

Sistema de diagnóstico de fallas para sistemas de transmisión de energía utilizando redes de petri

Recibido para evaluación: 15 de Feb de 2005
Aceptación: 21 de Abril de 2005
Entrega de versión final: 5 de Mayo de 2005

German Zapata ¹
John Faber Grisales ²
Juan Camilo Gómez ³
Luis Fernando Quintero Henao ⁴

RESUMEN

Se utilizó un Sistema Experto de Segunda Generación integrando las redes de Petri inversas (RPN) y los sistemas basados en reglas (Rule-Based System) para la realización de un programa en Visual Basic que ayude en la obtención de un oportuno y rápido análisis de los sistemas de transmisión de energía al momento de ocurrir una falla en cualquiera de sus componentes (líneas ó barras). El programa es probado en una porción del sistema IEEE-118 bus Standard Test System, en el cual se desarrollan dos casos extraídos de la literatura y se muestran los resultados obtenidos. Por último se realizaron pruebas con el método desarrollado en el laboratorio de máquinas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, simulando un sistema de transmisión con dos barras y dos líneas.

PALABRAS CLAVES: Sistemas Expertos, Redes de Petri, Sistema basado en reglas, Diagnóstico de fallas, Sistemas de Transmisión.

ABSTRACT

An Expert system of Second Generation was used integrating the inverse Petri nets (RPN) and the systems based on rules (Rule-Based System) for the accomplishment of a program in Visual Basic that helps in the obtaining of an opportune and fast analysis of the systems of transmission of energy at the time of happening a fault in anyone of its components (line or bus). The program is proven in a portion of system IEEE-118 Standard bus Test System, in which two extracted cases of Literature are developed and are the obtained results. Finally tests realized with the method developed in the laboratory of machines of the National university of Colombia, Medellín campus, simulating a system of transmission with two lines and two buses.

KEYWORDS: Expert Systems, Petri Nets, Ruled-Based System, Fault Diagnosis, Transmission Systems.

¹ *gdzapata@unalmed.edu.co*
Profesor Asistente.
Universidad Nacional de Colombia, Medellín
Grupo de automática de la Universidad Nacional de Colombia – GAUNAL, Medellín
Instituto de automática y procesos industriales de la universidad Nacional de Colombia – IAPI, Medellín
² *jfgrisal@universia.net.co*
Ingeniero Electricista, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
³ Ingeniero Electricista, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
⁴ *luisquintero@universia.net.co*
Ingeniero Industrial, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

En los sistemas eléctricos de potencia es de vital importancia la continuidad en la prestación del servicio de suministro de energía a los respectivos usuarios, razón por la cual ante una eventualidad en el sistema, ésta debe ser aislada por los respectivos dispositivos de protección. No siempre se tendrá una operación adecuada de los elementos de protección presentes en el sistema, y debido a esto, pueden ser mayores las zonas afectadas por una falla. Como consecuencia, se dejará de prestar el servicio a más usuarios de los que realmente se debería, y por consiguiente, se disminuirá la calidad del servicio prestado y se presentarán unas pérdidas innecesarias por su interrupción.

Una vez ocurrida la falla se debe proceder inmediatamente a re establecer el servicio de las zonas cuya salida de operación fue innecesaria, por lo que se debe conocer antes la operación (correcta operación, falla en operar, etc.) de todos los elementos que actuaron al despejar la falla. Para lograr esto se requiere de toda la información de disparos, tiempos de retardo, alarmas etc. que llegan al centro de control, para analizar el comportamiento de cada uno de los aparatos que participaron en el despeje de la falla. Este análisis se conoce como diagnóstico de fallas (DF).

Actualmente los sistemas de potencia han alcanzado niveles altos de complejidad y tamaño, y por tanto sus sistemas de protección, haciéndolos cada vez más complicados de operar. En cuanto al diagnóstico de fallas, una vez presentado un evento llegan al centro de control todas las alarmas pertinentes y debido al gran tamaño del sistema éstas pueden ser demasiadas para ser analizadas rápidamente por los operarios. También entra en consideración la enorme presión y estrés que deben afrontar los analistas de fallas, lo que lleva a una disminución en su capacidad de obtener un análisis acertado en poco tiempo.

La mayoría de los sistemas de diagnóstico en la actualidad no trabajan según las discrepancias presentadas entre el comportamiento esperado y observado. En cambio siguen un acercamiento basado en reglas para el desarrollo del software (Fukui, 1986; Huang, 2002), estos sistemas pueden ser vistos como un diccionario generalizado de fallas, asociando las fallas a los síntomas. Otra alternativa es el uso de sistemas a base del conocimiento donde la información es guardada en bases de datos y los modelos representan relaciones físicas entre los mensajes de los eventos y los componentes del sistema de potencia (Cardozo, 1988; Kimura, 1992). En la actualidad se vienen desarrollando distintos acercamientos como las redes de Petri (Yang, 1995; Hadjicostis, 2000), las Redes Neuronales (Chang, 1995) y la Lógica Difusa (Lee, 2000) etc. Las primeras han sido frecuentemente utilizadas debido a su fácil representación de los eventos que ocurren en los sistemas de transmisión.

En este artículo se pretende describir y aplicar un sistema de segunda generación (Lo, 1997), que es una mezcla de sistemas basados en reglas y en modelos, e ilustrar brevemente un programa que implementa el anterior modelo al cual se le realizaron pruebas tomando una sección del IEEE-118 bus Standard Test System para su validación, y por último se muestra su desarrollo para un modelo de un sistema de transmisión realizado en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

2. REDES DE PETRI

Las redes de Petri (PN) fueron desarrolladas por Carl Adam Petri para el modelamiento de sistemas de computación y protocolos

de comunicación, aunque rápidamente fueron utilizadas para innumerables aplicaciones.

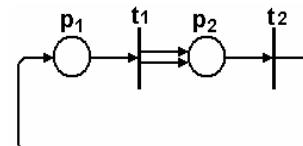
Las PN son una herramienta matemática y gráfica que permite modelar, simular y controlar sistemas dinámicos de eventos discretos como el representado por el despeje de una falla por parte del esquema de protección de un sistema de transmisión.

1.1 DEFINICIÓN FORMAL

Una red de Petri es una cuádrupla $R = (P, T, \alpha, \beta)$ donde $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, es un conjunto finito y no vacío de lugares, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ es un conjunto finito y no vacío de transiciones, $\alpha: P \times T \rightarrow N$, es la función de incidencia previa, $\beta: P \times T \rightarrow N$, es la función de incidencia posterior.

Una red de Petri se representa gráficamente por un grafo dirigido bipartido. Los lugares se representan por círculos, las transiciones por barras. Los lugares y las transiciones se conectan por arcos dirigidos. Un arco dirigido de un lugar p_i a una transición t_j existe sí y sólo sí $\alpha(p_i, t_j) \neq 0$. Análogamente, una arco dirigido de una transición t_k a un lugar p_i existe sí y sólo sí $\beta(p_i, t_k) \neq 0$. Cada arco se etiqueta con un entero natural, $\alpha(p_i, t_j)$ ó $\beta(p_i, t_j)$, que se denomina peso del arco. En la figura 1 se muestra un ejemplo de representación gráfica. En esta figura se tiene una red de Petri con dos lugares y dos transiciones, el lugar p_1 está unido de la transición t_1 mediante un arco $\alpha(p_1, t_1) = 1$, mientras que la transición t_1 está unida al lugar p_2 por dos arcos, entonces $\beta(p_2, t_1) = 2$.

Figura 1. Ejemplo de una red de Petri.



Una red se representa matricialmente por medio de dos matrices. Sea $|P| = n$ (número de lugares de la red), y sea $|T| = m$ (número de transiciones de la red). Se denomina matriz de incidencia previa a la matriz:

$$C^- = [c_{ij}^-]_{n \times m}$$

en la que $c_{ij}^- = \alpha(p_i, t_j)$ se denomina matriz de incidencia posterior a la matriz:

$$C^+ = [c_{ij}^+]_{n \times m}$$

en la que $c_{ij}^+ = \beta(p_i, t_j)$.

Es decir, en las matrices de incidencia los lugares numeran las filas (i) y las transiciones numeran las columnas (j), y cada elemento (i,j) expresa la incidencia que el lugar i tiene sobre la transición j.

La representación matricial para la red de la figura 1 es de la siguiente manera:

$$C^- = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad C^+ = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 0 \end{bmatrix}$$

Una red de Petri es pura si ninguna transición contiene un lugar que sea simultáneamente de entrada y de salida.

La representación matricial de una red pura se simplifica definiendo una única matriz, C, denominada matriz de incidencia:

$$C = C^+ - C^-$$

Las redes de Petri están dotadas de unos conceptos dinámico-estructurales como el marcado, la sensibilidad y la evolución del marcado. El marcado es la asignación de un número entero no negativo a cada lugar (número de marcas). Si $|P| = n$, entonces un marcado se representa, en forma matricial, por un vector de n elementos denominado vector de marcado $M(p)$. La evolución del marcado le otorga a la PN un comportamiento dinámico que permite modelar evoluciones simultáneas de sistemas discretos. Una transición $t \in T$ está sensibilizada si: $M(p) \geq \tilde{\gamma}(p, t) \quad \square p \in \tilde{\gamma}^*$. El disparo de una transición sensibilizada t , es representado por la expresión siguiente:

$$M_j(p) = M_i(p) + \beta(p, t) \quad \forall p \in P$$

En la figura 2 se puede ver la evolución del marcado de una red, una vez la transición t_1 sensibilizada ha sido disparada.

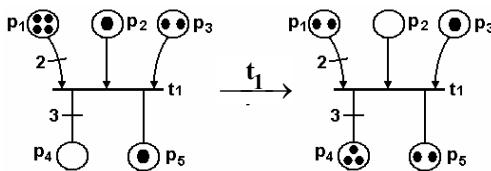


Figura 2. Ejemplo de evolución del marcado.

En las redes de Petri se tiene por lo general una secuencia de disparos a partir de un marcado inicial M_0 , y se representa por una secuencia de disparo de transiciones tal que:

$$M_0 \xrightarrow{t_1} M_1 \xrightarrow{t_2} \dots \xrightarrow{t_k} M_k = \\ M_0 \xrightarrow{\sigma} M_k$$

Se dirá que la secuencia $\sigma = t_1, t_2, \dots, t_k$ es aplicable a partir de M_0 . A una secuencia de disparos σ se le asocia un vector característico $\bar{\sigma}$, cuya i -ésima componente es el número de ocurrencias del disparo de t_i en la secuencia σ .

A partir de la definición de C y de la regla de evolución del marcado se puede obtener la ecuación de estado de una red de Petri (pura y marcada):

$$M_k = M_0 + C \cdot \bar{\sigma}$$

Una red de Petri temporizada, es un par (R, Z) tal que $R = (P, T, \alpha, \beta)$ y Z es una función que asigna un número real no negativo, z_i , a cada transición de la red. A este z_i se le denomina tiempo de disparo de la transición t_i . La evolución del marcado es idéntica a la de una red de Petri normal, la única diferencia es que el disparo de la transición t_i tarda z_i unidades de tiempo en suceder una vez quedó sensibilizada.

3. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Como se mencionó anteriormente el modelo a utilizar es el propuesto por (Lo, 1997) que utiliza una variación de las PN, que son las redes de Petri inversas (RPN), las cuales se analizarán más adelante.

1.1 PROCESO DE DESPEJE DE UNA FALLA

Al momento de ocurrir una falla en un sistema de transmisión de energía, los relés que detectan la falla envían la señal de disparo a sus respectivos interruptores, y estos a su vez proceden a abrir sus contactos para aislar la zona que presenta la falla. Para determinar cuales interruptores intervinieron para despejar la falla y determinar el estado de post-falla, se acude al proceso de evacuación de la falla. Esto se puede realizar fácilmente mediante la utilización de PN para analizar la información.

Para el modelamiento del sistema, los lugares P son formados por nodos (líneas de transmisión y barrajes), interruptores y relés del sistema de transmisión, y las transiciones T son formadas por los tiempos de retardo y la transición de la falla. Por consiguiente la construcción de las PN depende del número de interruptores que actúan como dispositivos de protección primaria en un sistema de transmisión. En la figura 3(a) se puede observar un nodo N que es protegido primariamente por un interruptor CB, y la correspondiente Red de Petri sería como la mostrada en la figura 3(b).

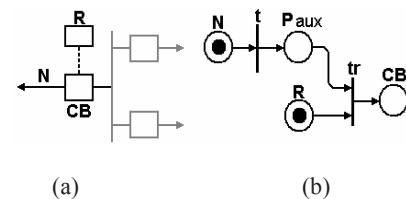


Figura 3. Representación de un nodo protegido por un interruptor.

Cuando se presenta una falla en el sistema localizada en N, la transición t se dispara y lleva la marca de N al lugar auxiliar; una vez ocurrido esto, la transición tr se sensibiliza y comienza a contar el tiempo de retardo. Al terminar este tiempo, se dispara la transición y lleva la marca a CB. Esta marca final en el lugar CB significa que el interruptor actuó para despejar la falla del sistema. La marca en el relé R indica que éste se encuentra listo para operar, y la marca en N representa la situación de que una falla puede ocurrir en ese nodo.

La construcción del modelo con PN depende enteramente del número de interruptores que estén protegiendo el nodo. En la figura 4(a) se muestra un sistema con dos interruptores que protegen un nodo N, y su respectiva representación en PN se muestra en la figura 4(b).

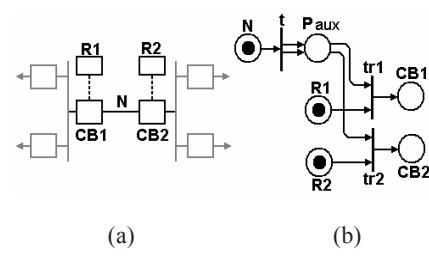


Figura 4. Representación de un nodo protegido por dos interruptores.

Lo único que se necesita es construir la matriz de incidencia C y el vector característico $\bar{\sigma}$. Para el modelo de la figura 4(b) la matriz C es:

$$C = \begin{bmatrix} t & tr_1 & tr_2 \\ -1 & 0 & 0 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Los elementos del vector característico $\bar{\sigma}$ pueden ser obtenidos al examinar la transición t y el tiempo de retardo tr. Si hay una falla, entonces el primer elemento (corresponde a t) del vector es uno; si existe un tiempo de retardo para el relé R_1 , entonces el segundo elemento del vector (corresponde a tr_1) es uno, y lo mismo para el relé R_2 . Por consiguiente el vector característico $\bar{\sigma}$ queda:

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ tr_1 \\ tr_2 \end{bmatrix}$$

Como hay marcas en los lugares N, R_1 y R_2 , entonces el marcaje inicial M_0 esta dado por:

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ P_{aux} \\ R_1 \\ CB_1 \\ R_2 \\ CB_2 \end{bmatrix}$$

El marcaje final se puede obtener mediante:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ P_{aux} \\ R_1 \\ CB_1 \\ R_2 \\ CB_2 \end{bmatrix}$$

El marcaje final muestra que hay una marca en CB_1 y CB_2 , lo que indica que ambos interruptores operaron para despejar la falla que se presentó en el nodo N. Este proceso es similar para cualquier tipo de nodo.

1.2 PROCESO DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS

El proceso de diagnóstico esencialmente funciona en dirección inversa a la presentada en el proceso de despeje de la falla. Utiliza el mismo modelo pero con las direcciones de los arcos invertidas.

A este tipo de red se le llama Red de Petri Inversa (RPN). En la figura 5 se muestra la RPN del sistema de la figura 4(a).

Como el proceso trabaja de forma inversa, entonces los estados iniciales del modelo son los estados finales del sistema de protección. Por consiguiente el marcaje inicial de la red depende sólo del estado de los interruptores. El marcaje inicial de esta red depende sólo del estado de los interruptores que actúan en ella. El vector característico $\bar{\sigma}$ depende de la existencia de los retardos de tiempo; si estos existen, entonces el elemento correspondiente del vector va a ser igual a uno, de lo contrario será igual a cero.

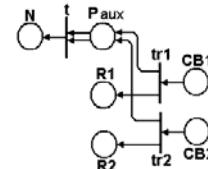


Figura 5. RPN del sistema de la figura 4(a).

El primer elemento del vector característico $\bar{\sigma}$ corresponde a la transición de la falla, y siempre es igual a uno, independientemente de las demás entradas. Para el sistema de la figura 4(a), si ambos tiempos de retardo existen, $\bar{\sigma}$ queda de la siguiente manera:

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ tr_1 \\ tr_2 \end{bmatrix}$$

1.3 PROCESO DE SIMULACIÓN

Se utilizará como convención el formato de las señales que se muestra en la tabla 1.

Señales Binarias	Representación
11	Aparato operó
10	Señal perdida o incierta
0	No operación del aparato

Tabla 1. Caracterización de señales

Las señales de los interruptores son insertadas en la Red de Petri: la señal 11 se traduce a una marca en el lugar correspondiente al interruptor en la red de Petri (uno lógico), mientras que las otras dos señales (10 y 0) equivaldrían a no tener marcas en ese interruptor (cero lógico). Las señales de los relés y sus tiempos de retardo son usadas para determinar si en el componente correspondiente al tiempo de retardo en el vector característico, posee un uno o un cero: para el caso de tener 11 en la señal de entrada del relé y la existencia de un tiempo de retardo, se tiene un uno en el componente del vector característico; de lo contrario se tiene un cero. Estas representaciones se ilustran en la tabla 2.

1.4 EJEMPLOS DE APLICACIÓN

Para tener una mejor comprensión del proceso de simulación, éste va a ser explicado con dos ejemplos sencillos, y también se analizarán y explicarán las reglas que se acabaron de mencionar.

- Ejemplo 1. Una supuesta falla ocurre en el nodo N de la figura 4(a) y se recibe la información que se presenta en la tabla 5.

	CB		Tiempos de Retardo y Relés	
Señal de Entrada	11	0/10	0.0 seg < t & Señal (relé) ≠ 10	t=0.0 seg ó Señal (relé) = 10
Entonces:				
Red de Petri	1	0	Componente de $\sigma = 1$	Componente de $\sigma = 0$

Tabla 2. Representación de señales

En el proceso de simulación, todas las señales recibidas son asumidas como correctas. Las correspondientes señales antes y después del proceso son comparadas y de acuerdo con las tablas 3 (para interruptores) y 4 (para relés) se puede obtener una interpretación adecuada de la señal.

Interruptores		
Marcaje Inicial	Marcaje Final	Interpretación
1	0	Operó correctamente
0	0	No operó
0	-1	Falló en operar
1	1	Operó incorrectamente

Tabla 3. Interpretación de señales para los interruptores.

Relés		
Señal Recibida	Marcaje Final	Interpretación
11	1	Operó correctamente
10/0	0	No operó
10/0	1	Falló en operar
1	0	Operó incorrectamente

Tabla 4. Interpretación de señales para los relés.

3.3.1 Reglas para la obtención del diagnóstico

Una vez realizada la simulación del modelo se van a obtener unos estados finales en las RPN, y para interpretar estos, se recurre a las siguientes reglas:

- REGLA 1: Si $N_i = 1$ y $R_j = 1$ para todo $R_j \in S$, entonces N_i se asume como fallado.

Donde: R_j es el lugar perteneciente al relé j y S es el arreglo de lugares del modelo.

- REGLA 2: Si hay una falla y no hubo operación de respaldo, entonces todos los dispositivos de protección primarios debieron haber operado.
- REGLA 3: Si hay una falla, entonces esta debe estar más cerca del interruptor con menor tiempo de retardo.

Dirección	Retardo
$CB_1 = 11$	$R_1 = 11$
$CB_2 = 11$	$R_2 = 11$

Tabla 5. Señales recibidas para el diagnóstico

De acuerdo con la tabla 2, como los interruptores CB1 y CB2 tienen señales de entrada iguales a 11, entonces los lugares correspondientes a estos deben tener una marca inicial. Los tiempos de retardo tr_1 y tr_2 son iguales a 0.5 segundos.

Ahora el marcaje final se obtiene mediante la ecuación $M_1 = M_0 + C \cdot \bar{\sigma}$ (ya que la ecuación se aplica para la PN y para la RPN), éste queda de la siguiente manera:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} N \\ P_{aux} \\ R_1 \\ CB_1 \\ R_2 \\ CB_2 \end{matrix}$$

Se puede ver que en los lugares N, R1 y R2 hay marcas iguales a uno, y de acuerdo con la regla 1, se puede concluir que el nodo N posee una falla. Esto concuerda con las señales obtenidas de los interruptores CB1 y CB2 ya que operaron para despejar la falla en este nodo.

- Ejemplo 2. Para el sistema de la figura 4(a) se reciben las señales que se presentan en la tabla 6.

Dirección	Retardo
$CB_1 = 11$	$R_1 = 11$
$CB_2 = 0$	$R_2 = 11$

Tabla 6. Señales recibidas para el diagnóstico

El marcaje final queda:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \begin{matrix} N \\ P_{aux} \\ R_1 \\ CB_1 \\ R_2 \\ CB_2 \end{matrix}$$

El interruptor CB_1 tiene valores de uno y cero en el estado inicial y final respectivamente, mientras que CB_2 tiene valores de cero y (-1) . De acuerdo con la tabla 3, se deduce que el interruptor CB_1 ha operado correctamente y el interruptor CB_2 ha fallado en operar. Para los relés, los valores lógicos de las señales recibidas y los valores del marcaje final para ambos R_1 y R_2 son iguales a uno. De acuerdo con la tabla 4, se deduce que ambos relés han operado correctamente. Según la regla 1, la falla ocurrió en el nodo N. Como no hay operación de otros aparatos, lo que significa que la falla fue despejada por la protección primaria; y como el interruptor CB_2 es uno de los dispositivos primarios, se concluye que éste debió de haber operado para despejar la falla. Entonces la señal recibida para este interruptor debe estar incorrecta. Esto se deduce de la regla 2.

4. PROGRAMA DEL DIAGNÓSTICO DE FALLAS.

Para realizar un proceso de diagnóstico de fallas, se diseñó un programa que ejecuta el modelo descrito. Se utilizó un sistema de once barras que forma parte del modelo IEEE 118-bus Standard Test System (sistema estándar de pruebas IEEE 118-barras), en la figura 6 se muestra la sección utilizada de este sistema.

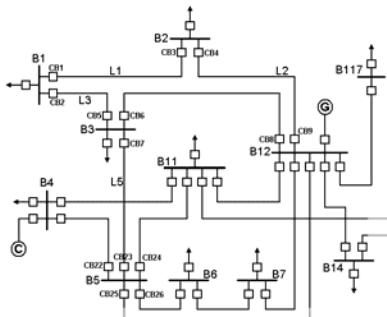


Figura 6. Sección tomada del IEEE 118-bus Standard Test System.

Para la ejecución de un correcto diagnóstico el programa se desarrolló mediante una estructura de bloques, donde cada uno desempeña una función específica para facilitar el flujo de la información. La figura 7 muestra el diagrama equivalente a este flujo.

1.1 Base de datos

Inicialmente se debe tener una base de datos que contendrá en sus campos información acerca de una falla ocurrida en el sistema de transmisión; el formato de la base de datos contiene la siguiente información:

- **Dirección.** Está compuesto por 3 elementos que son el número de la línea donde se encuentra ubicado el dispositivo que operó (relés o interruptores), el segundo carácter por la información sobre el tipo de dispositivo (1:Relé ó 0:Interruptor) y por último la posición del dispositivo en la línea (1 ó 0 para indicar si está al comienzo o final de la línea).

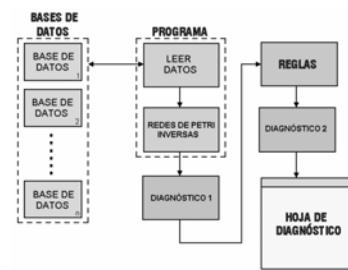


Figura 7. Flujo del programa

- **Estado:** Se tiene la información acerca de la operación del elemento (0:No operó ó 1:Operó).
- **Retardo:** Este campo contendrá la información acerca del tiempo de despeje de la falla y solo se tendrá este campo cuando el dispositivo que envió la señal a la base de datos es un relé.

En la tabla 7 se puede observar un ejemplo de base de datos empleado en el programa.

Dirección	Estado	Retardo
110	1	0.5
111	1	0.5
100	1	
210	1	0.5
200	1	
211	1	0
201	1	

Tabla 7. Ejemplo de base de datos.

1.2 CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA

El programa fue realizado en Visual Basic. Las funciones desarrolladas por éste se muestran en forma de Menú. A continuación se presentan cada una de ellas.

- Función archivo. Se tendrán las funciones “Abrir diagnóstico existente” y “Salir” para dejar de utilizar el programa.
- Función ejecutar. Sus funciones disponibles son: “Evaluar” y la función “Resultados del diagnóstico realizado”. Estos podrán ser guardados para revisiones posteriores.
- Función base de datos. Posee las opciones “Dirección de base de datos” y “Leer base de datos” para ingresar la información pertinente para el diagnóstico.
- Función ver. Posee la opción “Barra de herramientas”.

1.3 PRIMER NIVEL DE DIAGNÓSTICO

Se obtienen las primeras conclusiones sobre el estado del sistema al ejecutar el modelo desarrollado en redes de Petri inversas. Este diagnóstico da cuenta del tipo de operación que tuvieron los

diferentes dispositivos involucrados en la falla ocurrida en el sistema de transmisión, según las tablas 3 y 4.

1.4 EJECUCIÓN DE REGLAS

En este nivel del programa se utilizan las reglas ya mencionadas para obtener un refinamiento del diagnóstico obtenido anteriormente.

1.5 SEGUNDO NIVEL DE DIAGNÓSTICO

Una vez ejecutadas las reglas se obtienen hipótesis acerca de la ubicación de la falla, y de la veracidad de las señales recibidas. Éste es el diagnóstico final que se obtiene con el programa, y de acuerdo a él, los operarios pueden obtener una visión general del estado del sistema de transmisión.

2 VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Para la validación del programa, se procedió a simular las pruebas propuestas por (Lo, 1997).

A continuación se muestran los resultados obtenidos, y se comparan con los que obtuvieron en el trabajo mencionado.

1.1 PRUEBAS

La primera prueba presenta las señales que se muestran en la tabla 8.

Al realizar el diagnóstico se obtienen los eventos de los interruptores en la interfaz gráfica y los resultados en la hoja de diagnóstico. Ambos se muestran en las figuras 8 y 9 respectivamente.

En la figura 8, los interruptores en blanco indican que operaron correctamente, mientras que los de color gris indican una falla al operar.

Dirección		Retardo
CB ₁ =0	R ₁ =11	tr ₁ =0.5s
CB ₅ =0	R ₅ =11	tr ₅ =0.5s
CB ₂ =0	R ₂ =11	tr ₂ =1s
CB ₃ =11	R ₃ =11	tr ₃ =1.5s
CB ₆ =11	R ₆ =11	tr ₆ =1s

Tabla 8. Señales recibidas para el diagnóstico.

En el diagnóstico se observa como todos los relés operaron correctamente, pero los interruptores CB₁, CB₂ y CB₅ (en color gris) fallaron al operar. La falla fue despejada por los interruptores CB₃ y CB₆ (en blanco) que tuvieron una correcta operación.

Una vez obtenidos los comportamientos de los interruptores y los relés, se aplican las reglas para obtener el segundo nivel de diagnóstico. Al evaluarse la regla 1, se obtienen como hipótesis de la ubicación de la falla: la barra 1, la línea L1, la línea L2 y la barra 2.

La hipótesis final se obtiene al hacer un refinamiento del diagnóstico con la regla 3. Se obtiene que la ubicación de la falla esta en la barra 1. Este resultado se observa en el diagnóstico y en

la interfaz (barra B1). También se puede observar en la hoja de diagnóstico el tiempo de inferencia para la obtención del resultado final; éste fue de 1148 milisegundos.

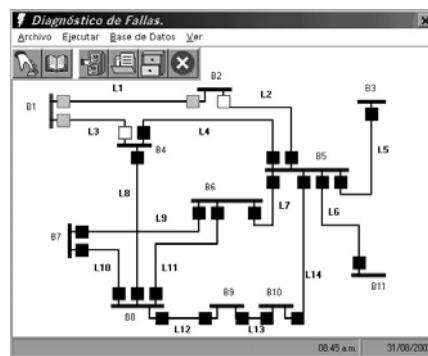


Figura 8. Estado del sistema después del diagnóstico de la prueba 1.

Línea	Posición N°	Diagnóstico Relé	Diagnóstico CB
1	1	Relé operó correctamente	CB Fallo al operar
1	2	Relé operó correctamente	CB Fallo al operar
2	3	Relé operó correctamente	CB operó correctamente
2	4	Relé no operó	CB No operó
3	5	Relé operó correctamente	CB Fallo al operar
3	6	Relé operó correctamente	CB operó correctamente

HIPÓTESIS
La falla está en la barra número 1
Tiempo de diagnóstico: 60 milisegundos.

Figura 9. Diagnóstico para la prueba 1.

Para la segunda prueba se tienen las señales de la tabla 9. Los resultados del diagnóstico para esta prueba se muestran en las figura 10 y 11 respectivamente.

En el diagnóstico se observa como todos los relés que operaron lo hicieron correctamente excepto el relé correspondiente al interruptor CB₂₀ (interruptor encerrado en el ovalo) que tuvo una señal errónea debido a que éste funcionó; los interruptores CB₁₅ y CB₁₆ (en color gris) fallaron al operar. La falla fue despejada por los interruptores CB₆, CB₇, CB₂₀, CB₂₂, y CB₂₃ (en color blanco) que tuvieron una correcta operación. Al igual que el caso anterior, al evaluar las reglas para la obtención del segundo nivel de diagnóstico se obtiene la ubicación hipotética de la falla, estas hipótesis darán como resultado de ubicación de la falla las hipótesis: la línea L8, la barras 4 y 8.

Dirección		Retardo
CB ₁₅ =0	R ₁₅ =11	tr ₁₅ =0.5s
CB ₂₀ =1	R ₂₀ =0	tr ₂₀ =1.5s
CB ₁₆ =0	R ₁₆ =11	tr ₁₆ =1s
CB ₂₂ =11	R ₂₂ =11	tr ₂₂ =1.5s
CB ₂₃ =11	R ₂₃ =11	tr ₂₃ =1.5s
CB ₇ =11	R ₇ =11	tr ₇ =0.5s
CB ₆ =11	R ₆ =11	tr ₆ =0.5s

Tabla 9. Señales recibidas para el diagnóstico.

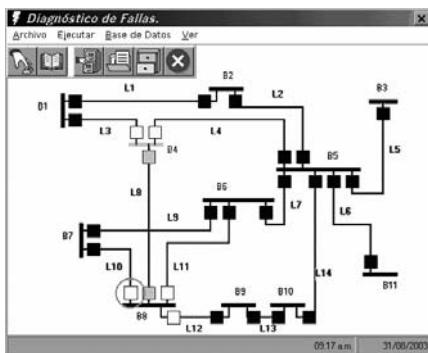


Figura 10. Estado del sistema después del diagnóstico de la prueba 2.

La hipótesis final obtenida mediante el refinamiento del diagnóstico con la regla 3, arroja como resultado que la ubicación de la falla es la barra 4. Este resultado se observa en el diagnóstico y en la interfaz (barra en color blanco). También se puede observar en la hoja de diagnóstico el tiempo de inferencia para la obtención del resultado final; éste fue de 167 milisegundos.

3 MONTAJE DEL LABORATORIO

Se procedió a probar el modelo realizado en el laboratorio, emulando un pequeño sistema de transmisión mediante la utilización de diferentes equipos que se encuentran en el laboratorio de máquinas eléctricas. El diagrama unifilar del sistema de transmisión simulado se muestra en la figura 12.

Figura 11. Diagnóstico para la prueba 2.

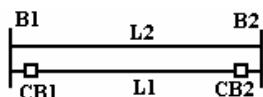


Figura 12. Sistema de transmisión.

Se realizó una falla línea-línea mediante una resistencia de potencia que limitaría la corriente.

Como se puede observar en la figura 13, en cada una de las barras se encuentran relés de distancia, que son los encargados de detectar la falla en la línea L1, y enviar la señal de disparo a sus respectivos interruptores trifásicos para despejar la falla.

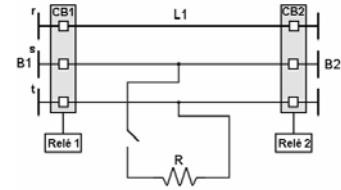


Figura 13. Línea L1 con falla línea-línea.

La señal de disparo proveniente de los relés es capturada por el PLC, y éste mediante un programa envía la señal al interruptor correspondiente, y simultáneamente envía las señales recibidas y el estado del interruptor mediante una realimentación al centro de control (PC), donde la información es utilizada en el diagnóstico. Una vez ocurrida la falla en el sistema, los relés la detectan y envían la señal de disparo a sus respectivos interruptores. Los eventos son capturados por un PLC conectado entre el relé y el interruptor, y servirá de interfaz con el computador, que actúa como centro de control, desde el que se va a realizar el diagnóstico. La conexión realizada para la comunicación mediante el PLC, se muestra en la figura 14.

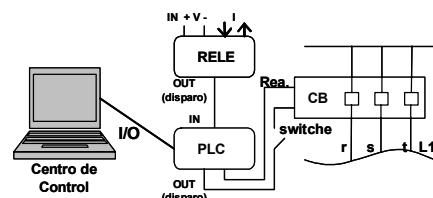


Figura 14. Montaje de comunicación.

El sistema de comunicación posee una realimentación entre el interruptor y el PLC para que éste último pueda obtener el estado del interruptor. También hay un suiche en la salida del PLC al interruptor para poder simular fallas en la operación del CB; se abre el suiche, y entonces el interruptor no opera, y al no recibir el PLC la acción de apertura del interruptor se tomará la operación incorrecta de este dispositivo. El montaje general se muestra en la figura 15.

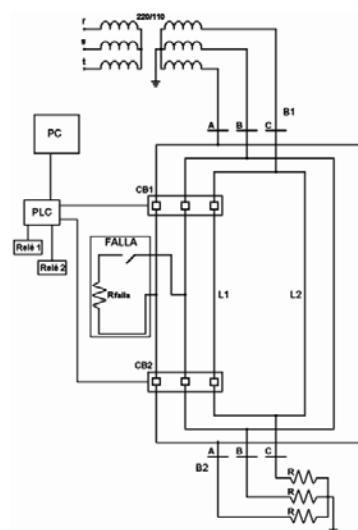


Figura 15. Montaje general

Se utilizaron dos relés SEL 121. Con base en su manual, se realizó la conexión en el laboratorio como se muestra en la figura 16 para las entradas al relé, y en la figura 17 para la salida del relé adyacente a toda la lógica.

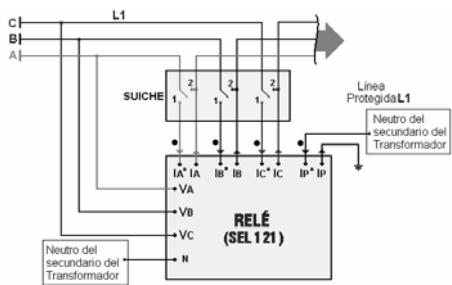


Figura 16. Conexión de las entradas del relé SEL 121.

El relé es conectado sin transformadores de corriente ni de potencial, ya que la línea tiene sus valores de voltaje y de corriente dentro del rango permitido por el relé. En la conexión de las corrientes se colocó un suiche trifásico para el relé 1 para tener la opción de que las corrientes no pasen por el relé (en la posición 2 de la figura 16), y por consiguiente no detecte la falla, y así simular una no operación de este relé.

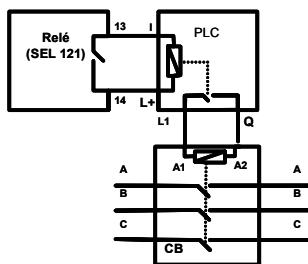


Figura 17. Conexión de salidas del relé al PLC y al interruptor.

Una vez realizado el montaje general del laboratorio, se desarrollaron varias combinaciones de diagnóstico:

- Correcta operación de todos los dispositivos de protección.
 - No operación de un relé.
 - Falla al operar de un interruptor.
 - Operación errónea de un interruptor.
 - Operación errónea de un relé.

4 CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

Al realizar la combinación de técnicas (Redes de Petri y sistema basado en reglas), el método implementado obtiene mayor ventaja frente a otros, ya que utiliza lo mejor del sistema superficial (ejecutar pocas reglas para la obtención del diagnóstico) y del sistema a base del modelo (obtiene la operación de los dispositivos, y deja el diagnóstico final para las reglas), qué son las técnicas más empleadas en el diagnóstico de fallas.

El tiempo de diagnóstico en las pruebas simuladas fueron de 1148 y 167 milisegundos respectivamente en un computador normal (Pentium IV), lo que muestra el rápido tiempo de inferencia que presenta el método desarrollado, y se debe a que emplea una simple manipulación de matrices, contrario a otros que realizan extensas búsquedas en bases de datos donde se almacena el

conocimiento del experto del sistema. A este tiempo se le debe añadir el que toma el programa en leer la base de datos, que por lo general está entre uno y tres segundos aproximadamente, por consiguiente el tiempo total de la obtención de una hipótesis frente a una falla en el sistema no es mayor de 6 segundos. Además debe mencionarse la similitud de los resultados para las dos pruebas realizadas, indicando un acertado diagnóstico tanto en el primer como en el segundo nivel de diagnóstico.

Para un mejor desempeño en el tiempo de diagnóstico se recomienda realizar el programa del modelo descrito en un lenguaje de alto nivel, e implementarlo con un procesador dedicado al proceso de inferencia.

La utilización de las redes de Petri en el modelo escogido para el desarrollo del programa fue clave, ya que debido a su sencillez se pudieron representar secciones del sistema de transmisión por lugares, y los eventos que ocurrían en éste mediante transiciones. Ésta ventaja ayudó mucho a realizar el programa del modelo, ya que los sistemas de transmisión están formados por componentes semejantes (una línea está protegida por dos relés, uno a cada extremo y una barra está protegida por el mismo número de líneas que tiene asociadas) y a la hora de realizar el modelo de un sistema dado, es solo añadir los componentes mencionados anteriormente que se requieran. También, ante un cambio en el sistema de transmisión para el cual se realizó el modelo, es solamente añadir los cambios introducidos al sistema en la forma de componentes ya mencionada.

El sistema se va a implementar en la subestación Ancón Sur perteneciente a Interconexión Eléctrica S.A. (ISA), en donde se va a realizar un diagnóstico a nivel de subestación. Este tipo de diagnóstico es mucho más preciso que el realizado a nivel del centro de control, debido a que se posee información más detallada de la falla. Por consiguiente se deben hacer algunos cambios al programa para que se puedan incorporar señales análogas de voltaje y de corriente que permitan hacer un análisis de la falla.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se pudo llevar a cabo gracias a la financiación de la Dirección de Investigaciones Sede Medellín (DIME) de la Universidad Nacional de Colombia en el proyecto “Métodos formales para el diseño de controladores lógicos de sistemas dinámicos a eventos discretos”.

REFERENCIAS

1. **Cardozo, E. and Talukdar S. N.** A Distributed Expert System For Fault Diagnosis. IEEE Transactions on Power Systems, 3, 1988.
 2. **Chang, W. Y., Yang, H. T. and Huang, C. L.** Power System Distributed On Line Fault Section Estimation Using Decision Tree Based Neural Nets Approach. IEEE Transactions on Power Delivery, 10(1), 540-546, 1995.
 3. **Fukui, C. and Kawakami, J.** An Expert System For Fault Section Estimation Using Information From Protective Relay And CB. IEEE Transactions on Power Delivery, 1(4), 83-90, 1986.
 4. **Hadjicostis, C. and Verghese, G.** Power System Monitoring Using Petri Net Embeddings. IEEE

5. **Huang, Y. C.** Fault Section Estimation In Power Systems Using A Novel Decision Support System. IEEE Transactions on Power Systems, 17(2), 439-444, 2002.
6. **Kimura, T., Nishimatsu, S., Ueki, Y. and Fukuyama, Y.** Development Of An Expert System For Estimation Fault Section In Control Center Based On Protective System Simulation. IEEE Transactions on Power Delivery, 7(1), 167-172, 1992.
7. **Lee, H. J., Park, D. Y., Ahn, B. S., Park, Y. M., Park, J. K. and Venkata, S. S.** A Fuzzy Expert System For The Integrated Fault Diagnosis. IEEE Transactions on Power Delivery, 15(2), 833-838, 2000.
8. **Lo, K. L., Ng, H. S. and Trecat, J.** Power System Fault Diagnosis Using Petri Nets. IEE Proceedings C. Generation, Transmission and Distribution, 144 , 231-236, 1997.
9. **Yang, C. L. and Sekine, Y.** Fault Section Estimation Of Power System Using Colored And Timed Petri Nets. Electrical Engineering in Japan, 115(2), 89-101, 1995.
10. **System For The Integrated Fault Diagnosis.** IEEE Transactions on Power Delivery, 15(2), 833-838, 2000.
11. **Lo, K. L., Ng, H. S. and Trecat, J.** Power System Fault Diagnosis Using Petri Nets. IEE Proceedings C. Generation, Transmission and Distribution, 144 , 231-236, 1997.