COMPLEX SYSTEMS DIAGNOSTIC THEORY (*DESARROLLO DE UNA TEORÍA DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS PARA SISTEMAS COMPLEJOS*)
Eng. Raimundo Rodulfo, 1994

ORIGINAL RESEARCH PAPERS IN SPANISH

Esta teoría nació cuando diseñaba el sistema experto **IOPROB**, de la necesidad de deducir una metodología científica de análisis y planificación del proceso de diagnóstico de fallas en un sistema constituido por unidades de procesamiento separadas, que puedan ser sometidas a prueba o reemplazo de manera individual.

Aún cuando fue desarrollada para ser aplicada a un sistema electrónico (sistemas IOP de conmutación), su utilidad abarca una amplia gama de aplicaciones de diagnóstico en sistemas de diversa índole (mecánicos, industriales, etc.), por haber sido conceptualizada de manera topológica y abstracta.

La obtención de la metodología propuesta requirió la creación y definición de sus términos básicos, y la deducción y demostración de los teoremas que fundamentan el basamento teórico-analítico necesario para aplicarla.

Definición:
Prioridad de prueba.

Se define como la posición que ocupa un elemento en el orden secuencial de diagnóstico de fallas de un sistema.

El diagnóstico de fallas en un sistema compuesto por más de un elemento, debe hacerse comenzando por el elemento de mayor nivel de prioridad de prueba, y siguiendo en orden descendente hasta el de menor nivel. En la figura 1 se muestra un diagrama de flujo del proceso de diagnóstico de fallas en un sistema.

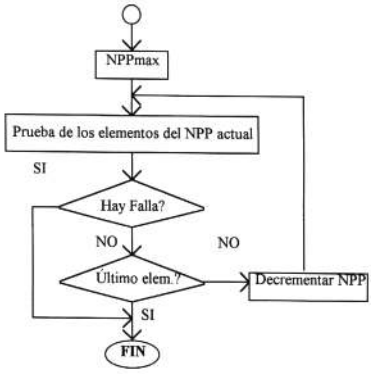

Figura 4.2.1. Proceso de diagnóstico de fallas en un sistema.

Notación:

Sea *S* un sistema, y *E* un elemento t.q. $E \in S \Rightarrow$ El nivel de prioridad de prueba de *E* en S se notará: $\mathbf{NPP_S(}\boldsymbol{E}\mathbf{)}$.

Criterios de asignación de las prioridades de prueba.

Están determinados por diversos factores, que pueden variar según las características del sistema y de los elementos que lo integran; y según la metodología de diagnóstico seguida, la cual puede basarse en datos estadísticos de la historia de fallas, o en algún otro punto de vista en particular. No obstante, existe un criterio o principio fundamental para la localización de fallas en un sistema, el cual es producto de la lógica y el razonamiento más simple e intuitivo, aquel que se origina por "sentido común"; lo denominaremos "Criterio Fundamental de Asignación de Prioridades de Prueba".

Criterio Fundamental de Asignación de Prioridades de Prueba:
"Aquellos elementos sin entradas de realimentación cuyo comportamiento afecte el de otros dentro de un sistema sometido a diagnóstico, deben probarse antes que éstos últimos."

Este principio garantiza que una anomalía detectada en el componente bajo prueba no sea causada por fallas en algún otro componente no probado, y evita diagnósticos erróneos de fallas aparentes. Según este criterio fundamental, la prioridad de prueba de un elemento dentro de un sistema, puede ser un indicador de la magnitud de la porción del sistema que es afectada por el comportamiento de dicho componente.

Definición:
Trayectoria de señales.

Es una cadena de elementos dentro de un sistema, a través de la cual fluye unidireccionalmente un conjunto de señales, sufriendo distintas transformaciones en su interior.

Como las trayectorias de señales están constituidas por un conjunto de elementos de un sistema, sobre ellas son aplicables todos los términos de la teoría de conjuntos, tales como*: unión, intersección, pertenencia*, etc. Se establecerán dos categorías básicas de trayectorias de señales:

-*Trayectorias de señales abiertas*.

Son aquellas que no poseen elementos con entradas de realimentación provenientes de otro elemento de la misma trayectoria (ver figura 2).

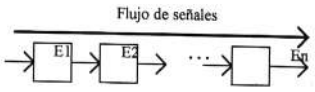

Figura 2. Trayectoria de señales abierta.

Notación:

El flujo de señales que atraviesa una trayectoria *T* se denotará Λ_T.

El número de componentes de una trayectoria de señales abiertas *T* se denotará: **#T** .

-*Trayectorias de señales cerradas*.

Son aquellas que contienen lazos de realimentación con más un elemento dentro del sistema (ver figura 3)

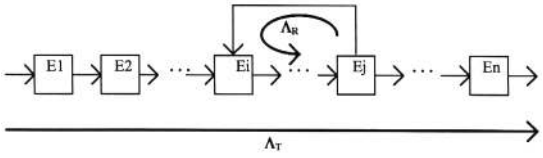

Figura 3. Trayectorias de señales cerradas.

El flujo en una trayectoria de señales abierta comienza por el elemento de menor posición y sigue en orden ascendente hasta el de mayor posición.

Notación:

Se notará la posición del elemento *E* en la trayectoria de señales abierta *T* de la siguiente manera:
POS_T (E) .

Definición:
Elemento auto-realimentativo.

Se dirá que un elemento *E* es auto-realimentativo, si tiene una o más salidas retroalimentadas a su conjunto de entradas.

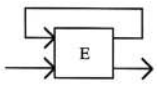

Figura 4. Elemento auto-realimentativo.

En un elemento auto-realimentativo, tienen la primera prioridad de prueba las señales de realimentación.

Por definición, una trayectoria de señales abierta puede contener elementos auto-realimentativos.

Definición:
Sistemas de Causa-Efecto Unidireccional (Sistemas CEU).

Son aquellos que no poseen trayectorias de señales cerradas. Para poder aplicar el Criterio Fundamental de Asignación de Prioridades de Prueba, es necesario que el sistema sea CEU, y si no lo es, transformarlo en tal. Para transformar un sistema con realimentación en un sistema CEU, se deben agrupar los elementos de los lazos de realimentación (trayectorias cerradas), en subsistemas que puedan ser considerados, a los efectos del diagnóstico, elementos auto-realimentativos compuestos, con lo cual el sistema sólo tendría trayectorias abiertas (ver el ejemplo de la figura 5).

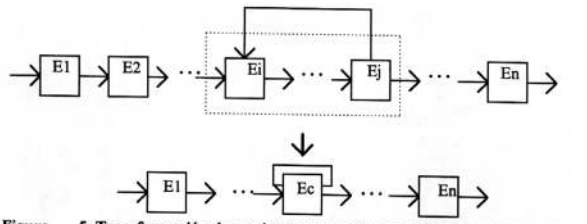

Figura 5. Transformación de un sistema con relimentación en un sistema CEU

La prueba de los componentes del elemento compuesto E_C formado a partir de la agrupación de los elementos del lazo de realimentación, se hará siguiendo otros criterios de asignación de prioridades de prueba (en este orden: secuencia de cambio en los diagramas de tiempo de señales, probabilidad de ocurrencia de fallas, y consideraciones prácticas de factibilidad de prueba como disponibilidad de recursos de medición o de tiempo). Esto es así por que el Criterio Fundamental no es aplicable a trayectorias cerradas.

Definición:
Función unidireccional de una trayectoria de señales abiertas.

Se definirá como la relación de correspondencia entre el conjunto de señales de salida y el conjunto de señales de entrada de la trayectoria.

Notación:

Sean *fi* y *fo* los conjuntos de señales de entrada y salida, respectivamente, de una trayectoria de señales abierta *T*. Se denota que *fo* es función unidireccional de *fi* en T, de la siguiente forma: $\boldsymbol{fo = \rightarrow F_T(fi)}$

Para denotar que existe una correspondencia unidireccional entre dos elementos *A* y *B*, se utilizará la función genérica F, que no indicará una relación específica, sino simplemente la existencia de una relación unidireccional de correspondencia. De esta manera, $\boldsymbol{foB = \rightarrow F\ (foA)}$ indica que hay una relación unidireccional de correspondencia de *A* hacia *B*. La existencia de una relación de esta índole entre dos elementos *A* y *B* de un sistema, tiene a los efectos de la teoría de diagnóstico una implicación interesante; la cual es que el funcionamiento del elemento *A* afecta el funcionamiento del elemento *B* de manera unidireccional (es decir, en el orden contrario $B \rightarrow A$ no es cierto), y en consecuencia, por el Criterio Fundamental de Asignación de Prioridades de Prueba: ***A* tiene mayor nivel de prioridad de prueba que *B***.

Teorema 1:

Sea *T* una trayectoria de señales abierta con $n = \#T$, dentro de un sistema CEU bajo prueba; sea *Ej* el elemento de la posición *j* de *T* ($j \in \{1,..,n\}$; $T = \{E1,E2,..,En-1,En\}$); y sean *fij* y *foj* los conjuntos de señales de entrada y salida, respectivamente, de *Ej*. Entonces:

$\boldsymbol{\forall\ k \in \{1,..,j\text{-}1\}}$ **se cumple que** $\boldsymbol{foj = \rightarrow F_T(fok)}$

Demostración:

Como $k \in \{1,..,j\text{-}1\} \Rightarrow POS_T(Ek) < POS_T(Ej)$; luego, el flujo de señales en la trayectoria Λ_T atraviesa la sub-trayectoria $Ek+1 \rightarrow Ej$; por lo tanto: $foj = \rightarrow F_T(fik+1)$. Como $fik+1 = fok$, entonces : $\boldsymbol{foj = \rightarrow F_T(fok)}$ **.**

***Teorema 2*:**

Sean *A* y *B* elementos de un sistema CEU *S*, y sean *foA* y *foB* sus respectivos conjuntos de señales de salida. Luego:

Si $\exists$ **una trayectoria de señales abierta** T **t.q.** $T \in S$ **y** $POS_T(B) > POS_T(A) \Rightarrow$
$NPP_S(B) < NPP_S(A)$

Demostración:

Sea T una trayectoria de señales abierta t.q. $\{A,B\} \in T$, con n = #T , y sean j y k tales que $k = POS_T(A)$ y $j = POS_T(B)$; $j,k \in \{1,..,n\} \Rightarrow k < j$, y por el Teorema 1 :

$foj = \rightarrow F_T(fok) \Rightarrow foB = \rightarrow F_T(foA)$. Entonces, por el Criterio Fundamental de Asignaciones de Prioridades de Prueba:

$NPP_T(A) > NPP_T(B)$. Como $T \in S \Rightarrow$

$NPP_S(B) < NPP_S(A)$

Este teorema es de gran importancia, ya que permite determinar el orden de prueba de los componentes de un sistema, mediante la obtención de las trayectorias de señales abiertas que existen en su interior.

Definición:

-*Elementos consecutivos*:

Se dirá que dos elementos A y B son consecutivos, en ese mismo orden, si existe una trayectoria de señales abierta T tal que $A,B \in T$ y

$POS_T(B) > POS_T(A) + 1$; y se denota $A \rightarrow\!\lceil_T B$.

En este caso, se dice que B es descendiente de A ; y que A es ascendiente de B.

Casos Especiales.

- *Confluencia* :

Sean $T1$ y $T2$ dos trayectorias de señales abiertas con intersección no nula ($T1 \cap T2 \neq \varnothing$), y sean A, B y $E1$ elementos tales que $A \in T1$, $B \in T2$ y $E1 \in T1 \cap T2$; entonces, se dirá que A y B son confluentes si $A \rightarrow\!\lceil_{T1} E1$, $B \rightarrow\!\lceil_{T2} E1$ y $POS_{T1 \cap T2}(E1) = 1$. En este caso, A y B son elementos independientes, y no existe ningún criterio en la teoría de diagnóstico que permita decidir cual de los dos probar primero; por lo tanto, se asumirá por convención asignar a uno de ellos mayor prioridad de prueba que el otro. Si decidimos probar primero el elemento A, entonces:

$NPP_{T1 \cup T2}(A) > NPP_{T1 \cup T2}(B)$; y

$NPP_{T1 \cup T2}(E1) = NPP_{T1 \cup T2}(B) - 1$.

Las trayectorias ($T1$ - $T1 \cap T2$) y ($T2$ - $T1 \cap T2$) son confluentes e independientes, entonces podemos hacer extensiva la convención asumida a trayectorias de señales en vez de elementos, de este modo tenemos el siguiente orden de pruebas:

($T1$ - $T1 \cap T2$) $\rightarrow$ ($T2$ - $T1 \cap T2$) $\rightarrow$ ($T1 \cap T2$)

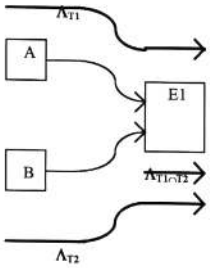

Figura 6. Confluencia de trayectorias de señales abiertas.

- *Disfluencia*:

Sean $T1$ y $T2$ dos trayectorias de señales abiertas con intersección no nula ($T1 \cap T2 \neq \varnothing$), y sean A, B y En elementos tales que $A \in T1$, $B \in T2$ y $En \in T1 \cap T2$; entonces, se dirá que A y B son disfluentes si $En \rightarrow\!\lceil_{T1} A$, $En \rightarrow\!\lceil_{T2} B$ y $POS_{T1 \cap T2}(En) = \#(T1 \cap T2)$. En este caso, al igual que en el anterior, A y B son elementos independientes, y no existe ningún criterio en la teoría de diagnóstico que permita decidir cual de los dos probar primero; por lo tanto, se asumirá por convención asignar a uno de ellos mayor prioridad de prueba que el otro. Si decidimos probar primero el elemento A, entonces:

$NPP_{T1 \cup T2}(B) < NPP_{T1 \cup T2}(A)$; y

$NPP_{T1 \cup T2}(A) = NPP_{T1 \cup T2}(En) - 1$.

Análogamente, las trayectorias ($T1$ - $T1 \cap T2$) y ($T2$ - $T1 \cap T2$) son disfluentes e independientes, entonces podemos hacer extensiva la convención asumida a trayectorias de señales en vez de elementos, de este modo tenemos el siguiente orden de pruebas:

($T1 \cap T2$) $\rightarrow$ ($T1$ - $T1 \cap T2$) $\rightarrow$ ($T2$ - $T1 \cap T2$)

El orden de prueba de elementos de igual NPP está determinado por criterios particulares, o el azar. Las convenciones antes enunciadas procuran evitar el problema de iguales NPP en elementos sin relación de correspondencia unidireccional.

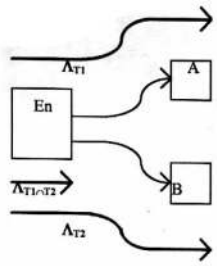

Figura .7. Disfluencia de trayectorias de señales abiertas.

Se pueden presentar comunmente casos mixtos de los anteriormente citados. Estos son:

- *Confluencia-Disfluencia*.

La solución de problemas de este tipo se encuentra aplicando de forma combinada las convenciones asumidas en los casos individuales. El orden de la secuencia de pruebas resultante es:

$$T1 \rightarrow T2 \rightarrow (T1 \cap T2) \rightarrow T1' \rightarrow T2'$$

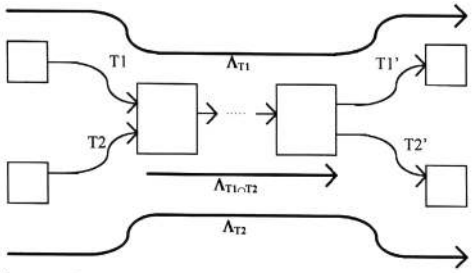

Figura 8 Confluencia-Disfluencia de trayectorias de señales abiertas.

- *Disfluencia-Confluencia*.

Análogamente, el orden de la secuencia de pruebas resultante es:

$$(T1 \cap T2) \rightarrow T1 \rightarrow T2 \rightarrow (T1 \cap T2)'$$

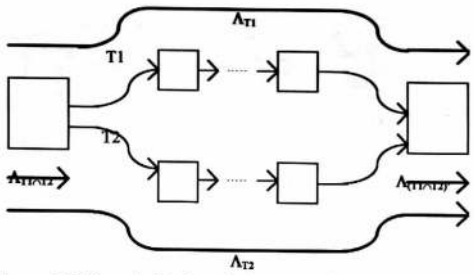

Figura 9. Disfluencia-Confluencia de trayectorias de señales abiertas.

Definición:

Trayectoria de señales definitivas.

Se llamarán así a aquellas trayectorias de señales dentro de un sistema, que no sean sub-conjunto de alguna otra dentro del mismo. La importancia de determinar las trayectorias de señales definitivas de un sistema, radica en el hecho que al probar una trayectoria definitiva, se están probando además las sub-trayectorias contenidas por ésta, ya que la secuencia de prueba definitiva contiene las secuencias de prueba parciales, en el mismo orden de prioridad de prueba. Por lo tanto, basta con probar en orden de prioridad los elementos de las trayectorias de señales definitivas de un sistema, para diagnosticar fallas de manera confiable dentro de éste.

Diagrama de flujo de señales del sistema.

Es un gráfico donde se muestran todos los elementos de un sistema, y sus relaciones de correspondencia. Este diagrama es de gran utilidad en la determinación del orden de prueba de componentes de un sistema mediante la aplicación de la teoría de diagnóstico.

Los términos definidos anteriormente, y los teoremas y convenciones enunciados, son suficientes para deducir un método científico para obtener el orden óptimo de prueba de componentes en el proceso de diagnóstico de un sistema complejo. A continuación, se presenta el método sugerido:

Método de determinación del orden de prueba óptimo de los componentes de un sistema:

- Dibujar el diagrama de flujo de señales.
- Indicar en el diagrama todas las trayectorias de señales definitivas, hasta abarcar todos los elementos.
- Aplicar el teorema 2, y las convenciones para casos especiales, de ser necesario, para obtener el nivel de prioridad de prueba de cada componente.
- A partir de los niveles de prioridad de prueba, generar el orden secuencial de diagnóstico de fallas del sistema.

Este método se aplicó a cada sector del sistema IOP, para obtener el orden de prueba óptimo de componentes, con el cual se alimentó la base de datos del sistema experto de diagnóstico y reparación.