

DIAGNÓSTICO DE FALLOS INTERMITENTES: UN ENFOQUE BASADO EN MODELOS DE EVENTOS DISCRETOS

Correcher, A., García, E., Morant, F., Quiles, E.

*Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad
Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46071 Valencia, (España)
E-mail: ancorsal@upvnet.upv.es, {egarciam, fmorant, equiles}@isa.upv.es*

Resumen: En el presente artículo se presenta una metodología para realizar el diagnóstico de fallos intermitentes que está basada en modelos de eventos discretos para sistemas dinámicos. Asimismo también se enuncian las condiciones que debe cumplir el sistema de diagnóstico de fallos para conseguir diagnosticar este tipo de fallos. Esta metodología incluye un sistema de adquisición de datos que se puede empotrar con el sistema de diagnóstico de modo que se pueda realizar una caracterización de los fallos intermitentes. Además, se realiza una recopilación de las diferentes metodologías y técnicas de diagnóstico de fallos intermitentes que se pueden encontrar en la literatura desde los años setenta en la que se intenta poner de manifiesto la importancia de la detección de este tipo de fallos así como el desarrollo de nuevas metodologías que incluyan el diagnóstico de intermitencias en componentes de procesos industriales. *Copyright © 2005 CEA-IFAC*

Palabras clave: Diagnóstico de fallos, procesos industriales, fallos intermitentes.

1. INTRODUCCIÓN

Los fallos que se pueden presentar en un sistema de producción automatizado pueden englobarse en una de estas categorías: fallos permanentes y fallos intermitentes (FIs).

Los fallos permanentes son fallos cuya recuperación debe realizarse de manera externa mediante la reparación o sustitución del componente dañado. El diagnóstico de este tipo de fallos ha sido estudiado en profundidad desde múltiples campos. Las principales técnicas que se emplean para realizar el diagnóstico (Puig et al., 2004) se pueden dividir según su punto de partida en: técnicas basadas en el análisis de señales, basadas en modelos o basadas en el conocimiento. Todo este tipo de metodologías y técnicas detectan y aíslan el fallo permanente pero no tienen en cuenta la recuperación del mismo.

Los FIs, eventualmente, pueden recuperarse por sí mismos, i.e., sus efectos sobre el sistema son los mismos que los de un fallo permanente, pero pueden desvanecerse merced a la propia dinámica del

proceso. Ejemplos de estos fallos son los atascamientos en tuberías que pueden recuperarse por la propia presión interna de la canalización.

La tarea de diagnosticar los FIs puede entenderse ampliando la definición dada en (Puig et al., 2004) para el diagnóstico de fallos permanentes.

*Definición 1 (Problema de diagnóstico de FIs):
A partir de una secuencia de entradas U y salidas Y obtenidas a partir de los sensores instalados en el proceso, determinar la presencia de un fallo f , así como su recuperación rf , del conjunto de fallos posibles F .*

En el presente trabajo se realizará una revisión del estado del arte del diagnóstico de los FIs a lo largo de las últimas décadas, incluyendo las aportaciones de los autores en el campo. Posteriormente se propondrá una metodología para realizar el diagnóstico de FIs mediante modelos de eventos discretos de los diferentes dispositivos del sistema. Asimismo, se desarrollará una técnica de adquisición de los

parámetros más importantes de los FIs empotrada dentro del sistema de diagnóstico de fallos.

2. APROXIMACIONES A LOS FIs

El diagnóstico de FIs es un tema poco estudiado de manera específica, si bien se han adoptado algunas soluciones para campos y aplicaciones concretas, tanto para sistemas estáticos como para dinámicos. En este apartado se exponen algunas técnicas, aproximaciones y estudios sobre FIs que, en opinión de los autores, resultan más útiles e ilustrativas para el enfoque de nuevas tesis de diagnóstico de FIs en procesos industriales, así como para subrayar la importancia que tiene el diagnóstico de FIs en todos los campos presentados.

Los campos donde se han adoptado más soluciones parciales son la electrónica digital, la ingeniería aeronáutica, la ingeniería de software y los procesos industriales.

2.1 *Electrónica digital*

En la segunda mitad de los años setenta comenzaron a diagnosticarse los circuitos digitales de cierta complejidad. En esa dirección Breuer y Friedman (1978) diseñaron una serie de técnicas de diagnóstico de fallos de los circuitos que incluían la detección de FIs. El método de diagnóstico de fallos empleado consistía en inyectar una serie de entradas conocidas (test) al circuito y comparar la salida con la de un patrón libre de fallos, de modo que se conseguía detectar el fallo así como su recuperación y realizar el diagnóstico de fallos (definición 1).

En 1978, Savir (Savir, 1978) amplió las técnicas de generación de patrones de entradas para diagnosticar FIs en circuitos secuenciales (dinámicos).

2.2 *Industria aeroespacial*

Otro campo en el que se ha estudiado y puesto de manifiesto la importancia de considerar FIs es la industria aeroespacial. Si bien no se han desarrollado métodos para diagnosticar FIs, estos se consideran como un caso especial de fallos. Ejemplos de aplicaciones específicas son (Anderson y Aylward, 1994) para la McDonnell Douglas y (Salvatore, et al., 1994) para la NASA. En esos artículos se presentan programas informáticos de diagnóstico de fallos, incluyendo FIs como casos especiales para aviones comerciales y misiones espaciales respectivamente.

2.3 *Ingeniería informática*

Otro gran campo de estudio de los FIs es la ingeniería informática. En esta disciplina los FIs por defectos de código o por fallos en la transmisión de señales son un gran campo de investigación. Como ejemplo, en (Tamma y Faught, 1998) se propuso un método de diagnóstico de fallos de software

incluyendo FIs. Merece la pena indicar que los FIs tal y como se consideran en este campo no son tales FIs. El defecto en el código es permanente, no obstante sus efectos, que se observan sólo en algunas condiciones específicas de funcionamiento (cuando se ejecute el código defectuoso o cuando se conjugue cierto valor de variables) son intermitentes.

En (Kandasamy et al., 2003) se presenta un método para evitar las consecuencias que tienen los FIs en sistemas de procesadores distribuidos. El artículo estudia las implicaciones que tendrá un fallo de procesado en alguna de las CPU distribuidas y desarrolla un método para que los problemas derivados sean resueltos sin interferir en el funcionamiento del resto de procesadores.

2.4 *Procesos industriales*

El campo de los procesos industriales ha sido poco explorado en este sentido. Se han implementado algunas soluciones específicas, aunque no se han desarrollado metodologías generales para el diagnóstico de FIs.

Sin duda, la aplicación industrial más estudiada en relación con los FIs es la de los contactos eléctricos. Así, en (Baisheng, 2001) se mostró que los FIs en líneas de transmisión de datos industriales pueden derivar en errores de código recibido en el receptor.

El fenómeno más estudiado en cuanto a FIs en contactos eléctricos es, sin duda, la denominada corrosión por vibración (fretting corrosion) (Antler, 1999). Se produce en los contactos cuando ocurren vibraciones, ya sean por causas mecánicas o por diferencias térmicas, que producen movimiento relativo entre los dos extremos del contacto. Este movimiento relativo hace que, en ocasiones, la resistencia del contacto se vea incrementada de forma sustancial y se produzca un FI (Maul, et al., 2000, 2002). Entre las conclusiones de (Maul, et al., 2000, 2002) destaca la afirmación de la existencia de fallos definitivos durante los experimentos.

En (Sorensen, et al., 1998) se subrayaba la necesidad de implementar mecanismos de detección de intermitencias, ya que el envejecimiento de los componentes conllevará la aparición de FIs como preludio de su fallo definitivo. El grupo de Sorensen defendía que es incorrecto asumir que los FIs se producen de manera constante o repetible. Una micro-rotura que provoque una apertura de circuito de corta duración, puede derivar fácilmente en un fallo más severo la próxima vez que aparezca.

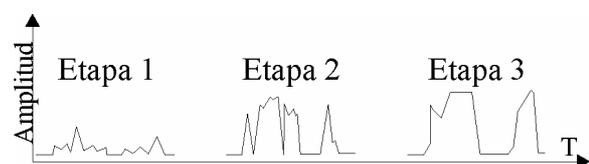


Figura 1. Evolución de los FIs por conexión a lo largo de la vida del componente.

La evolución de los fallos por conexión se muestra en la Figura. 1. Esta evolución ocurre cuando los FIs no se reparan y, en ese caso, su comportamiento va a peor. En la etapa inicial de vida de un FI (etapa 1), el fallo se observa como un pequeño ruido en la variable afectada (por ejemplo el voltaje). Cuando la amplitud y la duración de las fluctuaciones se ve incrementada (etapa 2), comienzan a sucederse fallos aleatorios en el sistema. Habitualmente, estos fallos aleatorios no pueden ser detectados por sistemas de diagnóstico de fallos convencionales hasta que se alcanza la etapa 3 o hasta que se convierten en fallos definitivos.

3. FIs Y SISTEMAS DE EVENTOS DISCRETOS

En los últimos años, la comunidad científica que estudia los sistemas de eventos discretos (SEDs) ha experimentado un creciente interés por desarrollar teorías generales de diagnóstico de FIs. Estas metodologías resultan aplicables tanto a sistemas continuos como discretos, ya que los SEDs pueden modelar cualquier sistema a cierto nivel de abstracción (García, 2000).

El trabajo de Constant (2002) desarrolla una metodología para realizar el diagnóstico de FIs, basada en modelos de eventos discretos, pero no tiene en cuenta las consideraciones dinámicas de los FIs que implican la evolución hacia fallos de carácter permanente.

En la misma línea Jiang (2003) presenta una serie de definiciones de diagnosticabilidad de fallos que ocurren de manera sucesiva en el sistema así como de las detecciones de sus respectivas recuperaciones.

4. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE DEL DIAGNÓSTICO DE FIs

La evolución del diagnóstico de FIs en procesos industriales implica asumir la hipótesis de que el suceso de fallos de naturaleza intermitente en un determinado dispositivo de un sistema automatizado, puede ser considerado como el preludeo de la ocurrencia de un fallo permanente. Esta hipótesis queda refrendada por los estudios del grupo de Sorensen sobre el envejecimiento de componentes electrónicos y, más recientemente, el grupo de Maul, McBride y Swinger en contactos eléctricos.

Las metodologías de carácter general orientadas para sistemas de eventos discretos que se han presentado no tienen en cuenta la realidad física de los FIs, no permitiendo la existencia de ciclos inobservables. Asimismo la dinámica del FI no se utiliza ni se detecta, sencillamente se limitan a diagnosticar la ocurrencia de un evento de fallo o uno de recuperación mediante las variables observadas en el sistema. Si bien esta aproximación resulta suficiente para diagnosticar los FIs (definición 1) queda pendiente el desarrollo de métodos de diagnóstico

que permitan la existencia de ciclos inobservables y el tratamiento posterior de las detecciones.

Así pues, el análisis de las aproximaciones al diagnóstico de FIs indica la falta de metodologías generales para su diagnóstico así como la falta de modelos que caractericen la evolución de los FIs a lo largo de la vida útil de cada componente. Se debería, pues, desarrollar una metodología de diagnóstico que tuviera en cuenta la naturaleza y evolución de los FIs. De este modo se deberían caracterizar los FIs detectados on-line en el proceso y compararlos con modelos históricos de los mismos fallos. Esta comparación es la base para realizar un mantenimiento preventivo de las instalaciones que tenga en cuenta el verdadero ciclo de vida del componente (Figura. 1).

5. METODOLOGÍA PARA REALIZAR EL DIAGNÓSTICO DE FIs

En el presente apartado se abordará la problemática de los FIs desde el punto de vista de los sistemas de eventos discretos. Así pues, partiendo de las tesis de Sampath (1995) y García (2000), se ampliarán las metodologías propuestas demostrando las limitaciones de ambas para el diagnóstico de FIs.

La metodología que se presenta puede implantarse dentro de una arquitectura como la que se muestra en la Figura. 2.

Un diagnosticador de FIs se dedica a monitorizar el proceso on-line, detectando los fallos mediante sus etiquetas. La construcción de este diagnosticador será desarrollada en el presente artículo. Las etiquetas que genera el diagnosticador sirven a un sistema de adquisición de datos (Correcher et al. 2004b) para caracterizar el FI.

Una vez se han definido las características del FI se puede determinar en qué etapa de vida se encuentra el FI (Figura. 1), de manera que un planificador pueda determinar el mejor momento para reparar o sustituir el componente defectuoso. Para ello es necesario realizar una serie de ensayos sobre los diferentes dispositivos de manera que se pueda conocer sus ciclos de vida. De este modo el planificador dispondrá de una referencia de comparación. Una vez realizada, se pueden decidir una serie de acciones correctoras.

6. EL DIAGNOSTICADOR

Supongamos que se dispone de un sistema en que se producen FIs. El sistema puede modelarse según la metodología de diagnóstico basada en modelos de eventos discretos (García, 2000) (Sampath, 1995) como:

$$G_G = (X_G, \mathbf{S}_G, \mathbf{d}_G, x_{0G}) \quad (6)$$

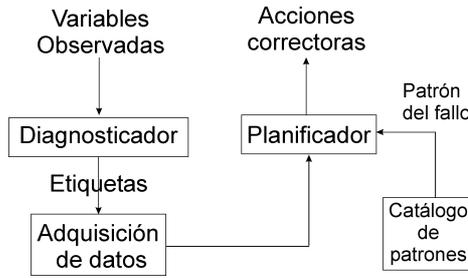


Figura 2. Arquitectura de diagnóstico de FIs

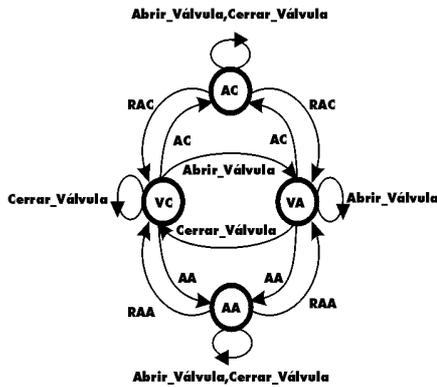


Figura 3. Modelo de válvula con capacidad de retorno a estados normales. Los estados y eventos significan: VC, VA: válvula cerrada, abierta; AC, AA: atascada cerrada, abierta; RAA, RAC: recuperación de atascamiento cerrado, abierto.

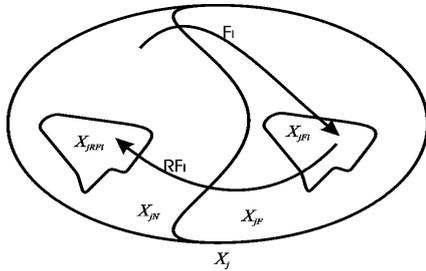


Figura 4. Evolución del sistema debido a transiciones inobservables de fallo y recuperación.

donde X_G es el espacio finito de estados, S_G es el conjunto de eventos, d_G es la función de transición, y x_{0G} es el estado inicial de G_G .

El modelo G_G es un autómata finito (Cassandras y Lafortune, 1999) que genera el lenguaje de eventos L , consistente en todas las cadenas de eventos (o trazas) válidas. Denotaremos por L^* el conjunto de todas las cadenas de eventos finitas pertenecientes a L . Se asumirá que el lector está familiarizado con los elementos y la notación de la teoría de autómatas (Cassandras y Lafortune, 1999).

El modelo de dicho sistema se puede obtener aplicando el operador de composición síncrona a los modelos individuales de los dispositivos (García, 2000) (Sampath, 1995). Por otro lado, el modelo de eventos del dispositivo j puede representarse por

medio del generador G_j . En la Figura. 3 se muestra un ejemplo de estos modelos de dispositivo.

$$G_j = (X_j, S_j, d_j, x_{0j}) \quad (7)$$

donde X_j, S_j, d_j, x_{0j} se interpretan de manera análoga a (6). Además se pueden definir sobre X_j los siguientes subconjuntos:

- X_{jF} : estados de fallo.
- X_{jFi} : subconjunto de X_{jF} con el fallo F_i .
- X_{jN} : estados de funcionamiento normal.
- X_{jRFi} : subconjunto de X_{jN} alcanzable desde un estado de X_{jFi} . Formalmente: $\{x \in X_{jRFi} \mid \exists x' \in X_{jFi}, a \in S_{rf} / d(x', a) = x\}$

Así como los eventos de fallo llevan al dispositivo a un funcionamiento en fallo, los de recuperación lo devuelven a su estado normal. En la Figura. 4 se ilustra este hecho, en ella, X_{jN} representa el conjunto de estados de funcionamiento normal, X_{jRFi} el conjunto de estados de funcionamiento en fallo y X_{jFi} el conjunto de estado de accesibles tras la recuperación.

Introduzcamos alguna notación adicional. El postlenguaje de $s \hat{I} L, L/s$, se define según (Sampath, 1995), i.e., $t \hat{I} L/s$ si $st \hat{I} L$. Definamos $Y(S_{fi})$ como el conjunto de trazas que acaban en s_{fi} , $Y(S_{fi}) := \{s \hat{I} L / P \mid s = s' s_{fi}, s' \hat{I} S^*, s_{fi} \hat{I} S_{fi}\}$. La longitud de una traza s será representada por $|s|$.

Para el modelo global o para cada uno de los subsistemas, se construye un diagnosticador siguiendo (Sampath, 1995). Un diagnosticador para el sistema G es una máquina de estados finita:

$$G_d = (Q_d, S_o, d_d, q_0) \quad (8)$$

donde Q_d, S_o, d_d y q_0 tienen la misma interpretación que en (6). Cada uno de los estados del diagnosticador está compuesto por una serie de estados del sistema original G y por una serie de etiquetas asociadas a los estados que clasifican las características de dicho estado. Cada estado indica todas las posibles trayectorias que se han podido seguir por el sistema original teniendo en cuenta las observaciones de las variables del sistema. Para ello se define el conjunto de etiquetas como:

$$D = \{N\} \hat{E} 2^{D_f} \quad (9)$$

Donde N se interpreta como "normal" y $D_f = \{F_1, F_2, \dots, F_m\}$ es el conjunto de etiquetas de fallo, donde $\frac{1}{2} P_j \neq m$, y donde $F_i, i \hat{I} \{1, \dots, m\}$ se interpreta como fallo del tipo i ha ocurrido.

Las etiquetas se asocian a cada uno de los estados del modelo, de modo que cuando aparecen en el diagnosticador indican la naturaleza del estado y son la herramienta para detectar fallos en el sistema. De ese modo un estado $q \hat{I} Q_d$ se dice que es Fi -cierto si la etiqueta Fi aparece asociada a todos los estados del sistema que están incluidos en q . En ese caso se

puede diagnosticar que el fallo Fi ha ocurrido. Por el contrario, se dice que un estado $q \hat{I} Q_d$ es Fi -incierto si Fi aparece asociada sólo en algunos estados de q . En ese caso existe una incertidumbre en la detección.

El estado inicial se considera siempre de funcionamiento normal, por lo que:

$$q_0 = \{x_0, N\} \quad (10)$$

A partir de este estado se van construyendo el resto de estados siguiendo la función de propagación de etiquetas (que será definida posteriormente), teniendo en cuenta la partición del espacio de eventos.

$$S = S_o \hat{E} S_{uo} \quad (11)$$

Donde S_o es el conjunto de eventos observables y S_{uo} es el conjunto de eventos inobservables. En la presente aproximación al diagnóstico de fallos, el espacio de eventos inobservables se podrá dividir en $S_{uo} = S_f \hat{E} S_{rf} \hat{E} S_{mto}$, i.e., eventos de fallo, eventos de recuperación de fallo y eventos inobservables que no pertenezcan a una de las otras dos categorías.

La función de proyección $P: S^* @ S_o^*$ se define de la manera habitual en la teoría de lenguajes (Sampath, 1995):

$$P(\mathcal{A}) = \mathcal{A};$$

$$P(s) = s \text{ si } s \hat{I} S_o$$

$$P(s) = \mathcal{A} \text{ si } s \hat{I} S_{uo}$$

$$P(ss) = P(s) P(s) \text{ si } s, s \hat{I} S_o^*$$

Los eventos de recuperación de fallo constituyen una novedad con respecto a la metodología original y su inclusión constituye el desarrollo de las nuevas herramientas de diagnóstico:

$$\begin{aligned} s \in \Sigma_{RF} &\Rightarrow \forall x, x' / x \in X_{RF}, x' \in X_{Fi} \\ \text{si } d(x', s') = x \text{ y } d(x', s) = x &\Rightarrow s = s' \end{aligned} \quad (12)$$

Se incluye en S_o al menos un indicador I para cada fallo en S_f :

$$(" s_{fi} \hat{I} S_f) (\$ I(s_{fi}) \hat{I} S_o) (\$ ni nj \hat{I} N) (" s \hat{I} Y(S_{fi})) (" t \hat{I} L/s)$$

$$\text{si } [(|t| > ni) \text{ y } (s_{rfi} \hat{I} t) (s_{rfi} \hat{I} S_{rf})] \mathcal{P} I(s_{fi}) \hat{I} t.$$

$$\text{y si } [(|t| < nj) \text{ y } (s_{rfi} \hat{I} t) (s_{rfi} \hat{I} S_{rf})] \mathcal{P} I(s_{fi}) \hat{I} t.$$

donde s_{rfi} es el evento de recuperación para el fallo i .

Así pues, los indicadores son eventos observables que ocurren cuando sucede un fallo pero no durante el funcionamiento normal. En éste artículo sólo se consideran sistemas que incluyan indicadores. Esta restricción resulta razonable puesto que si no existen indicadores para un fallo, entonces sus efectos no pueden ser observados, de ese modo, el diagnosticador no será capaz de diagnosticarlo. Además, los sistemas industriales incluyen a menudo

una gran cantidad de sensores, de modo que es razonable pensar que por lo menos uno de estos sensores será un indicador.

Proposición: Los lenguajes regulares con recuperación de fallos no son diagnosticables en el sentido de Sampath (1995).

Dem.: Un lenguaje de prefijo cerrado y vivo L se dice que es diagnosticable con respecto a una proyección P y a una partición de fallos P_{fi} de S_{fi} , en el sentido de Sampath (1995) si

$$(" i \hat{I} P_{fi}) (\$ ni \hat{I} N) (" s \hat{I} Y(S_{fi})) (" t \hat{I} L/s) / \text{si } (|t| > ni) \mathcal{P} w \hat{I} P^{-1}(P(st)) \mathcal{P} S_{fi} \hat{I} w.$$

Elijamos $c = s_1 s_2 s_3 \hat{I} L^*$, y $c' = s_1 s_{fi} s_2 s_{rfi} s_3 \hat{I} L^*$, tal que $P(c) = P(c')$. Entonces $c' = st$ con $s = s_1 f_i$ (así $s \hat{I} Y(S_{fi})$) y $t = s_2 r_{fi} s_3$, luego $c \hat{I} P^{-1}(P(c'))$ pero $S_{fi} \hat{I} c$.

C.Q.D.

Como los lenguajes con recuperaciones de fallo no son diagnosticables en el sentido de Sampath (1995), no se pueden construir diagnosticadores que garanticen estas nociones de diagnosticabilidad orientadas a fallos permanentes. Tal y como muestra la anterior proposición se necesitará un marco más amplio para realizar la detección de fallos en sistemas en los que éstos tengan características intermitentes, ya que de lo contrario, se corre el riesgo de no detectar el fallo.

Un elemento importante en la construcción del diagnosticador es la función de propagación de etiquetas (LP), que asigna a cada estado su etiqueta correspondiente, teniendo en cuenta la historia de eventos que ha tenido lugar en el sistema. Dicha función de propagación debe ampliarse con respecto a (Sampath, 1995), para tener en cuenta las posibles recuperaciones de los FIs. Introduzcamos algunas definiciones necesarias:

$L(G, x)$ se define como el conjunto de trazas pertenecientes a S^* que comienzan desde $x \hat{I} G$. Además, $L_o(G, x) := \{s \hat{I} L(G, x) / s = u s, u \hat{I} S_{uo}, s \hat{I} S_o\}$.

Definamos, también la función $G: S x S^* @ S^*$. Dado $e \hat{I} S, s \hat{I} S^*$, entonces $G_e(s) = t$:

$$(t = t'e) \text{ si } e \hat{I} s \text{ con } t' \hat{I} S^*, \text{ y } \neg s u \hat{I} s \text{ tal que } u = u'e, u' \hat{I} S^* / |u| > |t|$$

$$(t = \mathcal{A}) \text{ si } e \hat{I} s$$

Así pues, G extrae la traza más larga incluida en s que termina en un evento particular e . Si el evento no pertenece a la traza, entonces el resultado es $G_e(s) = \mathcal{A}$. Merece la pena apuntar que si $|G_a(s)| = |G_b(s)|$ entonces $a \hat{I} s$ y $b \hat{I} s$ o bien $a = b$. La demostración se desprende directamente de la definición de $G_e(s)$.

Definición: Función de propagación de etiquetas extendida. $ELP : X_0 \times \mathcal{D} \times \mathcal{S}^* \rightarrow \mathcal{D}$: Dado $x \in X_0, l \in \mathcal{I} \times \mathcal{D}$ y $s \in L_0(G, x)$ ELP propaga la etiqueta l sobre s , comenzando desde x y siguiendo la dinámica de G siguiendo $L(G, x)$. Se define como

$ELP(x, l, s)$:

$\{N\}$ si $\{l = \{N\}$ y $(\{ " i \ S_{Fi} \ \dot{\mathbf{I}} \ s \}$ o $\{ \text{si } \mathcal{S} \ S_{Fi} \ \dot{\mathbf{I}} \ s \ \mathcal{P} \ | \mathbf{G}_{S_{Fi}(s)} | < | \mathbf{G}_{S_{Fi}(s)} | \}$ o $\{ \text{si } Fi \ \dot{\mathbf{I}} \ \mathcal{P} \ | \mathbf{G}_{S_{Fi}(s)} | > | \mathbf{G}_{S_{Fi}(s)} | \}$ $\{Fi\}$ si $| \mathbf{G}_{S_{Fi}(s)} | \notin | \mathbf{G}_{S_{Fi}(s)} |$

Esta definición de la función de propagación de etiquetas implica que las cadenas con fallos entre estados adyacentes no se considerarán de fallo si la recuperación del fallo se produce antes de llegar el siguiente estado.

Una vez ampliada la función de propagación de etiquetas extendida se pueden emplear las mismas funciones de rango y de corrección de etiquetas definidas en (Sampath, 1995) para construir el diagnosticador por el mismo procedimiento, de modo que se genera un diagnosticador capacidad de detección del retorno a las situaciones de normalidad.

7. DIAGNOSTICABILIDAD

Las anteriores definiciones de la diagnosticabilidad (Sampath, 1995) no tienen en cuenta la realidad física de los FIs, así como los orígenes de los eventos en variables reales, por eso cuando se enuncian las diagnosticabilidades se elude la posibilidad de la existencia de ciclos inobservables de eventos de fallo y recuperación. En este artículo se propone una definición de diagnosticabilidad más relajada que permite la existencia de fallos no diagnosticados si no producen efectos negativos sobre el sistema.

7.1. FR-diagnosticabilidad.

Un lenguaje de prefijo cerrado y vivo, L , se define como FR-diagnosticable (fallo-recuperación diagnosticable) con respecto a una partición de fallos \mathcal{P}_{fi} y una proyección P si se cumple que

$(" i \ \dot{\mathbf{I}} \ \mathcal{P}_{fi}) (\mathcal{S} \ ni \ \dot{\mathbf{I}} \ \mathbf{N}) (" \ s \ \dot{\mathbf{I}} \ \mathbf{Y} (\mathcal{S}_{fi})) (" \ t \ \dot{\mathbf{I}} \ L/s / \mathcal{S}_{fi} \ \dot{\mathbf{I}} \ t) / \text{si } |t| > ni \ \mathcal{P} \ D$

D : si $w \ \dot{\mathbf{I}} \ P^{-1} (P(st)) \ \mathcal{P} \ \mathcal{S}_{fi} \ \dot{\mathbf{I}} \ w$ y $" \ u \ \dot{\mathbf{I}} \ w / u \ \dot{\mathbf{I}} \ \mathbf{Y} (\mathcal{S}_{fi}) \ \mathcal{S} \ u' \ \dot{\mathbf{I}} \ \mathbf{Y} (\mathcal{S}_{fi}) \ \mathcal{C} \ L/u / | \mathbf{G}_{S_{fi}(uu')} | > | \mathbf{G}_{S_{fi}(uu')} |$.

Estas condiciones de diagnosticabilidad implican que todas las cadenas que tengan la misma proyección que una de fallo sin recuperación posterior, contendrán el mismo evento de fallo. Si contienen una recuperación, nunca estará situada entre un fallo y el último evento observable. Asimismo, si se considera una traza lo suficientemente larga, ésta contendrá un indicador del fallo.

Esta definición de diagnosticabilidad excluye los fallos con recuperación que no provoquen la aparición de indicadores. Esta interpretación de la diagnosticabilidad se corresponde con la realidad

física de los dispositivos, ya que, en ocasiones, si la recuperación del fallo se produce lo suficientemente rápido, el dispositivo funcionará de manera normal, como si no hubiera ocurrido ningún fallo.

7.2. Ejemplo: Relé.

Mostremos la FR-diagnosticabilidad con un ejemplo. Supongamos que se quiere diagnosticar un dispositivo como el mostrado en la Figura. 5. Su modelo de eventos discretos se muestra en la Figura. 6. Los fallos considerados son los de atascamiento del relé en el estado de cierre y en el estado de apertura. Las causas de este tipo de fallos pueden consultarse en (Correcher et al., 2004a).

Cuando se produce un fallo de atascamiento en cerrado del relé (F_{cc}), la resistencia de los contactos permanece baja, la corriente no puede interrumpirse y la tensión en bornes del relé es cero. Esta situación es la misma que ocurre cuando se da la orden de cerrado del relé. De esta forma, un fallo que se produzca en estas circunstancias y se recupere antes de la apertura, no perjudica al funcionamiento del relé y, por lo tanto, no será considerado como tal.

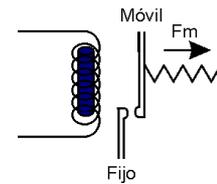


Figura. 5. Esquema físico de un relé NA.

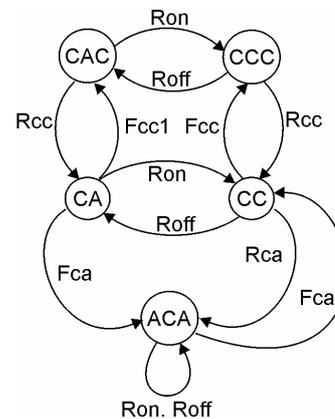


Figura. 6. Modelo de eventos del relé de la figura 5. El significado de cada uno de los eventos, así como de los estados se muestran en la tabla 1.

Supongamos que ocurre cualquiera de estas cuatro cadenas de eventos en el relé.

$C1 = \{Roff \ Ron\}$

$C2 = \{Roff \ Fca \ Rca \ Ron\}$

$C3 = \{Roff \ Ron \ Roff \ Fca \ Ron\}$

$C4 = \{Roff \ Fca \ Rca \ Ron \ Roff \ Fca \ Ron\}$

Al sistema de diagnóstico de fallos le llegarán, además, las lecturas sensoriales del relé y el resto de eventos de otros dispositivos. Supongamos que se

dispone de un sensor de corriente binario ($I(0)$, no pasa corriente; $I(+)$, pasa corriente). Este sensor es un indicador para los fallos Fca y Fcc ya que su valor cambiará si ocurre alguno de los fallos (y no hay recuperación). Construyamos un diagnosticador G_d para este subsistema y elijamos $s_1, s_2 \hat{I} S_G^*$, de modo que $Roff \hat{I} L/s_2 Ron \hat{I} L/s_1$. Así pues, el sistema global produce las trazas $CI_s, C2_s, C3_s$ y $C4_s$:

$Roff I(0) s_1 Ron I(+) s_2$
 $Roff I(0) s_1 Fca Rca Ron I(+) s_2$
 $Roff I(0) s_1 Ron I(+) s_2 Roff I(0) s_2 Fca Ron I(0) s_1$
 $Roff I(0) s_1 Fca Rca Ron I(+) s_2 Roff I(0) s_1 Fca Ron I(0) s_2$

No obstante, el diagnosticador sólo observa sus proyecciones, $PC1_s, PC2_s, PC3_s$ y $PC4_s$:

$Roff I(0) s_1 Ron I(+) s_2$
 $Roff I(0) s_1 Ron I(+) s_2$
 $Roff I(0) s_1 Ron I(+) s_2 Roff I(0) s_1 Ron I(0) s_2$
 $Roff I(0) s_1 Ron I(+) s_2 Roff I(0) s_1 Ron I(0) s_2$

Con esta sensorización, el diagnosticador será incapaz de distinguir las cadenas $PC1_s$ de $PC2_s$, a pesar de la ocurrencia del fallo en $PC2_s$. No obstante, el funcionamiento del relé es el mismo, la corriente fluye como si no hubiera ocurrido el fallo. La definición de FR -diagnosticabilidad permite que un sistema enmascare este tipo de situaciones y siga siendo diagnosticable, ya que el funcionamiento del dispositivo tras la recuperación será normal.

Fijémonos en las otras dos cadenas, $PC3_s$ y $PC4_s$. El diagnosticador recibe la misma proyección y, por lo tanto, emite el mismo diagnóstico, con la cadena final $I(0)s_2$ generará una etiqueta de fallo. Sin embargo, en $PC3_s$ sólo ha ocurrido un fallo y en $PC4_s$ han ocurrido 2. El sistema seguirá siendo FR -diagnosticable, ya que la recuperación del primer fallo en $PC4_s$ ocurre antes del evento observable $I(+)$, por lo tanto, se mantiene el funcionamiento normal de manera análoga al caso anterior.

Con este ejemplo se puede observar como la FR -diagnosticabilidad “filtra” todos los fallos que producen los mismos efectos sobre el sistema que una orden de control determinada si se producen de manera simultánea. Esta limitación del sistema de diagnóstico no resulta un problema para el funcionamiento normal del sistema, ya que la función del sistema de diagnóstico es detectar el funcionamiento anómalo del sistema y, en el caso que nos ocupa, el fallo no produce ningún efecto sobre el sistema a corto plazo.

7.3. Condiciones de FR -diagnosticabilidad.

En este apartado se enunciarán las condiciones que debe cumplir el diagnosticador de un determinado sistema para asegurar que es FR -diagnosticable.

Tabla 1: Estados del modelo del relé

Estado	Significado
CA	Circuito abierto
CC	Circuito cerrado
ACA	Atascado en circuito abierto
CAC	Cortocircuito, abrir circuito
CCC	Cortocircuito, cerrar circuito
Evento	Significado
Ron	Orden de apertura del relé
Roff	Orden de cerrado del relé
Fcc	Fallo de cortocircuito
Fca	Fallo de circuito abierto
Rcc	Recuperación del cortocircuito
Rca	Recuperación del circuito abierto
Fcc1	Fallo de cortocircuito por rotura del muelle

Introduzcamos los conceptos de ciclo y ciclo Fi -incierto en un autómata G (Sampath, 1995). Un conjunto de estados $x_1, \dots, x_n \hat{I} X$ forma un ciclo en G si $\mathcal{S} s \hat{I} L(G, x_i)$ tal que $s = s_1 \dots s_n$ y $\delta(x_i, s_i) = x_{(i+1) \text{ mod } n}$ $l=1, \dots, n$. Además, un conjunto de estados inciertos $q_1, \dots, q_n \hat{I} G_d$ (diagnosticador de G) se dice que forman un ciclo Fi -incierto si:

- 1) q_1, \dots, q_n forman un ciclo en G_d , con $d_d(q_i, s_i) = x_{(i+1) \text{ mod } n}$, donde $s_i \hat{I} S_o$, $l=1, \dots, n$.
- 2) $\mathcal{S} (x_b^k, l^k), (y_b^r, l^r) \hat{I} q_b$, $l=1, \dots, n$, $k=1, \dots, m$, $r=1, \dots, m'$ tales que " l, k, r $Fi \hat{I} l^k$ pero $Fi \hat{I} l^r$ y $\{x_b^k\}, \{y_b^r\}$ forman ciclos en G .

Teorema: Un lenguaje de prefijo cerrado y vivo L es FR -diagnosticable sii no existen ciclos Fi -incierto en G_d para ningún tipo de fallos.

Necesidad: Se demostrará por contradicción que si L es diagnosticable, entonces el diagnosticador no posee ciclos Fi -indeterminados.

Supongamos que existen una serie de estados $q_1, q_2, \dots, q_n \hat{I} Q_d$ que forman un ciclo indeterminado ($d_d(q_i, s_i) = q_{(i+1) \text{ mod } n}$) empezando desde $q_0 = (x_0, l_0)$ y $q'_0 = (y_0, l'_0)$, estados ciertos. De manera que $(x_b^k, l^k), (y_b^r, l^r) \hat{I} q_b$, $l=1, \dots, n$, $k=1, \dots, m$ y $r=1, \dots, m'$ forman el ciclo con $Fi \hat{I} l^k$ pero $Fi \hat{I} l^r$.

Por lo tanto:

$$\begin{aligned} d_d(x_l^k, s_l^k s_l) &= x_{(l+1)}^k, l=1, \dots, n-1, k=1, \dots, m \\ d_d(x_n^k, s_n^k s_n) &= x_1^{k+1}, k=1, \dots, m-1 \\ d_d(x_n^m, s_n^m s_n) &= x_1^1 \end{aligned} \quad (13)$$

Figura. 7. y

$$\begin{aligned} d_d(y_l^r, s_l^r s_l) &= y_{(l+1)}^r, l=1, \dots, n-1, k=1, \dots, m' \\ d_d(y_n^r, s_n^r s_n) &= y_1^{r+1}, r=1, \dots, m'-1 \\ d_d(y_n^{m'}, s_n^{m'} s_n) &= y_1^1 \end{aligned} \quad (14)$$

Como x^l_1 e $y^l_1 \hat{\mathbf{I}} q_1$, entonces (por construcción del diagnóstico) $\mathcal{S}_{s_0, s'_0} / \mathbf{d}(x_0, s_0) = x^l_1$ y $\mathbf{d}(y_0, s'_0) = y^l_1$ y, además, $(P(s_0) = P(s'_0))$. Como, además, $Fi \hat{\mathbf{I}} l^k_1$ pero $Fi \hat{\mathbf{I}} l^r_p$, entonces $\mathcal{S}_{fi} \hat{\mathbf{I}} s_0$ y $|\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(s_0)| < |\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(s'_0)|$ o $Fi \hat{\mathbf{I}} l_0$ y $|\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(s_0)| < |\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(s'_0)|$ y, por otra parte, $\hat{\mathbf{a}}_{\mathcal{S}_{fi}} \hat{\mathbf{I}} s'_0$ y $|\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(s'_0)| > |\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(s_0)|$ o, $Fi \hat{\mathbf{I}} l'_0$ y $|\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(s'_0)| > |\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(s_0)|$.

Figura. 8. Consideremos dos trazas, w y w'

$$w = s_0 (s_1^1 s_1 \dots s_n^1 s_n s_1^2 s_1 \dots s_n^m s_n)^{km'} \quad (15)$$

$$w' = s'_0 (s_1^1 s_1 \dots s_n^1 s_n s_1^2 s_1 \dots s_n^m s_n)^{km} \quad (16)$$

Para un k de longitud arbitraria. Entonces $P(w) = P(w') = P(s_0)P(s_1 \dots s_n)^{kmm'}$ y $\forall r, l \hat{\mathbf{a}}_{\mathcal{S}_{fi}} \hat{\mathbf{I}} s^r_l$ (o $|\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(s^r_l)| > |\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(s^k_l)|$) mientras que $\forall k, l \hat{\mathbf{a}}_{\mathcal{S}_{fi}} \hat{\mathbf{I}} s^k_l w$ (o $|\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(s^k_l)| > |\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(s^k_l)|$).

Elijamos $s \hat{\mathbf{I}} s_0$ tal que $s = \mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(w)$ y, también, $t \hat{\mathbf{I}} L/s$ tal que $w = st$. Si se elige k suficientemente largo, se puede conseguir que $|t| > n$, $n \hat{\mathbf{I}} N$. Así, $w' \hat{\mathbf{I}} P^{-1}P(st)$ y $\hat{\mathbf{a}}_{\mathcal{S}_{fi}} \hat{\mathbf{I}} w$ o $|\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(w')| > |\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(w)|$.

Por lo tanto, la cadena elegida s contradice la definición de FR -diagnosticabilidad para Fi , luego L no es diagnosticable.

C.Q.D.

Suficiencia: Se demostrará por contradicción que si el diagnosticador no posee ciclos Fi -indeterminados, entonces en lenguaje L es FR -diagnosticable.

Supongamos que el lenguaje L no cumple las condiciones de FR -diagnosticabilidad, entonces, $\mathcal{S} w$, $w' / w = s_0 t$, $w' = s_0 t' w' \hat{\mathbf{I}} P^{-1}(P(w))$ donde $s_0 \hat{\mathbf{I}} \mathbf{Y}(\mathcal{S}_{fi})$, $\mathcal{S}_{fi} \hat{\mathbf{I}} t$ y $(\mathcal{S}_{fi} \hat{\mathbf{I}} w' \text{ o } " u \hat{\mathbf{I}} w' / u \hat{\mathbf{I}} \mathbf{Y}(\mathcal{S}_{fi}) \emptyset \mathcal{S} u' \hat{\mathbf{I}} \mathbf{Y}(\mathcal{S}_{fi}) \mathcal{C} L / u / |\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(uu')| < |\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(uu')|$. Así pues, $|\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(uu')| > |\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(uu')|$. Elijamos w y w' de las ecuaciones (11) y (12) de modo que $P(w) = P(w') = P(s_0)P(s_1 \dots s_n)^{kmm'}$.

Construyamos el diagnosticador derivado de w y w' , suponiendo, sin pérdida de generalidad, que se parte de estados ciertos $q_0 = (x_0, l_0)$ y $q'_0 = (x'_0, l'_0)$. Como $P(s_0) = P(s'_0)$, entonces, $q_1 = ((\mathbf{d}(x_0, s_0), ELP(x_0, l_0, s_0)), (\mathbf{d}(x'_0, s'_0), ELP(x'_0, l'_0, s'_0)))$.

Figura. 9.

Entonces $\mathbf{d}(x_0, s_0) = x^l_1$ y $ELP(x_0, l_0, s_0) = Fi$ (ya que $s_0 \hat{\mathbf{I}} \mathbf{Y}(\mathcal{S}_{fi})$) y donde $\mathbf{d}(x'_0, s'_0) = y^l_1$ y $ELP(x'_0, l'_0, s'_0) = l^l_1$, con $Fi \hat{\mathbf{I}} l^l_1$. Luego $q_1 = \{(x^l_1, Fi), (y^l_1, l^l_1)\}$, i.e., un estado indeterminado. Los siguientes estados, $q_2 \dots q_n$ se alcanzan siguiendo las ecuaciones (13) y (14) para los estados, formando un bucle de manera análoga a la demostración anterior. Por otro lado, las etiquetas se asignan mediante ELP .

$$ELP(x^k_p, s^k_p \mathbf{s}_p, l^k_p) = Fi, p = 1, \dots, n-1, k = 1, \dots, m$$

$$ELP(x^k_n, s^k_n \mathbf{s}_n, l^k_n) = Fi, k = 1, \dots, m-1$$

$ELP(x^m_n, s^m_n \mathbf{s}_n, l^m_n) = Fi$, ya que no hay recuperación en w por hipótesis, además

$$ELP(y^r_p, s^r_p \mathbf{s}_p, l^r_p) = l^r_{p+1}, p = 1, \dots, n-1, k = 1, \dots, m'$$

$$ELP(y^r_n, s^r_n \mathbf{s}_n, l^r_n) = l^r_{n+1}, k = 1, \dots, m'-1$$

$$ELP(y^m_n, s^m_n \mathbf{s}_n, l^m_n) = l^m_1$$

Figura. 10. teniendo en cuenta que $Fi \hat{\mathbf{I}} l^r_p$ ya que $|\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(s^r_p)| > |\mathcal{G}_{\mathcal{S}_{fi}}(s^r_p)|$, el bucle de formado resulta indeterminado, contradiciendo las hipótesis de partida.

C.Q.D.

8. ADQUISICIÓN DE DATOS DE FIs

En las secciones previas se ha demostrado que el diagnóstico de FIs resulta muy beneficioso para los sistemas de producción industriales. El principal beneficio que se puede conseguir es una mejor planificación del mantenimiento de los equipos de la instalación, de manera que los componentes que sufren FIs no deben ser sustituidos inmediatamente cuando fallen (siempre que su funcionamiento en fallo no resulte especialmente crítico para el funcionamiento del sistema o ponga en peligro la seguridad de las personas y/o las instalaciones), sino cuando les quede poca vida útil. La determinación del estado de cada componente se puede realizar comparando la evolución de los fallos en el dispositivo con un modelo de modo de fallo (MMF) del mismo realizado previamente.

Para conseguir estas ventajas se hace necesaria, no sólo la detección de los FIs, sino la determinación de la evolución de los fallos y de sus parámetros característicos (Correcher et al., 2004b). Para ello, los diagnosticadores diseñados según la metodología del apartado anterior deben tener unos módulos de apoyo. En el presente apartado se presenta la adquisición de datos mediante diagnosticadores extendidos (DE). Asimismo, con objeto de clarificar el funcionamiento de éstos DEs, se hará una interpretación de los mismos mediante Redes de Petri (RdP) (David y Alla, 1992).

La decisión fundamental que se debe tomar una vez se ha determinado la ocurrencia del fallo es la necesidad de la sustitución del componente que ha producido dicha situación. Cuando el fallo tiene carácter permanente la única solución posible es la sustitución o reparación del dispositivo. Si el fallo es intermitente, entonces la recuperación se producirá de manera automática, por lo tanto no será necesaria ninguna de las soluciones anteriores. No obstante, el funcionamiento de dicho componente irá a peor, incrementando la duración del fallo a medida que disminuye el tiempo en que funciona correctamente.

Teniendo en cuenta estas consideraciones parece razonable disponer de una serie de parámetros que caractericen el FI y que permitan al operador tomar la decisión de sustituir el dispositivo en el momento en que sus fallos repercutan de manera severa al funcionamiento global del sistema. Además, si se dispusiera de ensayos de los diferentes componentes, una vez detectado el FI se podría extrapolar cuándo

va a tener lugar ese momento, permitiendo, de ese modo, planificar el mantenimiento de las instalaciones a corto o medio plazo.

Los diagnosticadores extendidos (que se explicarán en la sección siguiente) pueden determinar el momento en que se detecta el fallo, su duración y el número de fallos que han ocurrido hasta el momento, de ese modo, se puede generar una estructura como:

$$\begin{bmatrix} T_{1Fi} & IT_{1Fi} \\ T_{2Fi} & IT_{2Fi} \\ \dots & \dots \\ T_{CNTFi} & IT_{CNTFi} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Donde T_{iFi} es el tiempo que el fallo i ha estado activo, IT_{jFi} es el instante en que el fallo fue detectado por j -ésima vez, CNT es el número total de veces que ha ocurrido el fallo i .

Con esta información se deben construir dos tipos de parámetros. Unos deben caracterizar la evolución temporal del componente y otros deben servir como herramientas de decisión para la reparación o reemplazo del componente. Se puede emplear, por ejemplo, la densidad de fallos temporal (DF_{Tj}) que define como el tiempo que el dispositivo ha estado en fallo de tipo Fj durante una ventana deslizante de duración T . Por lo tanto si definimos el instante actual como H , el instante desde donde se calcula la densidad temporal será $H-T$. Este parámetro se puede calcular a partir de (17) como:

$$DF_{Tj} = \frac{\sum_{i=k}^{CNT} (T_{(i)Fj}) + T_A}{T} \quad (18)$$

donde k hace referencia a la primera detección dentro de la ventana ($\{k: IT_{kFj} > H-T\}$ si existe, sino $k=CNT+1$) y T_A es el tiempo de ajuste que suma el tiempo que un fallo que se haya iniciado antes de la ventana pero siga activo dentro de ella. Por lo tanto:

$$T_A = IT_{(k-1)Fj} + T_{(k-1)Fj} - (H - T) \quad (19)$$

La ecuación (19) será válida si su resultado es positivo, en cualquier otro caso $T_A=0$, puesto que ese resultado indica que el último fallo se encontraba completamente fuera de la ventana. La ventana debe elegirse de modo que la densidad sea creciente mientras el fallo es intermitente, de ese modo se puede observar el comportamiento crónico del FI.

En la Fig. 7 se muestra una simulación del cálculo de la densidad temporal en una ventana deslizante de 50 horas de un FI. El fallo se ha simulado asumiendo que sigue una distribución de probabilidad de Rayleigh (Leemis, 1995) ya que esta implica una tasa de fallos creciente. Se han simulado 25 componentes asumiendo que tras las 900 horas de funcionamiento el fallo será permanente. En esta figura se puede observar la media de la densidad temporal de los 25 componentes ensayados así como

dos bandas de confianza del 98 % (superior e inferior). Este parámetro genera información útil ya que en su gráfica se observa la progresiva degradación del componente. Además, si se desconoce el número de horas que el componente que se está diagnosticando ha estado en servicio y se dispone de datos de ensayos previos con los que construir una gráfica como la de la Fig. 8, será posible determinar con una confianza del 98% el rango de operaciones que lleva trabajado el dispositivo. Esto puede ser especialmente útil para el mantenimiento del dispositivo si se ha utilizado algún repuesto o no se ha realizado un diagnóstico previo, ya que puede indicar el número de horas que le restan en servicio.

Así, por ejemplo, si se calcula on-line una densidad de fallos de 0.04 para un dispositivo de la familia de los ensayados en la Fig. 8, se puede deducir con un 98% de confianza que ha estado trabajando entre 400 y 500 horas (aproximadamente) y, por lo tanto está a mitad de su vida útil.

No obstante, en ocasiones lo que interesa saber para realizar un mantenimiento preventivo es lo que ocurrirá en el futuro con un dispositivo que actualmente falla, de modo que se pueda evaluar si compensa disponer del componente en comportamiento intermitente o es necesario cambiarlo.

En el presente artículo se propone emplear parámetros como el porcentaje de horas sobre el total que el dispositivo funcionará correctamente, el porcentaje que lo hará en fallo o similares. Estos parámetros deben calcularse de atrás hacia delante, i.e., disponer de los ensayos del componente e ir calculando desde el final de la muestra cuáles son los porcentajes.

Si se dispone de esos datos se puede realizar un análisis cruzado entre la densidad y estos otros parámetros que puede ayudar en la toma de decisiones como se muestra en la Fig. 8. En ella se muestran los resultados de un ensayo de 50 componentes con fallos que siguen una distribución de Rayleigh.

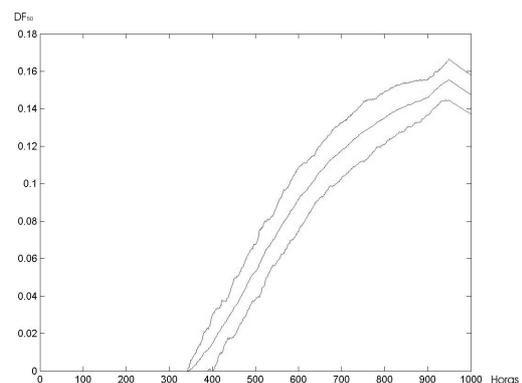


Figura. 11. Densidad temporal en una ventana deslizante de dimensión 50 horas.

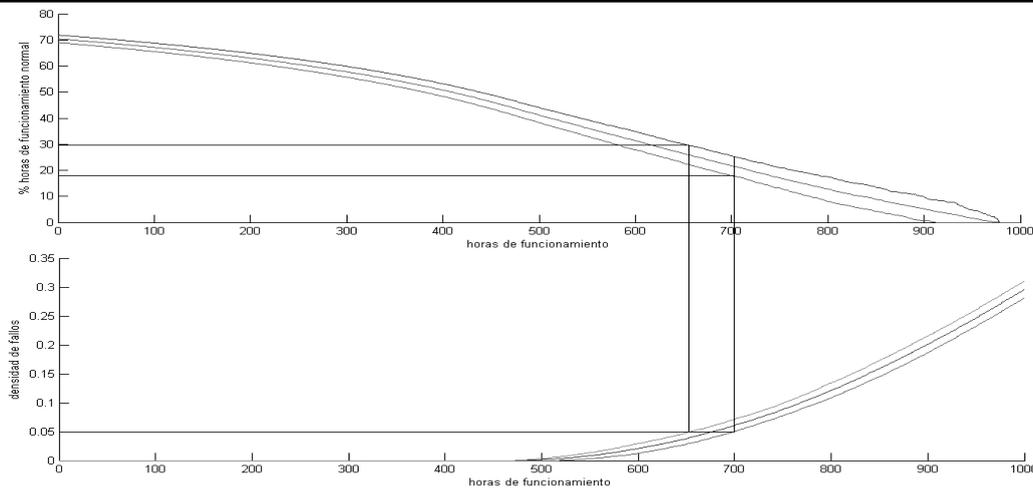


Figura. 12. Extrapolación de características del FI

En la parte de debajo de la figura se muestra la densidad de fallos con una ventana de 200 horas y en la parte de arriba de porcentaje de horas de funcionamiento normal que le restan al componente. Para ambos parámetros se han calculado bandas de confianza del 98% que se encuentran representadas a ambos lados de las medias para cada parámetro.

Mediante el uso de figuras como la 8, se pueden realizar una serie de análisis una vez medido el fallo de un componente de la familia de los ensayados. Por ejemplo, si se calcula una densidad de 0.05, se puede extrapolar un rango de horas de funcionamiento, trasladando dicho rango a la figura superior se puede deducir que al dispositivo le queda entre un 18% y un 30% de horas de funcionamiento normal.

Así pues, será necesario disponer de información histórica del fallo para poder generar estas curvas características de cada dispositivo. En el caso en que no se disponga de ellas, el sistema de ayuda a la toma de decisiones será menos potente, no obstante, a medida que se vayan sucediendo los fallos en las instalaciones, los datos adquiridos deben ser procesados de modo que se puedan construir estos MMFs de forma automática. Así pues, cuanto más tiempo esté en funcionamiento el sistema de diagnóstico de fallos, más completo será el catálogo de MMF y mejor será el asesoramiento al operador.

No obstante, para poder calcular los parámetros indicados anteriormente, se necesita que el sistema de diagnóstico de fallos sea capaz, no sólo de detectar la ocurrencia del fallo, sino de medir las características temporales del mismo.

Para la adquisición de datos se hará uso del lenguaje de etiquetas que genera el diagnosticador, ya que éste incluye la información relativa a la detección de fallos que realiza el sistema de diagnóstico. Básicamente, cada estado del diagnosticador contiene una etiqueta que indica el funcionamiento del sistema. Esta etiqueta puede ser de funcionamiento normal (N) o de funcionamiento en fallo (Fi).

Además se pueden generar etiquetas para la detección de fallos múltiples (ej: $FIF2$). El sistema de adquisición hará uso tanto de lo que detecta el diagnosticador como de lo que no detecta, i.e., las etiquetas que pertenecen al estado y las que no pertenecen. De este modo, el evento $/Fi$ será empleado para determinar cuando el fallo i no ha sido detectado, y la etiqueta $/N$, para determinar que el sistema no está en funcionamiento normal.

8.1. Diagnosticadores extendidos.

El enfoque que se presenta en el presente artículo para la adquisición de tiempos consiste en diseñar la adquisición de datos integrada con el propio diagnosticador. Para ello se seguirá la política de considerar prioritaria la última detección, i.e., ante un estado indeterminado se considerará que se continúa con la última detección (normal o de fallo). La generación de diagnosticadores extendidos se realiza mediante la función de extensión de estados, $SEF(q)$.

Definición: Función de extensión de estados. $SEF: Q_d @ Q_{dext}$ (donde Q_d es el espacio de estados del diagnosticador y $Q_{dext} \hat{=} Q_d \times Tx \hat{=} N$ es el espacio de estados del diagnosticador extendido, donde T es un conjunto de temporizadores asociados a cada estado), se define como:

Sea $q \hat{=} Q_d / q = \{(x_1, l_1), \dots, (x_n, l_n)\}$ y sea $q_{ext} \hat{=} Q_{dext} / SEF(q) = q_{ext}$, entonces:

- Si $si \hat{=} N / N \hat{=} l_i, (x_i, l_i) \hat{=} q$ y $"j, k \hat{=} N, F_j \hat{=} l_k$, con $(x_k, l_k) \hat{=} q \hat{=} P q_{ext} = \{(x_1, l_1), \dots, (x_n, l_n), T_N, N_N\}$, además $n=1$. Donde T_N, N_N , son, respectivamente, el temporizador de funcionamiento normal y el contador de veces que se vuelve a llegar a funcionamiento normal.
- Si $si \hat{=} N / N \hat{=} l_i, (x_i, l_i) \hat{=} q$ y $sj, k \hat{=} N, F_j \hat{=} l_k$, con $(x_k, l_k) \hat{=} q \hat{=} P q_{ext} = \{(x_1, l_1), \dots, (x_n, l_n), T_{x1/x2.../xn}\}$. Donde $T_{x1/x2.../xn}$ es el temporizador de estancia en el estado.
- Si $os \hat{=} N / N \hat{=} l_i, (x_i, l_i) \hat{=} q$ y $S M = (j_0 \dots j_m) \hat{=} N$, $K = (k_0 \dots k_m) \hat{=} N / " F_j, con j \hat{=} M, S l_k / F_j \hat{=} l_k$, con $k \hat{=} K$ y $(x_k, l_k) \hat{=} q \hat{=} P q_{ext} = \{(x_1, l_1), \dots, (x_n, l_n), (T_{j_0}, N_{j_0}), \dots, (T_{j_m}, N_{j_m})\}$. Donde T_{j_0}, N_{j_0} hacen referencia al

temporizador del fallo $j0$ y a su contador de ocurrencias, respectivamente.

Por lo tanto, se definen los diagnosticadores extendidos como:

$$G_{dext} = (Q_{dext} \mathbf{S}_{f_{dext}} \mathbf{d}_{dext} q_{0ext}) \quad (20)$$

Donde Q_{dext} es el espacio de estados $\mathbf{S}_{f_{dext}}$ es el conjunto de eventos \mathbf{d}_{dext} es la función de transición y q_{0ext} es el estado inicial. Cada uno de los estados del diagnosticador extendido $q_h \in Q_{dext}$ quedará definido por la función de extensión de estados $SEF(q_h)$

$$q_h = \{(x_i, l_i), (x_j, l_j) \dots (x_k, l_k), (C)\} \quad (21)$$

Donde $(x_i, l_i), (x_j, l_j) \dots (x_k, l_k)$ tienen la misma interpretación que en un diagnosticador convencional y C es un operador de conteo de tiempos y de ocurrencias definido por $SEF(q_h)$.

De ese modo la representación de estos estados se muestra en la Figura. 13. En esta figura se puede observar como los estados inciertos incluyen un temporizador que irá contando el tiempo que se permanece en dicho estado, mientras que los estados L-ciertos incluyen un trinomio (L, T, N) por cada una de las etiquetas L-ciertas (etiqueta, tiempo, número de ocurrencias). Un ejemplo de diagnosticador extendido se muestra en la Figura. 14.

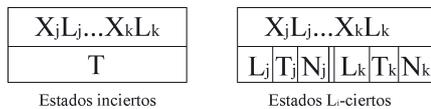


Figura. 13. Representación de los estados en los diagnosticadores extendidos

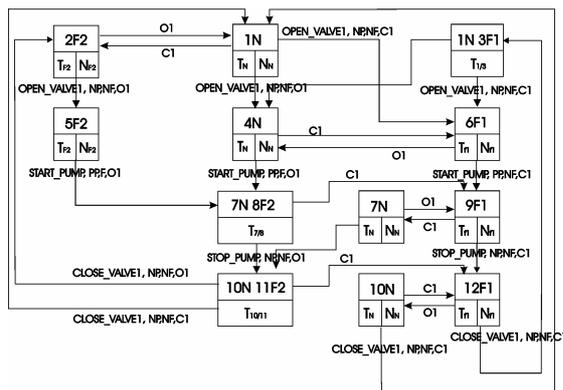


Figura. 14. Diagnosticador extendido.

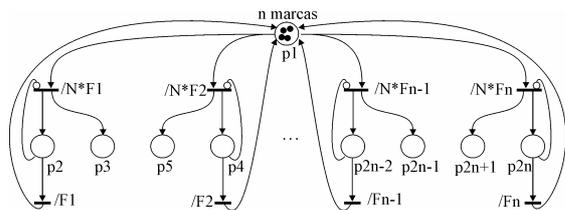


Figura. 15. Modelo de RdP de adquisición de datos de fallos excluyentes para n fallos.

Cada uno de los temporizadores asociados a cada estado adquiere el valor "0" cuando se inicia el diagnosticador. Una vez se entra en un estado su temporizador se activa, iniciando la cuenta desde el valor anterior de temporización siguiendo la siguiente política:

Sean $q_1, q_2 \in Q_{dext}$ $Gd / dd(q_1, s) = q_2$ de tal modo que, $q_1 = (x_i, l_i), (x_j, l_j) \dots (x_k, l_k), (C)$ y $q_2 = (x_i', l_i'), (x_j', l_j') \dots (x_k', l_k'), (C')$

Se construyen $L_{q1} = l_i l_j \dots l_k$ y $L_{q2} = l_i' l_j' \dots l_k'$, definiendo $L_{q12} = L_{q1} \mathcal{C} L_{q2}$. A partir de la cadena L_{q12} se definen los temporizadores y contadores para el estado q_2 de la manera siguiente: si $L_{q12} \mathbf{I} F_r \mathbf{P} T_r = T_r$ y $N_r = N_r$ o si $L_{q12} \mathbf{E} F_r \mathbf{P} T_r = 0$ y $N_r = N_r$

8.2. Redes de Petri de adquisición de datos

El funcionamiento de los diagnosticadores extendidos resulta complejo si se estudia únicamente la función de extensión de estados. Por lo tanto, se explicará su dinámica empleando el formalismo de las RdP ya que resulta mucho más intuitivo. Los DEs se pueden explicar mediante el siguiente modelo. Definamos tres tipos de lugares en la RdP: el lugar de funcionamiento normal, lugares de conteo de tiempos y lugares de conteo de ocurrencias.

- **Lugares de funcionamiento normal:** Modelan el estado del sistema dentro del bucle de funcionamiento normal o por estados inciertos si no ha ocurrido ningún fallo detectado.
- **Lugares de conteo de tiempos:** Se alcanzan una vez se ha detectado un fallo. Durante la estancia de una marca en el estado, se arrancará un temporizador que medirá el tiempo transcurrido.
- **Lugares de conteo de ocurrencias:** Se emplean para contar el número de veces que se detecta el fallo.

En la Figura. 15 se puede observar un modelo general de RdP que contabiliza el tiempo y número de fallos ocurridos en un sistema con n fallos. Su funcionamiento corresponde con la interpretación del lenguaje de etiquetas, i.e., un fallo es detectado por cadenas del tipo $/N*Fi$ y una recuperación de fallo por cadenas del tipo $/Fi$.

Una vez se inicia la red se procede a un marcado inicial con n marcas (tantas como número de fallos) en $p1$, indicando el sistema se halla en funcionamiento normal. Una vez se detecta un fallo en el diagnosticador, la etiqueta Fi llega a la RdP, activando los correspondientes estados de conteo de tiempos y de conteo de ocurrencias.

Si se produjese un nuevo fallo (Fj) en el sistema, y este fuera detectado, saldría una nueva marca de $p1$ hacia los estados de fallo correspondientes. La red impide que se vuelva a entrar en estados de un fallo ya detectado una vez se han activado dichos lugares. De este modo, cuando el diagnosticador evolucione hacia un nuevo estado con el fallo detectado o con una indeterminación, la RdP considerará que continúa la misma situación de fallo.

A cada lugar de la RdP se le asocia una función de salida $S(p)$. En los lugares pares es la activación de un temporizador vectorizado por el número de marcas del lugar siguiente, i.e.:

$$S(p_n) = \text{Tim}(M(p_{n+1})) \quad (22)$$

De ese modo, si se produce un fallo, se activará un estado con salida de temporizador y su consecutivo (que es el que contará el número de veces que se ha producido el fallo). Al incrementarse el valor del contador, se arrancará un temporizador con un índice superior en una unidad al iniciado la última vez que se produjo el fallo, generándose un vector de tiempos asociado a cada una de las ocasiones en que se ha producido el fallo. Así pues, si se guarda asociado a cada temporizador el instante en que es arrancado, se puede obtener una estructura como la deseada (17).

9. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El diagnóstico de FIs es un campo que debe ser investigado en más profundidad para conseguir importantes ventajas en los procesos industriales.

La falta de metodologías concretas hace que, actualmente, los FIs sean tratados como fallos definitivos, de forma que conducen, directamente a una parada del sistema. Un conocimiento más profundo de los modos de fallo, unido a una técnica concreta de diagnóstico de los FIs alargaría la vida útil de los componentes que se asumen envejecidos antes de tiempo, ahorrando en costes de reparación y mantenimiento de las instalaciones.

En el presente artículo se ha presentado un nuevo enfoque para la diagnosticabilidad de los FIs. Dicho enfoque se ciñe a la realidad física de los dispositivos, de manera que los diagnosticadores diseñados sean capaces de detectar fallos detectables.

Para implantar el diagnóstico de fallos se han ampliado las metodologías previas existentes en el campo de los SEDs (García, 2000) y (Sampath, 1995), estableciendo nuevas condiciones de diagnosticabilidad más amplias y enunciando y demostrando las condiciones necesarias exigibles para conseguir la diagnosticabilidad. La aplicabilidad de la presente metodología a sistemas de elevada complejidad queda garantizada debido a que los diagnosticadores de fallos diseñados en el presente artículo aceptan la aproximación modular (García, 2000), de modo que se pueden desarrollar múltiples diagnosticadores extendidos sencillos trabajando de forma concurrente.

Los nuevos diagnosticadores que se pueden diseñar están incluidos en una arquitectura propia de diagnóstico de fallos que tiene por objeto una mejora de la planificación del mantenimiento de las instalaciones, así como el propio diagnóstico de fallos.

Asimismo se han extendido las funcionalidades de diagnóstico de los diagnosticadores para la

adquisición de datos de los FIs a partir de diagnosticadores modulares para sistemas de eventos discretos. Con esta información se pueden generar los parámetros fundamentales que caracterizan a los FIs. De este modo se amplían las funcionalidades de los sistemas de diagnóstico de fallos en SEDs presentadas en (Constant, 2002) y (Jiang, et. al., 2003).

Una vez caracterizados estos fallos se puede hacer un plan de mantenimiento preventivo de los componentes de un proceso industrial comparando la evolución de los fallos con un MMF realizado off-line.

REFERENCIAS

- Anderson, J. S. Aylward, (1994). "Lab Testing of Neural Networks for Improved Aircraft Onboard-Diagnostics on Flight-Ready Hardware" *LAMBDA NOTES*. Society of Reliability Engineers. Volume 26 - Issue 1.
- Antler, M. (1999) Contact freeing of electronic connectors *IEICE trans. on electronics* Vol. E82-C No. 1
- Baisheng Sun. (2001) Effects of electric contact failure on signal transmission in unmatched circuits. *Procc. of the 47th IEEE Holm Conf. on Electrical Contacts*. Pp: 186 -191
- Breuer, M.A., Friedman, A. D. (1978), "Diagnosis and reliable design of digital systems". Computer Science Press.
- Cassandras C.G. and S. Lafortune. (1999) "Introduction to Discrete Event Systems". Kluwer Academic Publishers.
- Constant, O. S. Lafortune and D. Teneketzis. (2002) "Failure diagnosis of DES: the case of intermittent failures. *41st IEEE conf. on Decision and Control*. Vol 4. pp: 4006 - 4011
- Correcher, A., E. García, F. Morant, and V. Mascarós (2004a) Fallos intermitentes: Evolución histórica. *Xi Congreso Latinoamericano De Control Automático*. Ciudad de La Habana
- Correcher, A., E. García, F. Morant, and V. Mascarós (2004b) Diagnosticadores de fallos intermitentes. *Xi Congreso Latinoamericano De Control Automático*. Ciudad de La Habana
- Correcher, A., E. García, F. Morant, and V. Mascarós (2004c) Caracterización de FI mediante diagnosticadores. *Xi Congreso Latinoamericano De Control Automático*. Ciudad de La Habana
- David, R. and H. Alla. (1992) "Petri Nets and Grafcet. Tools for modelling discrete event systems". Prentice Hall International.
- García, E. (2000) Descomposición modular de diagnosticadores de fallos basados en modelos de eventos discretos. Tesis doctoral.
- Jiang, S., R. Kumar, and H.E. Garcia. (2003) Diagnosis of repeated/intermittent failures in discrete event systems. *Robotics and Automation, IEEE Trans. on*. Vol: 19, Iss: 2. pp:310 - 323
- Kandasamy, M., P. Hayes and B. Murray. (2003) Transparent recovery from intermittent faults in Time-Triggered Distributed Systems. *Computers, IEE trans. on*. Vol. 52. NO 2, Pp:113-125.

- Leemis, L. M. (1995) *Reliability: Probabilistic Models and Statistical Methods*. Prentice Hall.
- Maul, C. McBride, J. W., Swingler, J. (2000) On the Nature of Intermittences in Electrical Contacts, *20th International Conf. on Electrical Contacts*
- Maul, C. McBride, J. W. (2002) A model to describe intermittency phenomena in electrical connectors. *Proc. of the 48th IEEE Holm Conf. on Electrical Contacts*. Pp: 165 –174
- Puig, V., J. Quevedo, T. Escobet, B. Morcego, C. Ocampo (2004) . Control Tolerante a Fallos (Parte D): Fundamentos y Diagnóstico de Fallos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*. Vol 1. N 2.
- Salvatore, J. Bavuso, Elizabeth Rothmann, Joanne Bechta Dugan, Kishor S. Trivedi, Nitin Mittal, Mark A. Boyd, Robert M. Geist and Mark D. Smotherman, (1994) HiRel: Hybrid Automated Reliability Predictor (HARP) Integrated Reliability Tool System (Version 7.0) HARP Introduction and User's Guide, *NASA TP-3452*, Vol. 1 , pp. 147
- Sampath, M. (1995) “A Discrete Event Systems Approach to Failure Diagnosis” PhD Thesis.
- Savir, J. (1978) “Detection of intermittent faults in sequential circuits” Stanford University, Computer Systems Laboratory. T.R. 120. disponible en “ftp://reports.stanford.edu”
- Sorensen, B. A., G. Kelly, A. Sajecki y P. W. Sorensen, (1994) “An analyzer for detecting aging faults in electronic devices” *AUTOTESTCON '94. IEEE Systems Readiness Technology Conf. 'Cost Effective Support Into the Next Century', Conf. Proc.* , 1994 Pp: 417 –421. update (1998) disponible en www.usynaptics.com
- Tammana, P. and Faught, D. (1998) Software Defect Isolation. Presented at the High-Performance Computing Users Group and InterWorks.