, j = 1, 2, \dots, 5$$

$$w_{ej} = \left[-\frac{R_S}{L_e} \quad -\frac{R_S}{L_e} \quad -\frac{R_S}{L_e} \quad -\frac{R_S}{L_e} \quad -\frac{R_S}{L_e} \right] \quad \forall e = 1, 2, \dots, 5$$

Con base en lo anterior, la componente de interrelación CI_e para cada una de las electroválvulas (e) del sistema, es:

$$CI_e = \left[-\frac{R_S}{L_e} \right] i_1 + \left[-\frac{R_S}{L_e} \right] i_2 + \left[-\frac{R_S}{L_e} \right] i_3 + \left[-\frac{R_S}{L_e} \right] i_4 + \left[-\frac{R_S}{L_e} \right] i_5 \quad \forall e$$

Por ende, el modelo que describe la dinámica del sistema de la Fig. 13 y que considera la respuesta de las electroválvulas como la suma de la respuesta en aislamiento más la respuesta en interacción, es el siguiente:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(-\frac{R_1+R_S}{L_1}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_1}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_1}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_1}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_1}\right) \\ \left(-\frac{R_S}{L_2}\right) & \left(-\frac{R_2+R_S}{L_2}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_2}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_2}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_2}\right) \\ \left(-\frac{R_S}{L_3}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_3}\right) & \left(-\frac{R_3+R_S}{L_3}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_3}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_3}\right) \\ \left(-\frac{R_S}{L_4}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_4}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_4}\right) & \left(-\frac{R_4+R_S}{L_4}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_4}\right) \\ \left(-\frac{R_S}{L_5}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_5}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_5}\right) & \left(-\frac{R_S}{L_5}\right) & \left(-\frac{R_5+R_S}{L_5}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_i(t)}{L_1} \\ \frac{V_i(t)}{L_2} \\ \frac{V_i(t)}{L_3} \\ \frac{V_i(t)}{L_4} \\ \frac{V_i(t)}{L_5} \end{bmatrix}$$

Por lo que la $G(s)_e$ de cada nodo (i_e) de la red es:

$$G(s)_e = \frac{2.565s^4 + 1689s^3 + 4.17 \times 10^5 s^2 + 4.576 \times 10^7 s + 1.883 \times 10^9}{s^5 + 823.2s^4 + 2.711 \times 10^5 s^3 + 4.463 \times 10^7 s^2 + 3.674 \times 10^9 s + 1.21 \times 10^{11}}$$

De esto se tiene que el grado relativo r de la función de transferencia de cada nodo de la RC es: $r = 5 - 4 = 1$. Entonces, el modelo de RC que resulta para el sistema eléctrico de la Fig. 13 se presenta en la Fig. 14. Este modelo de red muestra que la estructura de interrelación de las electroválvulas corresponde a un grafo fuertemente conexo (estructuras de auto regulación), por lo cual un cambio en la variable de estado de corriente (i_e) de una electroválvula produce un efecto en todas las demás.

Por lo que el modelo de RC del sistema de electroválvulas que involucra los parámetros eléctricos y mecánicos, se obtiene al realizar una operación de unión (U) de la estructura de red de la Fig. 14 y Fig. 15, considerando que cada nodo i_e representa a un nodo x_1 en la subestructura de la Fig. 15. Como resultado, se obtiene la estructura de interrelación de la respuesta global de las electroválvulas. Véase Fig. 16. En este sentido, la estructura de interrelación del modelo de RC de la Fig. 14 muestra que ante la

falla de la electroválvula $e = 2$, una perturbación se propaga hacia los nodos i_1, i_3, i_4 e i_5 de la red; como se muestra en la Fig. 16. Entonces, la falla de $e = 2$ se modela como la falla simultánea de las aristas $(i_2, i_1), (i_2, i_2), (i_2, i_3), (i_2, i_4)$ e (i_2, i_5) , dado que es la forma en que interactúa con las otras electroválvulas. Cabe mencionar que el modelo de RC predice la existencia de un efecto sobre la propia electroválvula $e = 2$, tras la falla de la misma. Así mismo, muestra que la falla es detectable desde cualquiera de las electroválvulas funcionales.

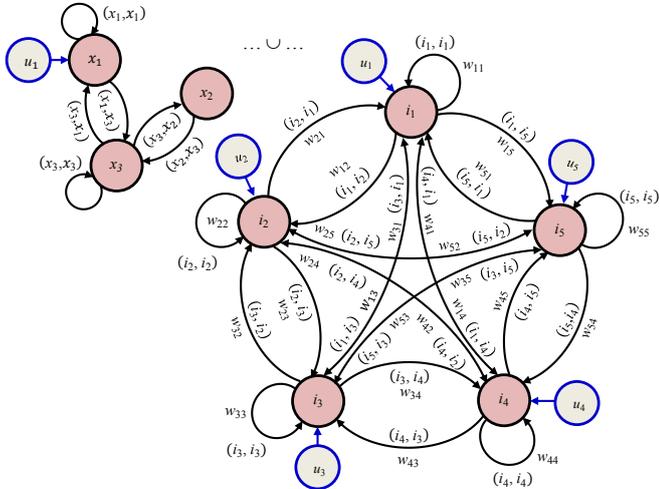


Figura 14: Modelo de RC que muestra la estructura de interrelación del sistema eléctrico de la Fig. 13.

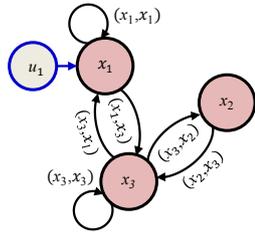


Figura 15: Modelo de RC del sistema electromecánico de una electroválvula en aislamiento.

6.1. Aislamiento de la falla

Asúmase que se tiene un conjunto de sensores $N_S = \{i_4, i_5\}$ y un escenario de falla en la electroválvula $e = 2$ que se muestra en el modelo de red compleja de la Fig. 16. El modelo predice que existe una trayectoria de camino dirigida desde el nodo i_2 a los nodos observables i_4 e i_5 , y por ende, es posible detectar la falla en la electroválvula i_2 desde los respectivos sensores. La trayectoria dirigida de mínima longitud que existe desde el nodo i_2 al nodo i_5 corresponde a la arista $\varepsilon = (i_2, i_5)$. Por su parte, la trayectoria de mínima longitud desde i_2 al nodo i_4 es la arista $\varepsilon = (i_2, i_4)$. Dado lo anterior, un análisis de detección de falla desde el nodo observable i_5 muestra lo siguiente: la arista en falla corresponde a $\bar{\varepsilon} = (i_2, i_5) = (i_j, i_i)$. Debido a que $i_i = i_p$, se tiene que $d = dist(i_i, i_p) = 0$. Por lo tanto, el modelo de detección de falla por cambios abruptos predice que el mínimo orden k , que permite detectar la falla en la electroválvula $e = 2$ desde la variable de estado de la electroválvula $e = 5$, es el siguiente:

$$k = r(d+1) = 1(0+1) = 1$$

Entonces, una falla en la electroválvula $e = 2$ es detectada a través de la presencia de un cambio abrupto en la primera derivada de la corriente i_5 asociada a la electroválvula $e = 5$. De la misma forma, un análisis en torno al nodo de observación i_4 permite verificar que una falla en la electroválvula $e = 2$ es detectada a través de un cambio abrupto en la primera derivada de la

corriente de la electroválvula $e = 4$. Dado que una falla en la e -ésima electroválvula implica la falla simultánea de las aristas del grado de salida de su respectivo nodo i_e , todos los nodos de observación detectan este suceso en la primera derivada de la variable i_e . Tal y como lo muestra la tabla de búsqueda D_e . Por lo tanto, tras la falla de una e -ésima electroválvula, el vector Vk es:

$$Vk = (k_1, \dots, k_4)^T = (1 \ 1 \ 1 \ 1)^T \quad \forall e$$

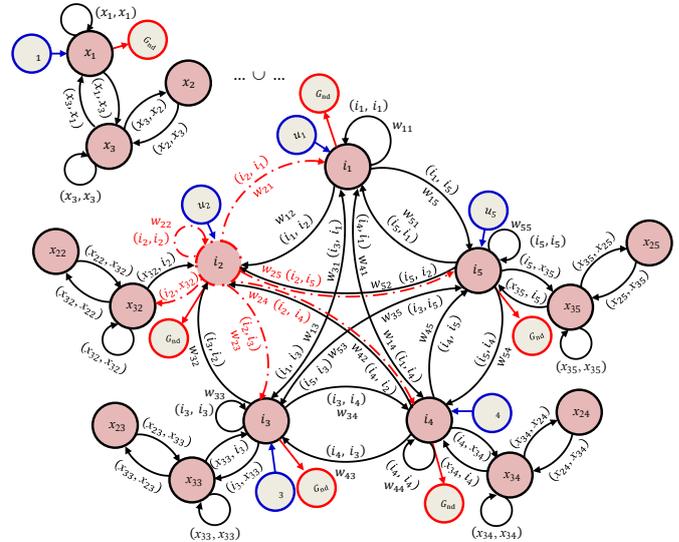


Figura 16: Modelo de RC que presenta un escenario de falla en i_2 ($e = 2$).

	$\varepsilon_{1,2}$	$\varepsilon_{1,3}$	$\varepsilon_{1,4}$	$\varepsilon_{1,5}$		$\varepsilon_{2,1}$	$\varepsilon_{2,3}$	$\varepsilon_{2,4}$	$\varepsilon_{2,5}$	
N_{S_2}	1	2	2	2	$D_1 = N_{S_3}$	N_{S_1}	1	2	2	2
N_{S_3}	2	1	2	2		N_{S_3}	2	1	2	2
N_{S_4}	2	2	1	2		N_{S_4}	2	2	1	2
N_{S_5}	2	2	2	1		N_{S_5}	2	2	2	1

a) Tabla de búsqueda para aislamiento de falla en $e = 1$.

b) Tabla de búsqueda para aislamiento de falla en $e = 2$.

	$\varepsilon_{3,1}$	$\varepsilon_{3,2}$	$\varepsilon_{3,4}$	$\varepsilon_{3,5}$		$\varepsilon_{4,1}$	$\varepsilon_{4,2}$	$\varepsilon_{4,3}$	$\varepsilon_{4,5}$	
N_{S_1}	1	2	2	2	$D_3 = N_{S_2}$	N_{S_1}	1	2	2	2
N_{S_2}	2	1	2	2		N_{S_2}	2	1	2	2
N_{S_4}	2	2	1	2		N_{S_3}	2	2	1	2
N_{S_5}	2	2	2	1		N_{S_5}	2	2	2	1

c) Tabla de búsqueda para aislamiento de falla en $e = 3$.

d) Tabla de búsqueda para aislamiento de falla en $e = 4$.

	$\varepsilon_{5,1}$	$\varepsilon_{5,2}$	$\varepsilon_{5,3}$	$\varepsilon_{5,4}$
N_{S_1}	1	2	2	2
N_{S_2}	2	1	2	2
N_{S_3}	2	2	1	2
N_{S_4}	2	2	2	1

e) Tabla de búsqueda para aislamiento de falla en $e = 5$.

Consecuentemente, el modelo predice que no es posible aislar la falla de una o múltiples electroválvulas del sistema. Sin embargo, es posible detectarla desde cualquier otra electroválvula funcional, en la primera derivada de su respectiva variable de estado. El motivo por el cual no es posible aislar la falla, se atribuye a la simetría estructural completa de interrelación que presenta el modelo de RC. Esta condición da lugar a una simetría dinámica completa de los nodos, por ende, todos se comportan de la misma forma. De esta manera, la perturbación producida por la falla se mapea a todos los nodos funcionales. La simulación del modelo de RC de la Fig. 14 se muestra en la Fig. 17. Se produce una falla en la $e = 2$, en $t_f = 3.6$ s. La perturbación producida por la falla se mapea a la dinámica de todos los nodos funcionales, y es detectada en la primera derivada de la variable de estado (i_e) de las electroválvulas.

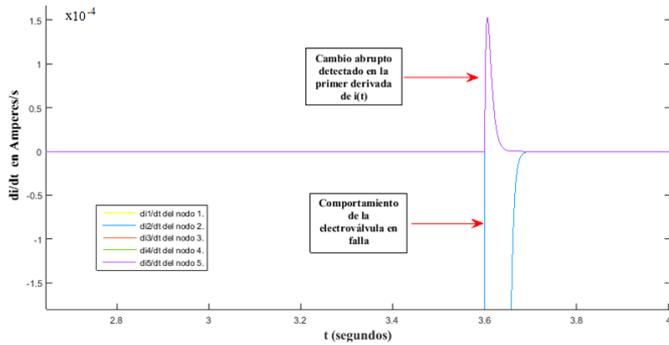


Figura 17: Detección (cambio abrupto) de la falla y su propagación en la estructura de interrelación del modelo de RC.

6.2. Resultados experimentales

Para validar las predicciones teóricas derivadas del modelo de RC del sistema de electroválvulas y del esquema antes descrito, dos pruebas fueron conducidas. En el primer ensayo se produjo una falla desconectando la electroválvula $e = 2$ de la LPE en $t_f = 3.6$ s. Entonces, se monitorea la dinámica de la corriente de $e = 5$. El resultado experimental se presenta en la Fig. 18.

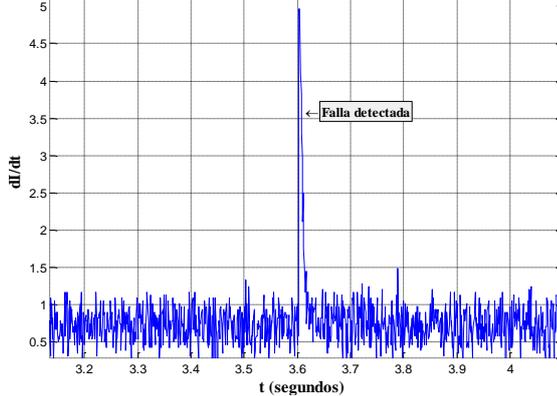


Figura 18: Comportamiento de la primera derivada de la corriente i_5 . Se observa la presencia del cambio abrupto en $t_f = 3.6$ s, el cual se relaciona a la presencia de la falla en la electroválvula i_2 .

Se condujo una segunda prueba, para ello se produjo una falla en $e = 2$ de la LPE en $t_f = 31.28$ s. El comportamiento de la primera derivada de la corriente i_4 ($e = 4$) se presenta en la Fig. 19.

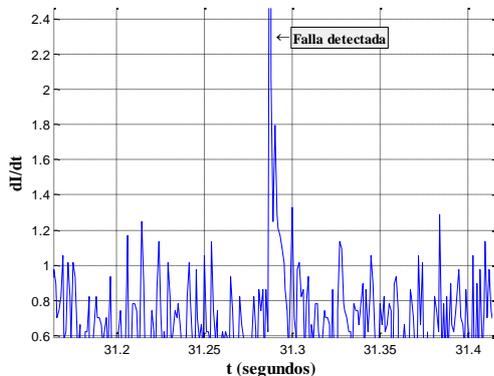


Figura 19: Comportamiento de la primera derivada de la corriente i_4 . Se observa la presencia del cambio abrupto en $t_f = 31.28$ s.

Los resultados teóricos y experimentales antes descritos presentan un alto grado de concordancia. El modelo de RC predice correctamente la forma de interacción de las electroválvulas y la manera en que se propaga una falla en el sistema. Los resultados indican, que en estructuras de red con alta simetría estructural, el aislamiento de la falla se dificulta, hasta el punto de no ser posible. Sin embargo, únicamente un nodo sensor es necesario,

para detectar la presencia de una falla en cualquiera de los nodos restantes de la red. Esto representa una ventaja importante, debido a la disminución significativa del número de sensores necesarios para detectar una falla en sistemas a gran escala.

6.3. Modelado y resultados experimentales derivados del esquema basado en la simetría estructural de interrelación y la dinámica no distinguible de una RC

Un fragmento del modelo de RC de la LPE se presenta en la Fig. 20. Los nodos medibles de la red son Q_i , I_i y el nodo Hub (presenta el mayor grado) G_{ND} .

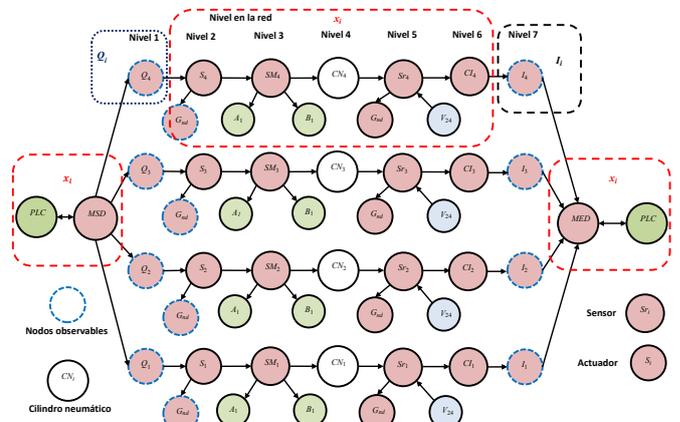


Figura 20: Fragmento del modelo de RC de la LPE.

Se modela la respuesta de la rama i -ésima de la red como un identificador I_i . Por su parte, la activación de la rama se modela como una entrada homogénea Q_i . Así mismo, la dinámica interna de cada rama y la respuesta de los nodos MSD , PLC y MED , es descrita como x_i , de la cual, sólo se conoce cierta información. Bajo estas consideraciones y el modelo de simetría dinámica y estructural, surge el modelo simplificado de red de la Fig. 21.

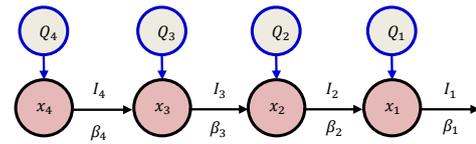


Figura 21: Fragmento del modelo de RC de la LPE.

El modelo de detección de falla en redes, basado en la simetría estructural y simetría dinámica, establece que el comportamiento de un nodo de la red, es la suma de su respuesta en aislamiento y bajo condición de interrelación. En términos de ello, β_i describe el comportamiento del nodo x_i y constituye la información de interrelación en la red. Por ende, estos capturan la dinámica de la red tanto en aislamiento, como en interrelación. Los β_i se estructuran en términos de las expresiones para trayectoria abierta y cerrada, que se proponen en el modelo de detección basado en la simetría estructural de interrelación y dinámica no distinguible. Entonces, los β_i para la red de la Fig. 21, son:

$$\beta_2 = Q_2 I_2 + Q_3 I_3 I_2 + Q_4 I_4 I_3 I_2 \quad \beta_4 = Q_4 I_4 \quad \beta_3 = Q_3 I_3 + Q_4 I_4 I_3$$

$$\beta_1 = Q_1 I_1 + Q_2 I_2 I_1 + Q_3 I_3 I_2 I_1 + Q_4 I_4 I_3 I_2 I_1$$

Puede observarse, que los β_i tienen una interpretación lógica y una estructural. En esencia, son polinomios cuyas variables poseen una dinámica binaria y homogénea. Es decir, representan una función booleana; que al ser evaluada, se evidencia que son simétricas desde el aspecto de la dinámica. No obstante, se diferencian en relación a la estructura de red que representan. Las componentes estructurales $Q_4 I_4$, $Q_3 I_3$, $Q_2 I_2$ y $Q_1 I_1$ corresponden a la respuesta en aislamiento; y las restantes, constituyen la respuesta bajo condición de interrelación. Es decir, para $m > 1$. El

identificador bajo condición óptima para el fragmento de red de la Fig. 21 es presentado en la Fig. 22 a), y se estructura en términos del concepto de bandas y componentes de banda.

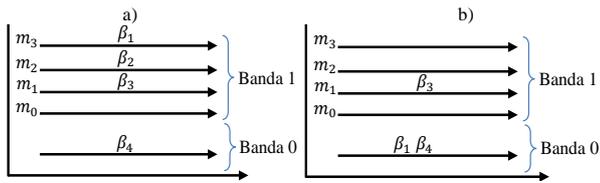


Figura 22: Bandas y componentes de banda de la RC de la Fig. 21.

Cuando un escenario de falla ocurre en el modelo de red de la Fig. 21, los β_i cambian. Físicamente significa que un nodo dejó de funcionar. Si se asume que una falla ocurre y $\beta_2 = 0$, el identificador que se construye en términos de las componentes estructurales, es el que se muestra en la Fig. 22 b). En este contexto, para cada falla existe un identificador específico que permite aislarla. La Fig. 23 presenta el resultado experimental derivado de la implementación del esquema antes descrito. Se detecta la falla de un actuador en la LPE tras la ejecución de un ciclo de proceso. La variabilidad del proceso mapea como error los cambios internos y la dinámica del actuador en falla de la LPE.

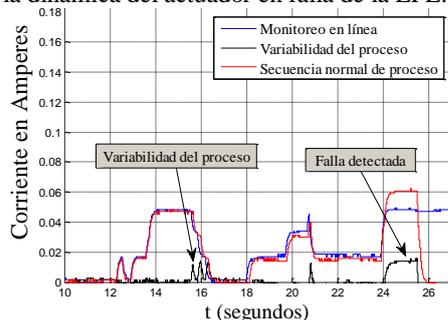


Figura 23: Detección de falla en un ciclo de proceso de la LPE.

7. Conclusiones

En este trabajo se presentó el estudio de la parte operativa de los Sistemas de Manufactura Flexible (SMF) desde el enfoque de la teoría de Redes Complejas, y se abordó la detección y aislamiento de fallas a partir de dos enfoques, los cuales se basan en la propagación de una no linealidad (cambio abrupto) en la estructura de la Red Compleja (RC) y la reorganización del comportamiento de los nodos de la red en términos de la estructura de interrelación. El estudio muestra evidencia de la presencia de fenómenos como simetría, organización y auto regulación; que surgen de la estructura de interrelación de una RC, los cuales pueden ser observados en sistemas reales de naturaleza biológica, social y tecnológica. Para la validación experimental de las predicciones teóricas derivadas de los esquemas, se diseñó en LabVIEW™ un sistema de monitoreo en línea y se construyó el hardware necesario para la adquisición y acondicionamiento de señales. El sistema se implementó en una Línea de Proceso de Enlatado (LPE). Se concluye que los resultados teóricos concuerdan con los experimentales. Como trabajo futuro se propone desarrollar técnicas de reconfiguración para evitar el paro de un proceso, ante la ocurrencia de una falla en los SMF.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT, con el número de becario 743557; y el TecNM/Instituto Tecnológico de Aguascalientes.

Referencias

Barabási, A-L. 2016. Network Science. Cambridge University Press. Cambridge U. K.

- Chakkor, S., Baghour, M., Hajraoui, A., 2014. Real time remote monitoring and fault detection in wind turbine. Int. Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering 8(9), 1670-1677.
- Chen, J., Patton, R. J., Zhang, H. Y., 1996. Design of unknown input observers and robust fault-detection filters. Int. J. Control 63(1), 85-105.
- Cowan, N. J., Chastain, E. J., Vilhena, D. A., Freudenberg, J. S., Bergstrom, C. T., 2012. Nodal dynamic, not degree distribution, determine the structural controllability of complex networks. PLOS ONE 7(6), 1-5.
- Diao, Y., Passino, K. M., 2002. Intelligent fault-tolerant control using adaptive and learning methods. Control Eng. Practice 10, 801-817.
- Ding, S. X., 2008. Model-based Fault Diagnosis Techniques. Springer-Verlag, Alemania.
- Frank, P. M., Wünnenberg, J., Tzafestas, S. G., Singh, M. G., Schmidt, F., 1987. Sensor fault detection via robust observers. Proc. Systems Fault Diagnostics, Reliab. Related Knowledge-Based Approaches 1, 147-160.
- Gentil, S., Montmain, J., Combastel, C., 2004. Combining FDI and AI approaches within causal-model-based diagnosis. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern. 34(5), 2207-2221.
- Gertler, J., 1997. Fault detection and isolation using parity relations. Control Eng. Practice 5(5), 653-661.
- Hanlon, P. D., Maybeck, P. S., 2000. Characterization of Kalman filter residuals in the presence of mismodeling. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 36(1), 114-131.
- Hwang, I., Kim, S., Kim, Y., Seah, C. E., 2010. A survey of fault detection, isolation, and reconfiguration methods. IEEE Transaction on Control Systems Technology 18(3), 636-653.
- Isermann, R., 1984. Process fault detection based on modeling and estimation methods: A survey. Automatica 20(4), 387-394.
- Kuo, C. H., Huang, H. P., 2000. Failure modeling and process monitoring for flexible manufacturing systems using colored timed Petri nets. IEEE Transactions on Robotics and Automation 16(3), 301-312.
- Lepuschitz, W., Jirkovsky, V., Kadera, P., Vrba, P., 2012. A multi-layer approach for failure detection in a manufacturing systems based on automation agents. 9th International Conference on Information Technology and New Generations 1, 1-6.
- Nguyen, D. T., Duong, Q. B., Zamai, E., Shahzad, M. K., 2014. Dynamic structure identification of Bayesian network model for fault diagnosis of FMS. 40th Annual Conf. IEEE Industrial Electronic Society 1, 119-125.
- Paoli, A., Sartini, M., Lafortune, S., 2011. Active fault tolerant control of discrete event systems using online diagnostics. Automatica 47(4), 639-649.
- Park, J. H., Halevi, Y., 1994. A new interpretation of the fault-detection filter 2: the optimal detection filter. Int. J. Control 60(5), 767-787.
- Patton, R. J., Chen, J., 1997. Observer-based fault detection and isolation: robustness and applications. Control Eng. Practice 5(5), 671-682.
- Rahimian, M. A., Preciado, V. M., 2015. Detection and isolation of failures in directed networks of LTI systems. IEEE Transaction on Control of Network Systems 2(2), 183-192.
- Rajaoarisoa, L., Sayed-Mouchaweh, M., 2017. Adaptive online fault diagnosis of manufacturing systems based on DEVS formalism. 20th World Congress of the International Federation of Automatic Control 1, 1-6.
- Ramírez-Treviño, A., Ruiz-Beltrán, E., Rivera-Rangel, I., López-Mellado, E., 2007. Online fault diagnosis of discrete event systems. A Petri net-based approach. IEEE Trans. on Autom., Science and Engineering 4(1), 31-39.
- Ramírez-Treviño, A., Ruiz-Beltrán, E., Arámburo-Lizarraga, J., López-Mellado, E., 2012. Structural diagnosability of DES and design of reduced Petri net diagnosers. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics A: Systems and Humans 42(2), 416-429.
- Reyes-Luévano, J., Ruiz-Beltrán, E., Castañeda-Ramos, L. A., Orozco-Mora, J. L., 2017. Structural analysis and fault detection on manufacturing systems: a complex network approach. IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC 2017) 1, 1-6.
- Shao, J., Buldyrev, S. V., Havlin, S., Stanley, H. E., 2011. Cascade of failures in coupled network systems with multiple support-dependence relations. Physical Review E 83, 61-69.
- Shiryayev, A. N., 1978. Optical Stopping Rules. Springer-Verlag, New York.
- Trutié-Carrero, Eduardo, Valdés-Santiago, Damian, León-Mecías, Ángela, Ramírez-Beltrán, Jorge, 2018. Detección y localización de ruptura súbita mediante transformada wavelet discreta y correlación cruzada. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial 15, 211-216.
- Weaver, W., 1948. Science and complexity. American Scientist 36, 536-544.
- Xianzhi, Z., Wen, S., 2010. Design and implementation of an embedded diagnosis systems for radar built-in test equipment. Int. Symposium Intelligence, Informatic, Processing and Trusted Computing 1, 173-176.
- Zhang, G., Liu, J., Li, D., 2013. An integrated model of eliminating early failures for flexible manufacturing systems. 4th International Conference on Digital Manufacturing and Automation 1, 165-170