

Modelado e implementación de un sistemas automático de detección y diagnóstico de fallas basado en redes de PETRI para el proceso hogar en la generación de vapor

Modeling and implementation of an automatic detection systems and fault diagnosis based on petri nets for home process in steam generation

Marlon Mauricio Hernández Cely¹, Freddy Leal², José López

¹ Ingeniero Electrónico, M.Sc., Departamento de Electricidad y Electrónica, Grupo de Investigación en Automatización y Control GIAC, Universidad Francisco de Paula Santander, Santander, Colombia.

² Joven Investigador, Colciencias, Departamento de Electricidad y Electrónica, Grupo de Investigación en Automatización y Control GIAC, Universidad Francisco de Paula Santander, Norte De Santander, Colombia.

¹ Ingeniero Electrónico, M.Sc., Departamento de Electricidad y Electrónica, Universidad de Pamplona, Norte De Santander, Colombia.

Marlon25_3@hotmail.com

Freddy.alejandro.leal@hotmail.com

jlloprado@hotmail.com

Resumen— En el área de Sistemas de Detección y Diagnóstico de Fallas (SDDF), se han encontrado grandes aportes basados en el uso de técnicas de modelado, este estudio trata de un método alternativo para el diseño automático de un Sistema de Detección y Diagnóstico de Fallas SDDF en procesos industriales. Por lo tanto, se propone cómo realizar el modelado y la implementación de algoritmos de sistemas de detección y diagnóstico de fallas en el proceso hogar del generador de vapor basado en redes de Petri bajo la norma IEC 61131-3.

Palabras claves—Caldera, Fallas, Red de Petri, Sobrecalentador

Palabras clave— In the area of Detection and Fault Diagnosis (SDDF) have found large contributions based on the use of modeling techniques, this study is an alternative method for the automatic design of System Detection and Fault Diagnosis SDDF in industrial processes. Therefore, we propose how to perform the modeling and implementation of algorithms for detection and diagnosis of failures in the home of the steam generator based on Petri nets under the standard IEC 61131-3.

Key Word — Boiler, failures, Home, Superheate

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo consiste en el desarrollo de un modelo basado en Redes de Petri aplicado al proceso del generador de vapor de Termotasajero Colgener, que sigue el método desarrollado por Lo, Ng y Trecat [1], el cual consiste en obtener un modelo de causalidad del elemento a diagnosticar, utilizando una red de Petri denominada red hacia adelante observar figura 1. Una vez obtenido este modelo, se invierte el sentido de los arcos de conexión, obteniéndose una red de Petri hacia atrás figura 2, [2]. La

importancia de estos métodos es permitir contar con algoritmos de control computacionalmente más eficientes, seguros y fáciles de implementar.

La construcción y funcionamiento del PLC es un tema estudiado en la literatura de [3], y su desarrollo se ha nutrido de los avances en microprocesadores, memorias y lenguajes de programación, con la diferencia de que el PLC está diseñado para ambientes hostiles donde la humedad, las vibraciones y el polvo son condiciones propias de los procesos de generación de vapor.

II. ESTADO DEL ARTE IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE PETRI EN LA INDUSTRIA CON EN EL PLC.

Las nuevas formas de implementación, se presentan en forma cronológica distintos trabajos que contribuyen al desarrollo de programas para PLCs [4], que se presentan a continuación.

En el año 1982, [5] establece las propiedades de los gráficos de marcados, que es una subclase de las Redes de Petri. Estudia la vivacidad de la Red, su seguridad, su Controlabilidad y el problema de su alcanzabilidad. En 1990, [6], proponen una nueva red llamada Red de Petri Controlable (CPN), que se utiliza para modelar un sistema dinámico de eventos discretos. En 1992 [7] realizó una revisión de los modelos gráficos existentes para modelar sistemas dinámicos de eventos discretos (DES). Menciono que los métodos gráficos con pocos tipos de objetos son mas fáciles de aprender que aquellos con muchos tipos de objetos. [8] en 1994, desarrollo un método para verificar la

operabilidad y seguridad de los controladores lógicos programables, inspirado en el método para prueba de protocolos de comunicación y de circuitos VLSI. [9] en 1995, propusieron un modelo híbrido general, al separar la planta a lazo abierto para construir un controlador híbrido. El sistema híbrido puede ser modelado por una PN híbrida. En 1997 [10], propusieron una metodología para diseñar, simular y codificar sistemas de control basados en PLC usando Redes de Petri, llamada PN-PLC, los autores proponen como implementar la red en un lenguaje de programación estándar definido dentro del estándar de programación IEC 1131-3. [11] en 1998 establece el control supervisor mediante una PN flexible para un proceso industrial por lotes. [12] en 2000, expandió el modelo de las redes de Petri interpretadas (SIPN) y desarrolló sus propiedades dinámicas y estáticas. En el año 2001, [13], presentó en su tesis doctoral cómo utilizar las Redes de Petri para automatizar procesos industriales. [14] en el 2002, estableció la necesidad de utilizar los estándares de desarrollo de software para asegurar la calidad del código generado para los PLC. Con base en los criterios de calidad de software definidos en la ISO/IEC 9126. [15] en el 2003, propusieron un nuevo método para modelar programas de PLC, al cual llaman SBSPN "Sensor Based Stage Petri Nets. [16] en 2004, propone la síntesis de un controlador de eventos discretos a partir de Redes de Petri y la teoría de regiones. [17] en el año 2005, propuso una nueva metodología para convertir las Redes de Petri controladas (CPN). [18] en 2006, propone una nueva aproximación para el diseño de controladores de automatismos secuenciales utilizando Redes de Petri.

III. SIMULACIÓN DEL SDDF EN REDES DE PETRI.

Las definiciones siguientes son dadas por, [19].

A. Red de Petri ordinaria no marcada:

Es una 4-tupla $Q = [P, T, Pre, Post]$, donde:

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ es un conjunto finito de lugares.

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ es un conjunto finito de transiciones.

$P \cap T = \emptyset$ y $P \cup T \neq \emptyset$, los conjuntos P y T son disjuntos.
 $Pre: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ es la aplicación de la entrada de incidencia.

$Post: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ es la aplicación de la salida de incidencia.

$Pre(P_i, T_j)$ es el peso del arco $P_i \rightarrow T_j$; el peso es de 1 si el arco existe y 0 si no.

$Post(P_i, T_j)$ es el peso del arco de $T_j \rightarrow P_i$.

B. Red de Petri generalizada no marcada:

Se define como una red de Petri ordinaria no marcada, excepto que:

$Pre: P \times T \rightarrow N$

$Post: P \times T \rightarrow N$

Donde N es el conjunto de los números naturales.

Se utiliza la siguiente notación:

$T_j = \{P_i \in P \mid Pre(P_i, T_j) > 0\}$ = conjunto de lugares de entrada de T_j

$T_j^o = \{P_i \in P \mid Post(P_i, T_j) > 0\}$ = conjunto de lugares de salida de T_j

$P_j = \{T_j \in T \mid Post(P_i, T_j) > 0\}$ = conjunto de transiciones de entrada de P_i

$P_j^o = \{T_j \in T \mid Pre(P_i, T_j) > 0\}$ = conjunto de transiciones de salida de P_i

C. Red de Petri marcada:

Es un par $R = [Q, M_o]$, donde Q es una red de Petri no marcada y M_o es la marca inicial.

Con el uso de álgebra lineal para el análisis de redes de Petri, se introduce un cierto formalismo matemático, aplicable a las redes de Petri ordinarias y generalizadas.

D. Red de Petri pura:

Una red de Petri es una red pura, si no existe ninguna transición que tenga un lugar que sea al mismo tiempo de entrada y salida de la transición:

$$\forall t_j \in T, \forall p_i \in P, Pre(p_i, t_j) Post(t_j, p_i) = 0 \quad (1)$$

E. Matriz de incidencia:

Para una red de Petri N con n transiciones y m lugares, la matriz de incidencia $A = [a_{ij}]$ es una matriz de $n \times m$, y sus entradas típicas son dadas por:

$$a_{ij} = a_{ij}^+ - a_{ij}^- \quad (2)$$

Donde $a_{ij}^+ = w(i, j)$ es el peso del arco de la transición i a su lugar de salida, j y $a_{ij}^- = w(j, i)$ es el peso del arco de la transición i a su lugar de entrada j . A continuación se muestra matriz de incidencia A , de la Figura 2.

$$A = \begin{matrix} \begin{matrix} \text{DCRT} \\ \text{DPH} \\ \text{PDB} \\ \text{NBD} \\ \text{PSVS} \\ \text{TSVS} \\ \text{PES} \\ \text{FVS} \\ \text{AAPH} \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

F. Ecuación de estados:

A partir de la matriz de incidencia se pueden obtener los estados siguientes de la red, conociendo qué transición será disparada y el estado actual de la red. Esto se puede realizar aplicando la ecuación 3, [5]:

de los lugares y el disparo de las transiciones a medida que pasa el tiempo tanto del lugar AAPH y la transición PSH 51541 hasta el lugar DCRT y la transición PSH 52402, figura 3 de igual forma del lugar DCRT y la transición PSH 52402 hasta AAPH PSH 52401 figura 4.

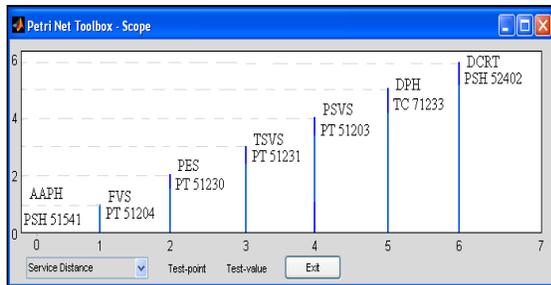


Figura 3. Simulación en PNToll de Matlab

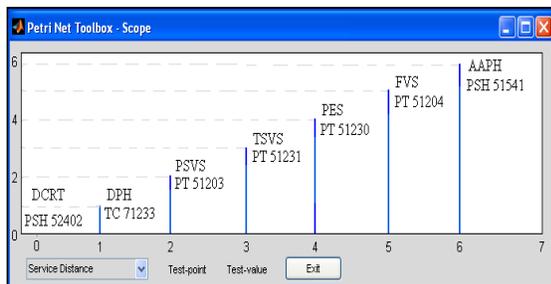


Figura 4. Simulación en PNToll de Matlab

IV. IMPLEMENTACIÓN TECNOLÓGICA DEL SISTEMA SDDF BASADO EN PLC

A. Software o lenguaje de programación

El software que se utilizara para el lenguaje ladder será el RSLogix 500. El **RSLogix 500** es el software destinado a la creación de los programas de la autómatas en lenguaje de esquema de contactos o también llamado lógica de escalera (**Ladder**). Incluye editor de **Ladder** y verificador de proyectos (creación de una lista de errores) entre otras opciones. Este producto se ha desarrollado para funcionar en los sistemas operativos Windows. Además, cumple con los criterios de calidad de software definidos en el ISO/ IEC 9126,

B. Norma para la implementación del lenguaje en el PLC ALLEN BRADLEY familia SLC-500.

C. Norma IEC 61131-3 del 2003: Estandarización en la programación del control industrial.

Esta norma define cuatro lenguajes de programación normalizados. Esto significa que su sintaxis y semántica ha sido definida, no permitiendo particularidades distintivas (dialectos).

Literales:

- Lista de instrucciones (Instruction List, IL).
- Texto estructurado (Structured Text, ST).

Gráficos:

- Diagrama de contactos (Diagram Ladder, LD).
- Diagrama de bloques funcionales (Function Block Diagram, FBD).

Según la norma IEC 61131-3 el diagrama escalera (LADDER), de la figura 2, es el representado en la figuras 5, donde se observa la implementación de la red de Petri para la etapa alta presión en el hogar en un PLC ALLEN BRADLEY FAMILIA SLC-500 bajo el software RSLogix 500.

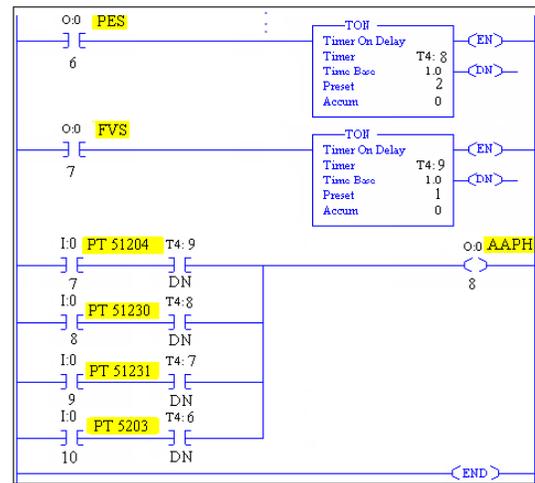
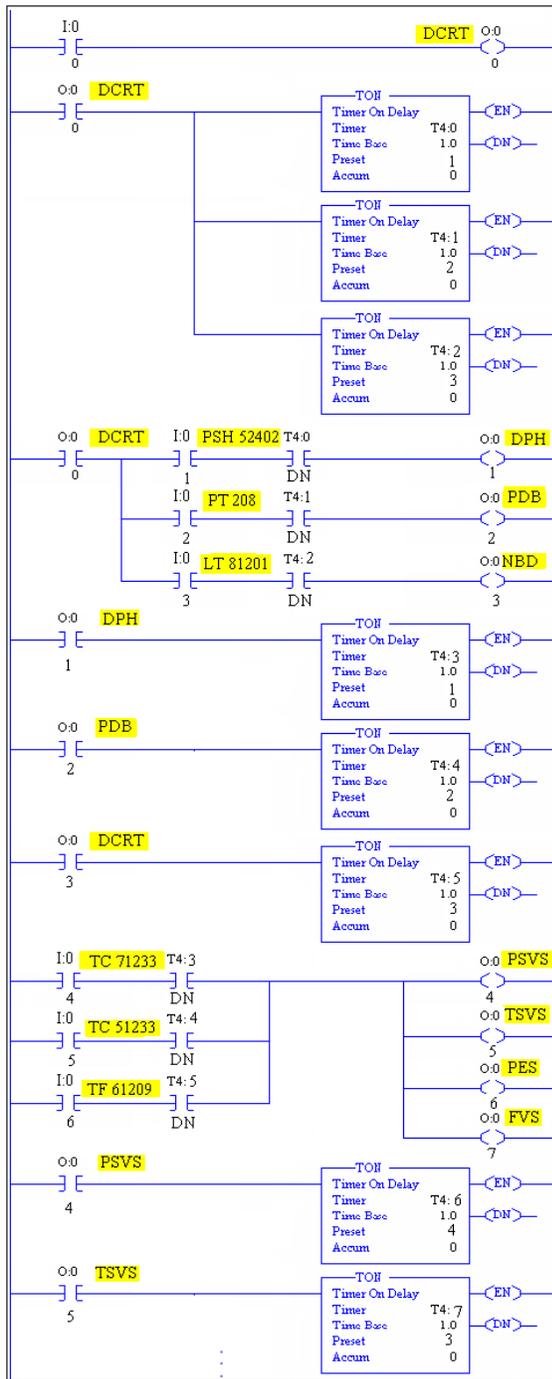


Figura 5. Implementación de la red de Petri en el software RSLogix 500.

Las ecuaciones algebraicas que modelan el diagrama ladder de la figura 5 están definidas de la siguiente forma:

- $DCRT.PSH\ 5202.(T4:0) = DPH$ (4)

- $DCRT.PT\ 208.(T4:1) = PDB$ (5)

- $DCRT.LT\ 81201.(T4:2) = NBD$ (6)

- $TC\ 71233.(T4:3) + TC\ 51233.(T4:4) + TF\ 61209.(T4:5) = PSVS + TSVS + PES + FVS$ (7)

- $PT\ 51204.(T4:9) + PT\ 51230.(T4:8) + PT\ 51231.(T4:7) + PT\ 5203.(T4:6) = AAPH$ (8)

Para validar la red de Petri para el SDDF se simuló en la toolbox de Matlab PNTTool; y el programa implementado en ladder bajo el estándar IEC 61131-3 se simuló en el RSLogix 500, con datos de operación reales del proceso en hogar del generador de vapor, además la secuencia de disparo de las transiciones y superación de los umbrales establecidos concuerdan con exactitud con la secuencia de operación en el hogar y la alcanzabilidad de la red de Petri para el SDDF en el proceso de hogar, ver figura 6. Las fallas encontradas en el proceso mediante la red de Petri consistieron en roturas de tubos en el sobrecalentador de la caldera.

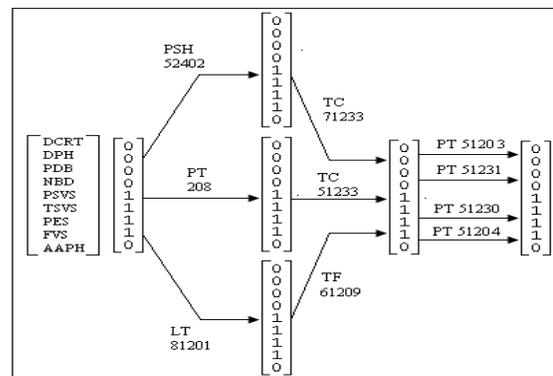


Figura 6. Árbol de alcanzabilidad de la red de Petri para el SDDF en el hogar.

Con este árbol de alcanzabilidad de la figura 6, se puede apreciar que comportamiento dinámico que tendrán las

transiciones y lugares al producirse una falla en el hogar de la caldera. De esta forma, de una secuencia de disparos resultará una secuencia de marcados, luego un marcado M_n (AAPH) es alcanzable a partir de M_0 (DCRT), si existe una secuencia de disparos que a partir de M_0 (DCRT), nos lleve a M_n (AAPH). Una secuencia de disparos la denotaremos por $\sigma = PSH\ 52402, PT\ 208, LT\ 81201, \dots, tn(PT51204)$. En este caso M_n (AAPH) es alcanzable desde M_0 (DCRT), sii $\exists \sigma$ t.q. M_0 (DCRT) $[\sigma] M_n$ (AAPH). Ver figura 6

V. CONCLUSIONES

El sistema de diagnóstico en redes de Petri implementado permite una rápida detección e identificación de las fallas en el hogar de la caldera consideradas en el diseño. Asimismo, la representación cualitativa del modelado basado en redes de Petri, lo hace fácilmente extensible a un conjunto de fallas tan grande como se pretenda alcanzar o bien, fácilmente aplicable a los distintos niveles de operación de la del proceso en el generador de vapor, con el único requerimiento de reajustar los umbrales de detección por medio de la interfaz hombre maquina (HMI).

Este artículo permite una visión de las redes de Petri vinculadas con los PLCs. Además, crea conciencia en el lector sobre el impacto de las mismas en el diseño e implementación de algoritmos de control para controladores lógicos programables.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la empresa Termotasajero Colgener por la colaboración y asesoría se agradece al grupo REYCON y a los ingenieros Diego Fernando Feged Veles y Gerson Rodríguez, Lenin Salazar y a los técnicos Leivi Maldonado y Lorenzo Arias.

REFERENCIAS

- [1] Lo, K.L., H. S. Ng y J. Trecat (1997). Power systems fault diagnosis using Petri nets. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, IEE proceedings online, Vol. 144, pp. 231-236.
- [2] Suárez C., D. A. Alfredo Sánchez L, J. E. Martínez P. y García B., C. D. (2006). Diagnóstico de fallas en el generador de vapor de una termoeléctrica usando redes de Petri.
- [3] G. Frey June (2000) "Automatic Implementation of Petri nets based control algorithms on PLC" Proceedings of ACC, pp 2819-2823.
- [4] Murillo S., L. D. (2008) Redes de Petri: Modelado e implementación de algoritmos para autómatas programables **Tecnología en Marcha**, Vol. 21, N.º pp. 102-125
- [5] T. Murata. 1982 "Petri nets and Marked Graphs. Mathematical models of concurrent computation". The American Mathematical Monthly, Vol. 89, No. 8, pp 552-566.
- [6] L. E. Holloway, B. H. Krogh. 1990. "Synthesis of feedback control logic for a class of controllers Petri nets". IEEE Transactions on Automatic Control. Vol. 35, No. 5, pp 514-523.
- [7] L.W. Schruben. 1992 "Graphical model structures for discrete event simulation". Proceeding of the winter simulation conference. Ed J.J Swain.
- [8] I. Moon. April (1994). "Modeling programmable logic controllers for logic verification". IEEE Control Systems Magazine, pp 53-59.
- [9] S. Pettersson, B. Lennartson. 1995. "Hybrid Modeling Focused on Hybrid Petri Nets". *European Workshop on Hybrid Systems*, Grenoble (Fr), pp 303-309.
- [10] A. Taholakanian, W. M. Hales. 1997. "PN \leftrightarrow PLC: A methodology for designing, simulating and coding PLC based control system using Petri nets" *International Journal In Production Research*, Vol. 35, No. 6 pp 1743-1762.
- [11] G. Mušič, D. Matko. 1998. "Petri nets based supervisory control of flexible manufacturing plants" in *Prepr. 8th IFAC Symp. On large Scales Systems: Theory & Applications*, Vol. 2, Rio Patras, Greece.
- [12] G. Mušič, D. Matko. 1998. "Petri nets based supervisory control of flexible manufacturing plants" in *Prepr. 8th IFAC Symp. On large Scales Systems: Theory & Applications*, Vol. 2, Rio Patras, Greece.
- [13] E. Jiménez. 2001. *Técnicas de automatización avanzada en procesos industriales*. PhD Tesis. Ed. Serv. Publicaciones de la Universidad de la Rioja. Logroño.
- [14] G. Frey, L. Litz. 2000 "Formal methods in PLC programming." *Proceeding of IEEE SMC 2000*, Nashville, pp 2431-2435.
- [15] S. S. Peng, M. C. Zhou. 2003. "Sensor bases stage Petri nets modeling of PLC logic programs for discrete control design". *International Journal of Production Research*, Vol. 41, No. 3, pp 629-644.
- [16] M. Uzam. 2004. "Synthesis of feedback control elements for discrete events systems using Petri nets

models and theory of regions”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 24, No. 1-2, pp 48-69.

- [17] J. S. Lee, P. L. Hsu. April 2005. “A systematic approach for the sequence controller design in manufacturing systems”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 25, No. 7-8, pp 754-760.
- [18] G. Cansever, I. B. Kucukdemiral. 2006. “A new approach to supervisor design with sequential control Petri nets using minimization technique for discrete event systems”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 29, No. 11-12, pp 1267-1277.
- [19] David, R. and H. Alla (1992). Petri nets and grafcet: tools for modeling discrete event systems, Prentice Hall.