

# DIAGNÓSTICO DE FALLAS USANDO GRÁFICOS DIRIGIDOS SIGNADOS DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA



## RESUMEN

El método de los Gráficos Dirigidos Signados (GDS) se presenta en este artículo como una aproximación al diagnóstico de fallas en plantas de proceso. La complejidad que presentan estas plantas, con una gran cantidad de señales de proceso que se concentran en un panel de control, requiere de técnicas eficientes para manejar un alto volumen de información, en especial cuando dos o más señales de alarma se activan simultáneamente. La técnica GDS nos brinda una buena herramienta para el diagnóstico de fallas, usando sólo información del proceso, representada por un gráfico con nodos y ramas, y un patrón tomado del panel de control.

Este artículo presenta los principios y fundamentos de los GDS, dando todas las definiciones necesarias para entender las bases conceptuales y el procedimiento de la técnica que se muestra a través de un ejemplo.

## PALABRAS CLAVES:

Gráficos dirigidos, Modelación cualitativa, Diagnóstico de fallas, Patrones de proceso.

## ABSTRACT

The Signed Directed Graphs (SDG) method is presented in this paper as one approximation to the fault diagnosis in process plants. The complexity of these plants, with their big number of process signals concentrated at the control panel, needs efficient techniques for using a high quantity of information, especially when two or more alarm signals are activated at the same time. The SDG technique gives us a good tool for the diagnosis of faults, using only process information, represented by a graph

A. GRISALES, I. PIEDRAHITA, H. ALVAREZ Y G. URIBE

Departamento de Procesos Químicos. Facultad de Minas.

Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín

e-mails: [ghuribe@perseus.unalmed.edu.co](mailto:ghuribe@perseus.unalmed.edu.co), [halvarez@inaut.unsj.edu.ar](mailto:halvarez@inaut.unsj.edu.ar)

with nodes and branches, and one pattern taken directly from control panel.

This paper presents the principles and foundations of SDG, given all the definitions needed for understanding the conceptual bases and the procedure of the technique which is shown using an example.

## KEYWORDS:

Signed Directed Graphs, Qualitative Modeling, Fault Diagnosis, Process Pattern.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las características de la propagación de fallas en un proceso involucran una gran cantidad de variables, al punto que no es fácil, incluso para un operador experimentado, identificar la primera causa de las fallas cuando más de una variable se sale de su nivel normal. Sin embargo, si todas las variables son medidas y la estructura de las dependencias entre las variables está completamente descrita, es posible identificar la primera causa de la falla. Como estas dos condiciones no necesariamente se dan en la práctica, la asistencia del computador puede facilitar el diagnóstico con la ayuda de la teoría gráfica.

El principio básico del algoritmo para el diagnóstico de fallas, fue propuesto inicialmente por Iri y su grupo de trabajo en 1979 (Iri *et al.*, 79) y perfeccionado posteriormente (Umeda *et al.*, 80; Iri *et al.*, 85; O'Shima *et al.*, 93). Aquí se presenta la técnica general a través de un ejemplo que permite ilustrar la aplicación del algoritmo. La idea básica de la técnica es trazar la causalidad a lo largo de los Gráficos Dirigidos Signados (GDS), los cuales son derivados cualitativamente tanto

de ecuaciones características de un modelo matemático del proceso, como de datos de operación junto con la experiencia de los operadores.

## 2. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UN SISTEMA Y SUS ESTADOS.

En años recientes, las representaciones gráficas han resultado útiles para modelar y comprender diversos tipos de sistemas en muchos campos de la ciencia y la ingeniería (Patil, 81; Kuipers, 84). Cuando un GDS se usa como un modelo matemático de un sistema, sus nodos representan las variables del sistema, asociadas bien sea con los elementos físicos del proceso (actuadores) o con las variables del proceso (temperatura, presión, etc.); y sus ramas representan las influencias inmediatas entre los nodos, que pueden ser influencias positivas (promoción) y negativas (supresión). Entonces se asume que el estado del sistema puede ser descrito por una combinación de los signos que tomen los nodos del GDS. En ocasiones, ciertas relaciones existentes entre variables del sistema, generan ramas de supresión o promoción pero que sólo están en el gráfico cuando uno de los nodos cumple una cierta condición, estas son las ramas condicionales, las que se detallan en la Definición 1, Numeral 4.

### Definición 1. Gráfico Dirigido Signado S

Un gráfico dirigido signado S se define como:

$S = \{N, B, \partial, \sigma_B, \phi\}$ , , donde:

1.  $N$  es el conjunto de nodos definido como  $N = \{N_M, N_C, N_{NM}\}$ . Usualmente, algunas de las variables del sistema no se miden ya sea por razones físicas, técnicas o económicas; de este modo, los nodos se dividen en:  $N_M$  los nodos medidos no controlados,  $N_C$  los nodos medidos y controlados y  $N_{NM}$  los nodos no medidos.
2.  $B$  es el conjunto de ramas representado como  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ .
3.  $\partial$  es una función que asigna a cada rama un nodo inicial denotado por  $\partial^+(b_i)$  y un nodo final  $\partial^-(b_i)$ .
4.  $\sigma_B$  es el conjunto de signos que puede tomar una rama.  $\sigma_B = \{+, -, +^+, +^-, -^+, -^-\}$  donde + significa promoción, - significa supresión, y los superíndices indican condicionalidad al nodo inicial. Por ejemplo

$+$  implica que la rama sólo existe como rama de promoción cuando el signo del nodo inicial es +, en otro caso la rama no existe.

5.  $\phi$  es una función que fija a cada rama un signo, el que representa la influencia del nodo inicial sobre el nodo final.  $\phi: B \rightarrow \sigma_B$ .

Con el fin de ilustrar la técnica se toma sólo una parte de un proceso, así, el algoritmo puede aplicarse manualmente y los gráficos resultan de un tamaño adecuado a la extensión de un artículo. La parte a tratar, que se muestra en la Figura 1, comprende un tanque de distribución, al cual llega una corriente con flujo  $F_1$  regulada por una válvula manual  $V_1$ . El fluido se somete en este tanque a un tratamiento, cuya eficiencia depende del nivel  $L$  del líquido. Este tratamiento lo habilita para ser, bien sea, reutilizado en el proceso o almacenado para su uso posterior. Los requerimientos del proceso fijan el flujo  $F_2$ , que se controla a través de la válvula  $V_2$ . Por su parte, el nivel del tanque se controla mediante el flujo  $F_3$  a través de la válvula  $V_3$ , la cual envía el fluido al almacenamiento.

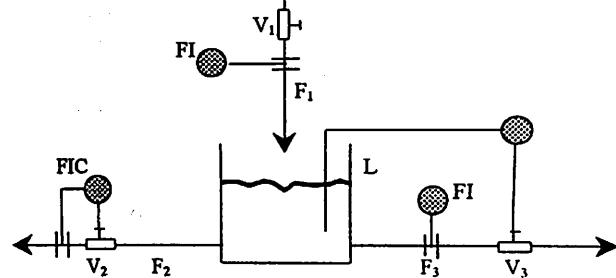


Figura 1 Tanque de distribución

Las variables que se miden son los tres flujos  $F_1$ ,  $F_2$  y  $F_3$  y el nivel  $L$ . De estas sólo se controlan  $F_2$  y  $L$ . No se miden, por costos, las posiciones de las válvulas  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$ . Así,  $N = \{V_1, F_1, V_2, F_2, L, V_3, F_3\}$  y  $N_M = \{F_1, F_3\}$ ,  $N_C = \{F_2, L\}$ ,  $N_{NM} = \{V_1, V_2, V_3\}$ . La estructura de este sistema, puede ser representada mediante el S mostrado en la Figura 2.

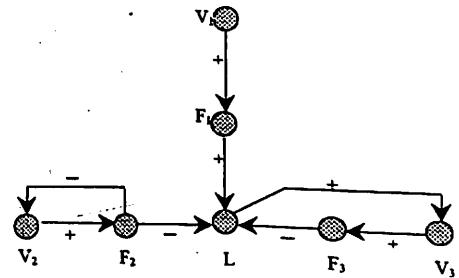


Figura 2 GDS del tanque de distribución del ejemplo

### 3. USO DE GDS PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLAS

Mientras no exista falla; es decir, mientras las variables permanezcan dentro de la banda de control, los nodos de  $S$  estarán con signo "0". Pero en el momento en que alguna variable del proceso se salga de la banda de control, los nodos empezarán a tomar valores diferentes; ya sea "+" ó "-" si están por encima o por debajo de la misma.

#### Definición 2. Patrón en $S$

$W$  es un patrón sobre  $S$ , definido como:

$W = \{N_i, \sigma_N, \psi\}$ , donde:

1.  $N_i$  es el conjunto de nodos que se toma.  $W$  lleva diferentes nombres de acuerdo a este grupo de nodos: **PATRÓN PARCIAL DE FALLA ( $W_{PF}$ )**, cuando se toma el conjunto  $N_M$ ; **PATRÓN PARCIAL EXPANDIDO DE FALLA ( $W_{PEF}$ )**, cuando además de los  $N_M$  se toman algunos  $N_C$  o  $N_{NM}$  válidos luego de obtener sus signos; **PATRÓN EXPANDIDO DE FALLA ( $W_{EF}$ )**, cuando además de los  $N_M$  se toman todos los  $N_C$  y  $N_{NM}$  válidos luego de obtener sus signos.
2.  $\sigma_N$  es el conjunto de signos a asignar a cada nodo.  $\sigma_N = \{+, 0, -, \oplus, \ominus\}$ . Si el sistema tiene variables controladas puede suceder que la falla aparentemente se propague por un nodo con signo "0", que aparece así porque corresponde a cualquiera de las variables controladas. Para tener en cuenta el papel especial del equipo de control en el sistema, se usa el signo  $\oplus$  y ( $\ominus$ ) que podría ser intuitivamente interpretado como el estado de la variable que tendría signo "+" ( $\ominus$  "-") sin sistema de control, pero que aparece normal por la acción del controlador.
3.  $\psi$  es una función que asigna a cada nodo del conjunto  $N_i$  un signo del conjunto  $\sigma_N$ .  $\psi: N_i \rightarrow \sigma_N$ .

Cabe en este punto resaltar la estrecha relación entre el concepto de observabilidad de estado y la posibilidad de diagnóstico de falla a partir de un  $S$  y una selección particular de los  $N_M$ ,  $N_C$ ,  $N_{NM}$ , que implica una mayor o menor riqueza en la información que se toma del proceso. Por ser aún tema de estudio, no se profundizará aquí en este tópico. Sólo se pide que la planta a diagnosticar sea observable y que las variables medidas

no controladas formen un grupo mínimo que permita un patrón de falla eficiente al aplicar la técnica. Una propuesta es postular caminos de falla hasta  $N_C$  y los  $N_M$  serán aquellos más cercanos a cada  $N_C$ .

Continuando con el ejemplo, supongamos como falla el descenso anormal del flujo  $F_2$ , dando lugar al patrón que se muestra en la Tabla 1

Tabla 1 Patrón parcial de falla,  $W_{PF}$

V1	F1	L	V2	F2	V3	F3
	0	0		-		+

#### Definición 3. Validez de nodos y Consistencia de ramas

Dado un patrón  $W$  sobre  $S$ , un nodo es válido si su signo es diferente de cero ( $\psi(n_i) \neq 0$ ). En el caso de los nodos controlados su validez se determina sólo después del procedimiento de asignación de signos. Para los nodos no medidos que precedan un nodo no válido, la validez de éste se extiende al nodo no medido. Por su parte, una rama  $b_k$  es consistente si el producto de los signos de sus nodos inicial y final es igual al signo de la rama.

En el contexto de diagnóstico de fallas, no son importantes nodos con signo "0" ni ramas a través de las cuales no existe ruta de propagación de la falla; se considera entonces que la propagación es sólo a través de los nodos válidos y de las ramas consistentes. En nuestro ejemplo, luego de aplicar el  $W_{PF}$  de la Tabla 1 y la definición de validez de nodos y consistencia de ramas se eliminan de  $S$  el nodo  $F_1$  por tener signo 0 (L no se elimina porque no se conoce la manera cómo fue afectado por la falla) y el nodo  $V_1$  por ser un nodo no medido que precede un nodo no válido. Aparece así una primera reducción en  $S$  denominada GDS parcial de falla,  $S_{PF}$  el cual se muestra en la Figura 3:

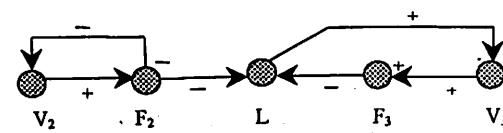


Figura 3 GDS parcial de falla,  $S_{PF}$

#### Definición 4. Camino, Ciclo y Componente Fuertemente Conectado (CFC)

Un Camino es un recorrido en  $S$  cuya dirección coincide con la de las ramas que componen el recorrido. Un ciclo es un camino que comienza y termina en un mismo

nodo. Un CFC se define como cada uno de los nodos que no hagan parte de un ciclo, ya que un ciclo es, en sí mismo, un CFC. Así, un nodo no puede hacer parte de varios CFC. Si bien, existe una técnica matemática para la determinación de componentes fuertemente conectados (Tarjan, 72), en la Figura 4 se muestran los cinco casos más comunes que se presentan en la división de componentes fuertemente conectados.

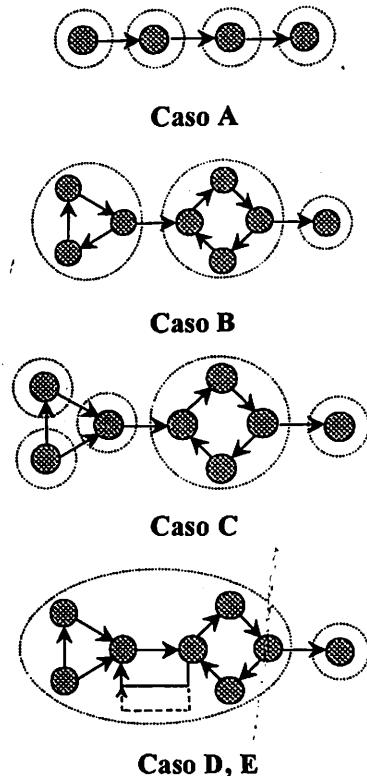


Figura 4 Cinco casos comunes de CFC.

En el caso "C", los tres nodos de la izquierda parecen formar ciclo; sin embargo, la dirección de las ramas que los unen no concuerda con la definición de dicho término, por lo tanto, cada uno de ellos es un CFC. En el caso "D" dos de los nodos entre los ciclos mayores están unidos entre sí por medio de un lazo de retroalimentación negativa. Como un nodo no puede hacer parte de varios CFC, los tres ciclos se hacen formar parte de un único CFC. Igual ocurre si dichos nodos están unidos por medio de un lazo de retroalimentación de otro tipo (con ramas condicionales, por ejemplo) como el esquematizado en el caso "E".

Para el ejemplo del tanque distribuidor, en la Figura 5 se muestran los CFC del  $S_{PF}$ :

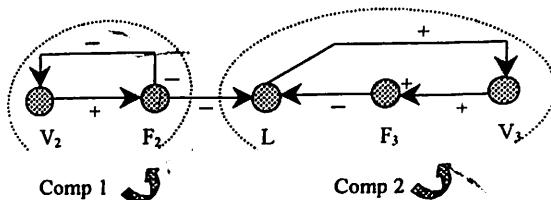


Figura 5 CFC del  $S_{PF}$  para el tanque distribuidor

#### Definición 5. Orden Parcial (OP) de un CFC y Componentes Fuertemente Masivamente Conectados (CFMC)

El orden parcial se define como la sumatoria de los valores asignados a cada una de las ramas que entran o salen de un CFC, de acuerdo con la siguiente convención: si la rama entra al componente tiene valor -1, si sale de él tiene valor +1. Por su parte, un CFMC se define como cualquier CFC cuyo orden parcial resulta  $\geq +1$ . En palabras, esto significa que el componente tiene salidas netas.

En el ejemplo que nos ocupa, el OP de los CFC se muestra a continuación:

- Componente 1:  $(+1) = (+1)$
- Componente 2:  $(-1) = (-1)$

Por su parte el único CFMC es el componente 1.

#### Definición 6. CFMC Esencial (CFMC<sub>E</sub>)

Un CFMC es un componente esencial cuando cumple una de las siguientes condiciones:

1. Es un nodo válido.
2. Es un ciclo con al menos uno de sus nodos válido.
3. Es un nodo no medido pero antecedido de un nodo medido, que presente falla.

Aplicando esta definición, el algoritmo indica en este paso que sólo se dejan en el  $S_{PF}$  los CFMC<sub>E</sub>, en este caso es el componente 1. Así, el nuevo  $S_{PF}$  es idéntico al de la Figura 5.

#### Definición 7. GDS Cuasi Causa - Efecto ( $S_{CCCE}$ ) y GDS Cuasi Causa - Efecto Raíz ( $S_{CCER}$ )

Se denomina  $S_{CCCE}$  al  $S_{PF}$  que contiene por lo menos algún nodo controlado o no medido con signo asignado. Por su parte, un  $S_{CCER}$  es cualquier  $S_{CCCE}$  que presente todos sus nodos conectados y además dicho enlace es un camino.

A cada  $S_{CCE}$  le corresponde un patrón expandido de falla  $W_{PEF}$ , que resulta del tanteo de signo de algunos de los nodos controlados y no medidos. Este procedimiento de asignación de signos es acumulativo, agotando primero todos los nodos controlados para finalmente asignar signos a los nodos no medidos, comenzando por los más cercanos a los controlados. Sólo se mantienen los  $S_{CCER}$ , como se ve a continuación al aplicar la definición y este paso del algoritmo al ejemplo. En el tanteo del signo para el nodo L se presentan los siguientes  $W_{PEF}$  con sus correspondientes  $S_{CCE}$ :

Si se considera que a través del nodo L no hay propagación de falla:

Tabla 2.  $W_{PEF}$  1.

L	V2	F2	V3	F3
0		-		+

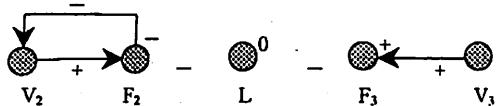


Figura 6.  $S_{CCE}$  1.

2. Si se considera que el nivel aumentó y que por acción del controlador se restableció, se tiene:

Tabla 3.  $W_{PEF}$  2.

L	V2	F2	V3	F3
+		-		+

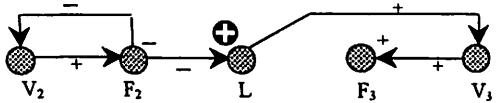


Figura 7.  $S_{CCE}$  2.

Si se considera que el nivel bajó y que por acción del controlador se restauró, se tiene:

Tabla 4.  $W_{PEF}$  3.

L	V2	F2	V3	F3
-		-		+

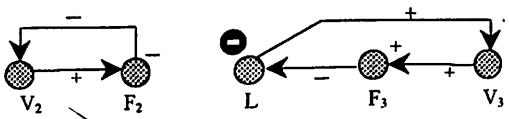


Figura 8.  $S_{CCE}$  3.

Así, aplicando la Definición 7 se obtiene que el  $S_{CCE}$  2 es el único  $S_{CCER}$ , por lo tanto sobre él se continúa la asignación de signos luego de fijar el signo de L en +. Como no hay más nodos controlados seguimos con el tanteo para el signo de  $V_3$ :

1. Si se le asigna el signo “-”:

Tabla 5.  $W_{PEF}$  4.

L	V2	F2	V3	F3
+		-	-	+

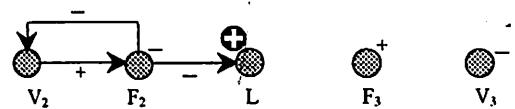


Figura 9.  $S_{CCE}$  4.

Si se le asigna el signo “0”:

Tabla 6.  $W_{PEF}$  5.

L	V2	F2	V3	F3
+		-	0	+

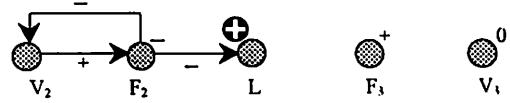


Figura 10.  $S_{CCE}$  5.

Si se le asigna el signo “+”:

Tabla 7.  $W_{PEF}$  6.

L	V2	F2	V3	F3
+		-	+	+

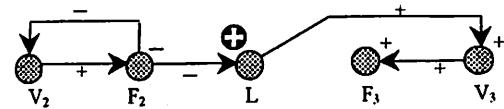


Figura 11.  $S_{CCE}$  6.

Aplicando la Definición 7, se ve que el único  $S_{CCER}$  es el  $S_{CCE}$  6 y por consiguiente el signo de  $V_3$  es "+". Realizando el mismo tanteo para el nodo  $V_2$  se obtienen los tres  $S_{CCE}$  siguientes con sus respectivos patrones parciales:

1. Si se le asigna el signo "-":

Tabla 8.  $W_{PBP}$  7.

L	V2	F2	V3	F3
⊕	-	-	+	+

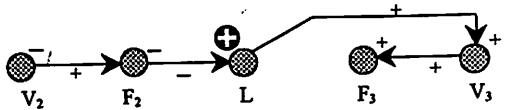


Figura 12  $S_{CCE}$  7.

Si se le asigna el signo "0":

Tabla 9.  $W_{PBP}$  8.

L	V2	F2	V3	F3
⊕	0	-	+	+

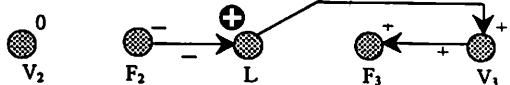


Figura 13  $S_{CCE}$  8.

3. Si se le asigna el signo "+":

Tabla 10.  $W_{PBP}$  9.

L	V2	F2	V3	F3
⊕	+	-	+	+

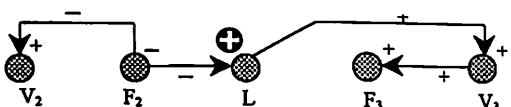


Figura 14  $S_{CCE}$  9.

Aplicando la Definición 7 se puede ver que tanto el  $S_{CCE}$  7 como el  $S_{CCE}$  8 cumplen con la condición de la existencia de un camino que une todos los nodos. Así,  $V_2$  puede tener signo "0" ó signo "-".

Definición 8. GDS Causa Efecto ( $S_{CE}$ )

Para un  $S$  determinado y un  $W_{PF}$  observado sobre él, es natural considerar que la manera de propagación de la falla está representada por un GDS que relaciona la causa de la falla con sus efectos. Este GDS para el patrón  $W_{EF}$  sobre  $S$  es el denominado GDS Causa Efecto, el cual consiste de todos los nodos válidos y de todas las ramas consistentes, obtenidos del procedimiento de asignación de signos.

Es lógico considerar a los CFC del (de los)  $S_{CE}$  como posibles orígenes de la falla. El origen real de la falla es aquel CFC que posea el mayor orden parcial y no esté precedido de ningún otro CFC. Siguiendo con el ejemplo, se tiene que las Figuras 12 y 13 son los  $S_{CE}$  para este problema, los cuales se deben dividir en componentes fuertemente conectados para obtener el CFC con mayor OP. En la Figura 15 se muestra el  $S_{CE}$  1 y a continuación se evalúa el OP de sus CFC:

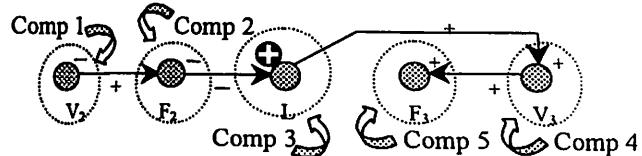


Figura 15 CFC del  $S_{CE}$  1.

$$\text{Componente 1: } (0) + (+1) = (+1)$$

$$\text{Componente 2: } (-1) + (+1) = (0)$$

$$\text{Componente 3: } (-1) + (+1) = (0)$$

$$\text{Componente 4: } (-1) + (+1) = (0)$$

$$\text{Componente 5: } (-1) + (0) = (-1)$$

Para el  $S_{CE}$  2, mostrado en la Figura 16, se realiza el mismo procedimiento, resultando:

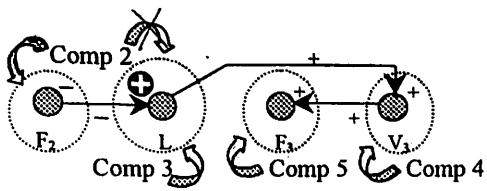


Figura 16. CFC del  $S_{CE}$  2.

$$\text{Componente 2: } (0) + (+1) = (+1)$$

$$\text{Componente 3: } (-1) + (+1) = (0)$$

$$\text{Componente 4: } (-1) + (+1) = (0)$$

$$\text{Componente 5: } (-1) + (0) = (-1)$$

Finalmente, examinando todos los CFC de ambos  $S_{CE}$  anteriores se concluye que hay dos posibles orígenes de falla, un CFC de OP máximo por cada  $S_{CE}$ . Del primero, se ve que el origen de la falla es el nodo  $V_2$  y del segundo es el nodo  $F_2$ ; por lo tanto se puede pensar que los dos posibles orígenes de falla son un estancamiento del vástago de la válvula  $V_2$  (del  $S_{CE}$  1) o un decrecimiento en el flujo  $F_2$  (del  $S_{CE}$  2) que puede deberse a un bloqueo de la tubería o a una fuga en la línea.

#### 4. UN ALGORITMO DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS CON GDS

El algoritmo propuesto para el diagnóstico de fallas, que se aplicó sobre el ejemplo del tanque de distribución se presenta en la Figura 17.

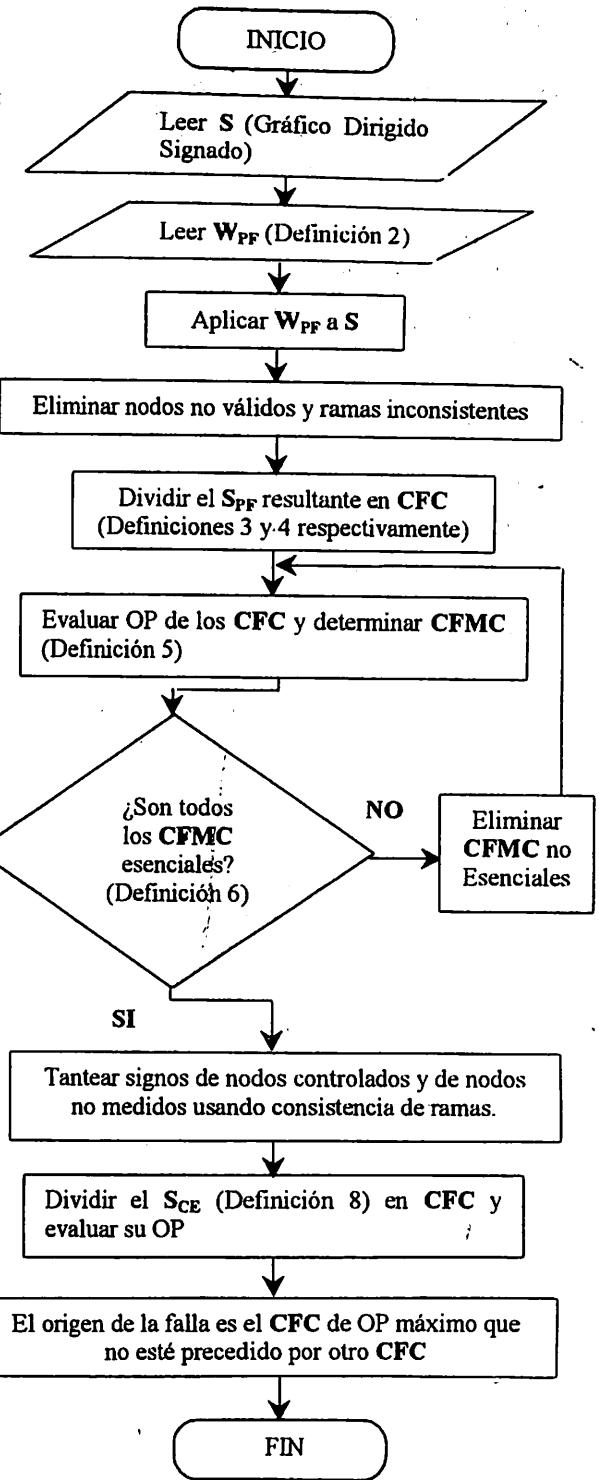


Figura 17 Algoritmo para el diagnóstico de fallas.

## 5. REFERENCIAS

- Iri, M. *et al.* An Algorithm for Diagnosis of System Failures in the Chemical Process. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 3. 1979.
- Iri, M. *et al.* An Improved Algorithm for Diagnosis of Systems Failures in the Chemical Process. *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 9, Nº 3. 1985.
- Kuipers, B. J. Qualitative Simulation. *Artificial Intelligence*, Vol. 29. 1984.
- O'Shima, E. *et al.* Improvement of the Accuracy of Fault - Diagnosis Systems Using Signed Directed Graphs. *Internacional Chemical Engineering*, Vol. 33, Nº 3. 1993.
- Patil, R. S. *et al.* Causal Understanding of Patient Illness in Medical Diagnosis. *Proc. 7<sup>th</sup> Int. Joint Conf. On Artificial Intelligence (IJCAI - 81)*. 1981.
- Tarjan, R. E. Depth - First Search and Linear Graph Algorithm. *SIAM J. Computing*, Vol. 1, Nº2. 1972.
- Umeda, T. *et al.* A Graphical Approach to Cause and Effect Analysis of Chemical Processing Systems. *Chemical Engineering Science*, Vol. 1980.

# FACULTAD DE MINAS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

## NUEVAS CARRERAS

◆ INGENIERÍA DE  
SISTEMAS E  
INFORMÁTICA

◆ INGENIERÍA DE  
CONTROL

Para mayor información marque el número 2 en el desprendible final