

DIAGNÓSTICO ACTIVO EN SISTEMAS AUTOMATIZADOS DE MANUFACTURA: ENFOQUE BASADO EN REDES DE PETRI INTERPRETADAS

ACTIVE DIAGNOSIS IN AUTOMATED MANUFACTURING SYSTEMS: AN INTERPRETED PETRI NET-BASED APPROACH

Josué Antonio Prieto Olivares

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
R21153083@aguascalientes.tecnm.mx

Elvia Ruiz Beltrán

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
eruib@aguascalientes.tecnm.mx

Carlos Renato Vázquez Topete

Tecnológico de Monterrey Campus Guadalajara, México
cr.vazquez@tec.mx

Jorge Luis Orozco Mora

Tecnológico Nacional de México / IT de Aguascalientes, México
jorge.om@aguascalientes.tecnm.mx

Recepción: 2/octubre/2023

Aceptación: 19/diciembre/2023

Resumen

En este trabajo se aborda el problema de Diagnóstico Activo de fallas en Sistemas Automatizados de Manufactura (AMS) mediante Redes de Petri Interpretadas (RPI). La propiedad de la diagnosticabilidad es deseable en AMS ya que garantiza la detección y localización de fallas en un tiempo finito. En sistemas que no cumplen esta propiedad, es posible atribuirla a través del diagnóstico activo, por tal motivo, se propone un algoritmo de diagnóstico activo para imponer la propiedad de la diagnosticabilidad en Sistemas de Eventos Discretos (SED) modelados como RPI mediante el uso de un control supervisor que se implementa en un AMS simulado en Factory IO.

Palabras Clave: Diagnóstico activo, Diagnosticabilidad, Factory IO, Redes de Petri, Sistemas de manufactura.

Abstract

In this work, the problem of Active Fault Diagnosis in Automated Manufacturing Systems (AMS) is addressed using Interpreted Petri Nets (IPN). The property of diagnosability is desirable in AMS as it ensures the detection and location of faults within a finite time. In systems that do not satisfy this property, it is possible to attribute through Active Diagnosis. Therefore, Active Diagnosis algorithm is proposed to enforce the diagnosability property in Discrete Event Systems (DES) modeled as IPN, using a supervisory control implemented in a simulated AMS in Factory IO.

Keywords: *Active diagnosis, Diagnosability, Factory IO, Manufacturing systems, Petri nets.*

1. Introducción

En los últimos años y gracias al avance de la tecnología los AMS se vuelven cada día más complejos con elementos de distintas naturalezas interactuando entre sí (mecánicos, eléctricos, neumáticos, entre otros). Ciertamente las fallas en estos sistemas se consideran inevitables y la implementación de un esquema de diagnóstico de fallas se hace después del diseño del sistema, incluso sin saber si dicha falla se puede diagnosticar. La propiedad de la diagnosticabilidad en un sistema indica si una falla se puede detectar y aislar [Ruiz, 2018]. El problema consiste en imponer esta propiedad en los SED, al conjunto de técnicas para imponer diagnosticabilidad se le llama diagnóstico activo [Sampath, 1998]. En la literatura existen dos tipos de aproximaciones para imponer diagnosticabilidad. La primera consiste en confinar el lenguaje de la planta mediante la modificación estructural del sistema y el segundo enfoque es utilizando el control.

Cronológicamente uno de los primeros trabajos de diagnóstico activo es de [Sampath,1998] que impone la diagnosticabilidad mediante la modificación estructural del modelo desde el punto de vista de los autómatas finitos. Años más tarde se implementó esta metodología desde el enfoque de las Redes de Petri (RP). En [Basile, 2015] y [Ran, 2019] mediante la solución de un problema de programación lineal se encuentra el número y la colocación óptima de sensores para

forzar la diagnosticabilidad en el sistema a través del mínimo conjunto de transiciones observables que asegura la diagnosticabilidad.

La segunda aproximación es mediante la implementación de un supervisor (controlador) el cual se ejecuta en paralelo con la planta con el fin de inhibir todos los comportamientos no diagnosticables que el sistema pudiera tener. Por otro lado, [Hernández, 2015] propone un enfoque para imponer la propiedad de diagnosticabilidad en una clase de redes de Petri utilizando un controlador llamado circuito de regulación. La solución estructural se obtiene añadiendo lugares extras a la red para restringir el disparo de algunas transiciones. Más tarde [Hernández, 2018] presenta una propuesta de diagnosticabilidad activa a través de un circuito de regulación inteligente enfoque menos agresivo con el lenguaje de la red.

En [Hu, 2019] y [Hu, 2021] el comportamiento de inactividad es considerado como falla. Para evaluar la diagnosticabilidad y conocer los estados de inactividad llamados Q se propone un diagnosticador Q , este esquema identifica los estados de inactividad y las transiciones que te llevan a ellos. La solución instruye al control supervisor a desactivar aquellas transiciones que llevan a los estados de inactividad cuando este se encuentra en estados previos.

En este trabajo se estudia, diseña e implementa un algoritmo de diagnóstico activo desde el enfoque de las RPI en AMS simulado en Factory IO.

2. Métodos

Se presentan algunos conceptos básicos de redes de Petri que se utilizan para modelar y analizar los SED. Las definiciones fueron tomadas de [Guevara, 2019].

Redes de Petri

- **Definición 1.** Una red de Petri (RP) es un grafo bipartito representado por una 4-tupla $G = (P, T, I, O)$ donde $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ es un conjunto finito de lugares, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_o\}$ es el conjunto finito de transiciones. $I: P \times T \rightarrow Z \geq 0$ es una función que representa el peso de un arco que conecta lugares a transiciones, $O: P \times T \rightarrow Z \geq 0$ es una función que representa el peso de un arco que conecta transiciones con lugares. $Z \geq 0$ los enteros no negativos.

Gráficamente, los lugares están representados por círculos, las transiciones por rectángulos y los arcos por flechas. Las funciones I y O están caracterizadas por $|P| \times |T|$ matrices pre y post, respectivamente, sea $pre[i, j] = I(p_i, t_j)$ y $post[i, j] = O(p_i, t_j)$. La matriz de incidencia de una RP es $|P| \times |T|$ matriz C definida como $C[i, j] = post[i, j] - pre[i, j]$. Un marcado $M: P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$ es una función que asigna un número entero no negativo, es decir, el número de marcas que residen dentro de un lugar. M_0 es el marcado inicial. Una RP es una estructura $N = (G, M_0)$.

Una transición t_j se dice que está habilitada en el marcado M_k si este tiene $M_k(p_i) \geq I(p_i, t_j)$ marcas en cada lugar p_i de entrada a t_j . El disparo de una transición habilitada t_j remueve $I(p_i, t_j)$ marcas de p_i y añade $O(t_j, p_k)$ marcas a p_k , este evento genera un nuevo marcado M_{k+1} , es decir $M_k \xrightarrow{t_j} M_{k+1}$.

El marcado alcanzado también puede ser calculado mediante la ecuación fundamental $M_{k+1} = M_k + C\vec{\sigma}$, donde C es la matriz de incidencia y $\vec{\sigma}$ es el vector de Parikh definido como el vector del tamaño de $|T|$ tal que $\vec{\sigma}[j] = k$ si t_j es disparado k veces en una secuencia σ .

- **Definición 2.** Una Red de Petri Interpretada (RPI) es una séxtupla $Q = (G, M_0, \Sigma_I, \Sigma_O, \lambda, \varphi)$ donde (G, M_0) es una RP. Σ_I y Σ_O es el alfabeto de entrada y salida respectivamente, mientras que $\lambda: T \rightarrow 2^{\Sigma_I}$ es la función de etiquetado de entradas a transiciones y $\varphi: T \rightarrow 2^{\Sigma_O}$ es la función de etiquetado de lugares.

La evolución de una RPI es similar a una RP sólo se agregan algunas reglas de disparo:

- ✓ Un símbolo (evento) $a \in \Sigma_I$ puede ser indicado si este es activado por un dispositivo externo, controlador, sensor o usuario.
- ✓ Si $\lambda(t_j) = a$, se indica el evento a y t_j está habilitada, entonces se debe disparar.
- ✓ Si $\lambda(t_j) = a$, no se da el evento a entonces no se debe disparar.
- ✓ Si $\lambda(t_j) = a$, no se da el evento a entonces no se debe disparar.

✓ Si $\lambda(t_j) = \emptyset$, t_j está habilitada, entonces t_j se puede disparar en cualquier momento.

- **Definición 3.** Un sifón es un subconjunto de lugares $S = \{P_1, \dots, P_S\} \subseteq P$ de una RP tal que $\bullet S \subset S \bullet$.
- **Definición 4.** Sea (Q, M_0) una RP. Los vectores X_i tal que $CX_i = 0$, $X_i \geq 0$ son conocidos como T-semiflujos. El soporte de un T-semiflujo X_i , denotado $\langle X_i \rangle$, es el conjunto de transiciones $T_i = \{t_j | X_i(j) > 0\}$.
- **Definición 5.** Sea (Q, M_0) una RP. Los vectores Y_i tal que $Y_i C = 0$, $Y_i \geq 0$ son conocidos como P-semiflujos.

Diagnosticabilidad

[Ruiz, 2018] define formalmente la propiedad de la diagnosticabilidad para RPI. Las siguientes definiciones fueron extraídas de dicho trabajo, donde T^F y T^R son las transiciones de falla y regulares respectivamente, p_i^N son los lugares de comportamiento normal, $\Lambda^k(Q, M_f)$ es el conjunto de todas las secuencias entrada-salida del mismo tamaño que k y $\Lambda_B(Q, M_f)$ es el conjunto de todas las secuencias entrada-salida que no habilitan transiciones:

- **Definición 1.** Una RPI es diagnosticable entrada- salida en $k < \infty$ pasos si cualquier marcado $M_f \in F$ es distinguible de cualquier otro marcado $M_k \in R(Q, M_0)$ usando cualquier palabra $\omega \in \Lambda^k(Q, M_f) \cup \Lambda_B(Q, M_f)$.
- **Definición 2.** Sea (Q, M_0) una RPI modelada bajo el enfoque de [Ramírez, 2007]. Sea $X = \{X_1, \dots, X_\tau\}$ el conjunto de T-semiflujos mínimos de (Q, M_0) . Sea S cualquier sifón mínimo de la RPI, donde $p_i^N \in S$, $(p_i^N)^\bullet \cap T^F \neq \emptyset$, $|\{p_i^N\}| = 1$ y $\lambda((p_i^N)^\bullet \cap T^R) \neq \varepsilon$. Si $\forall X_r \in X$, $\|X_r\|$ comparte transiciones con S , entonces la RPI (Q, M_0) es diagnosticable.

Supervisor de Moody usando P-Invariantes

En [Moody, 1998] se propone el diseño de un control supervisor mediante un lugar monitor que es agregado al modelo del sistema, el objetivo del controlador es restringir marcados de la planta μ_p , ecuación 1.

$$L\mu_p \leq b \quad (1)$$

Donde μ_p es el marcado de la planta, $L \in \mathbb{Z}^{n_c \times n}$, b es un escalar y n_c es el número de restricciones. Para la solución del problema se utilizan las variables de holgura, ver ecuación 2, donde $\mu_c \in \mathbb{Z}^{n_c}$ es el vector entero que representa el marcado de los lugares de control, el subíndice p representa la planta mientras el subíndice c representa el controlador.

$$L\mu_p + \mu_c = b \quad (2)$$

Por otro lado, la matriz D_c contiene arcos que conectan los lugares de control a transiciones de la planta. La matriz de incidencia $D \in \mathbb{Z}^{(n+n_c) \times m}$ del lazo cerrado está dada por la ecuación 3.

$$D = \begin{bmatrix} D_p \\ D_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

El vector de marcados $\mu \in \mathbb{Z}^{n+n_c}$ y el marcado inicial μ_0 , ver ecuación 4.

$$\mu = \begin{bmatrix} \mu_p \\ \mu_c \end{bmatrix}; \mu_0 = \begin{bmatrix} \mu_{p0} \\ \mu_{c0} \end{bmatrix} \quad (4)$$

La ecuación 2 tiene la forma de un P-invariante. Por tal motivo se puede hacer una sustitución, ver ecuación 5 y 6. Donde $I \in \mathbb{Z}^{n_c+n_c}$ es la matriz identidad con los coeficientes de las variables holgadas definidas como uno.

$$X^T D = [L \quad I] \begin{bmatrix} D_p \\ D_c \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

$$LD_p + D_c = 0 \quad (6)$$

Propuesta de diagnóstico activo

En este trabajo se presenta el uso del control supervisor de Moody para imponer la diagnosticabilidad en un AMS. A diferencia de otros trabajos que requieren del cálculo de problemas de programación lineal o hacer una inversión monetaria para la compra de sensores en el sistema, la metodología propuesta se basa en el diseño de un control supervisor de Moody que puede implementarse en un Controlador Lógico Programable (PLC).

Para ejemplificar la metodología propuesta se presenta el modelo de un AMS que se encuentra en el Instituto Tecnológico de Aguascalientes (ITA). El primer paso es

modelar como RPI el AMS y analizar la propiedad de la diagnosticabilidad para un conjunto de fallas modeladas bajo el enfoque de [Ruiz, 2018], figura 1.

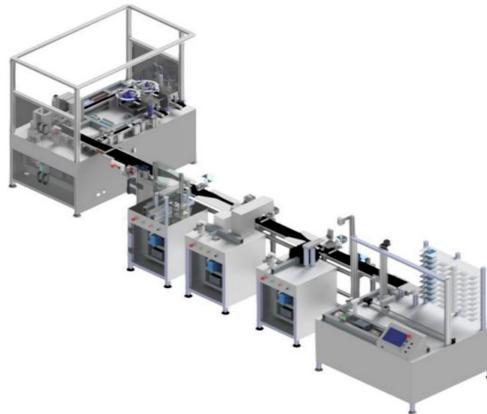


Figura 1 Sistema automatizado de manufactura del ITA.

En la figura 2 se muestra un esquema de distribución de sólo una parte de todo el sistema, esto con el fin de no extender el documento.

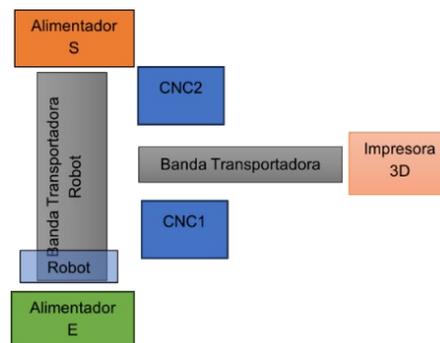


Figura 2 Esquema de la distribución del AMS.

El funcionamiento consiste en que las piezas llegan en bruto al alimentador de entrada (alimentador E), el robot montado en la banda transportadora se desplazada sobre la banda y toma la pieza para depositarla en el CNC 1, después de este proceso el robot retira la pieza del CNC 1 para depositarla al CNC2, al finalizar el maquinado, vuelve a tomar la pieza y la deposita en alimentador de salida (alimentador S). A la par del proceso, una máquina de impresión 3D crea las tapas de los recipientes, al finalizar la impresión, la pieza se desplaza por la banda

transportadora 3D para que el robot tome la tapa y la coloque en el alimentador de salida.

3. Resultados

En esta sección se describen los resultados obtenidos, desde el modelado del AMS en RPI, evaluación e imposición de la propiedad de la diagnosticabilidad y se finaliza con la implementación de un esquema de diagnóstico de fallas simulado en Factory IO interactuando con un PLC.

Modelado de AMS en RPI

[Ramírez, 2007] propone una metodología de modelado en RPI para los SED. El primer paso es identificar los elementos que interactúan en el sistema, las variables que participan en la dinámica y su rango, los nombres que se encuentran entre paréntesis sirven para colocar etiquetas en los modelos, tabla 1.

Tabla 1 Elementos del sistema automatizado de manufactura.

Elemento	Variable	Rango
Banda Transportadora Robot	Posición	{Superior (S1), centro (C1), inferior (I1)}
Robot	Posición	{Izquierda (I2), centro (C2), derecha (D2)}
Efector final robot	Estado	{Libre (L3), ocupado (O3)}
CNC1	Estado	{Libre (L4), ocupado (O4)}
CNC2	Estado	{Libre (L5), ocupado (O5)}
Impresora 3D	Estado	{Libre (L6), ocupado (O6)}
Alimentador E	Estado	{Libre (L7), ocupado (O7)}
Alimentador S	Estado	{Libre (L8), ocupado (O8)}
Banda Transportadora 3D	Posición	{Inicio (I9), final (F9)}

En la figura 3 se presentan los modelos en RPI de cada uno de los elementos del sistema, con color azul se muestran las etiquetas de los rangos de las variables. En cada modelo se colocan etiquetas de sensores y actuadores, finalmente se establecen relaciones de composición síncrona (x_i) y permisiva (y_i), un lector interesado puede consultar el trabajo de [Ramírez, 2007] con el fin de obtener más detalles de la metodología. La figura 4 representa el modelo completo del AMS y un grupo potencial de fallas (lugares y transiciones de color rojo). Cabe destacar que el modelo de robot y banda transportadora robot no fueron relacionados ya que no presentaron relaciones de sincronía o permisión. La relación de estos modelos

aislados se da cuando hacen un lazo cerrado con, por ejemplo, un control por regulación [Guevara, 2019].

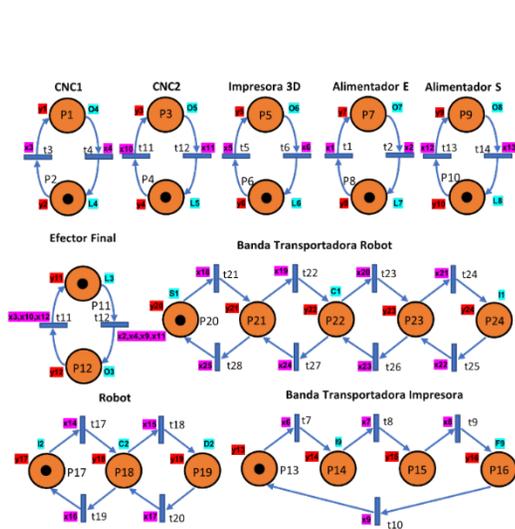


Figura 3 Modelo de cada elemento del sistema.

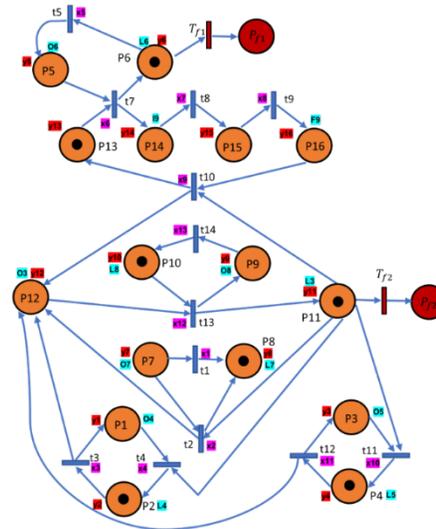


Figura 4 Modelo completo.

Análisis de la diagnosticabilidad

Para ejemplificar el análisis de la diagnosticabilidad, se optó por tomar sólo la parte del modelo donde interactúan la impresora 3D, la banda transportadora 3D y el efector final del robot, dichos modelos contienen dos fallas, T_{f1} y T_{f2} , figura 5. T_{f1} indica que la impresora 3D no pudo generar la pieza o el filamento se atascó, mientras que T_{f2} representa que el efector final del robot no pudo tomar la pieza o bien el robot no recibió la señal para accionar su efector final.

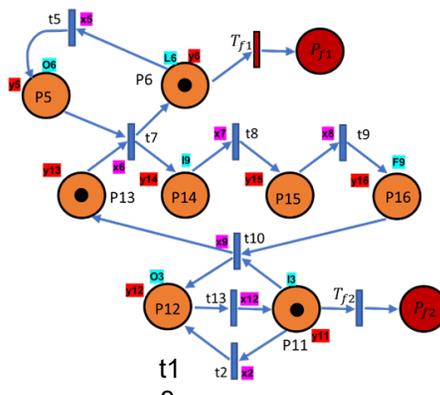


Figura 5 Modelo reducido no diagnosticable.

Para fines prácticos el vector M_k tendrá el valor de la cantidad de marcas que tiene cada lugar p_n , $M_k = [p_5 p_6 p_{11} p_{12} p_{13} p_{14} p_{15} p_{16}]$. Bajo la caracterización de [Ruiz, 2018] la falla T_{f2} es diagnosticable ya que cada T- invariante se relaciona con el sífon $W_1 = \{p_{11}, p_{12}, p_{f2}\}$, cuando el sífon se desmarca debido al disparo de T_{f2} el invariante $\langle X_1 \rangle = \{t_5, t_7\}$ no se disparará infinitamente. Por otro lado, la falla T_{f1} es no diagnosticable debido a que el T- invariante $\langle X_2 \rangle = \{t_2, t_{13}\}$ no se relaciona vía transiciones con el sífon $W_2 = \{p_5, p_6, p_{f1}\}$, si se dispara la falla T_{f1} , X_2 podría dispararse infinitamente.

Diagnóstico activo con supervisor de Moody

El control supervisor se basa en el uso de monitores que resultan del planteamiento de una restricción [Moody, 1998]. Para este tipo de modelo no diagnosticable de la figura 5, se pueden generar restricciones de comportamiento, por ejemplo, $M(P_5) + M(P_{11}) \geq 1$, es decir, que el número de marcas del lugar P_5 sumado al número de marcas de P_{11} sea mayor o igual a uno. Actualmente, nos encontramos buscando una regla de asignación para forzar la diagnosticabilidad en los lugares de la red ya que la propuesta actual consiste en establecer una restricción y evaluar nuevamente la diagnosticabilidad, dicho proceso se ve resumido en la figura 6.



Figura 6 Diagrama de flujo de trabajo.

Para imponer diagnosticabilidad en el sistema se tiene que establecer una restricción que cree una dependencia del T- invariante $\langle X_2 \rangle = \{t_2, t_{12}\}$ vía

transiciones con el sifón $W_2 = \{p_5, p_6, p_{f1}\}$. La ecuación 7 muestra la restricción que vuelve al sistema diagnosticable misma que aún se está trabajando en un algoritmo que encuentre una metodología de elección de restricción más rápida. En la ecuación 8 se agrega la variable de holgura para dar solución al problema, dicha ecuación contiene el nuevo lugar monitor P_x . El valor de 3 tiene que ver con que no se desea que sean más de las marcas que ya se encuentran en el modelo de RPI.

$$M(P_6) + M(P_{12}) + M(P_{13}) + M(P_{14}) + M(P_{15}) + M(P_{16}) \geq 3 \quad (7)$$

$$M(P_6) + M(P_{12}) + M(P_{13}) + M(P_{14}) + M(P_{15}) + M(P_{16}) + M(P_x) = 3 \quad (8)$$

La obtención del nuevo lugar debe cumplir la siguiente ecuación, es decir, el nuevo lugar tiene que formar parte de un P-invariante, anulador izquierdo de la matriz de incidencia, ecuación 9.

$$Y^T \cdot \begin{bmatrix} C \\ P_x \end{bmatrix} = 0 \quad (9)$$

Por tanto, tenemos:

$$[0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \\ t_5 & t_7 & t_8 & t_9 & t_{10} & t_{13} & t_2 \end{bmatrix} = 0$$

Obteniendo ecuación 10.

$$[-1 + t_5 \quad 1 + t_7 \quad t_8 \quad t_9 \quad 1 + t_{10} \quad -1 + t_{13} \quad 1 + t_2] = 0 \quad (10)$$

La solución a la ecuación 10, nos indica que para establecer dicha restricción el nuevo lugar deberá estar relacionado con las transiciones de la siguiente manera:

- $t_8 = t_9 = 0$ las transiciones no se relacionan con el nuevo lugar.
- $t_5 = t_{13} = 1$ las transiciones le quitan una marca al nuevo lugar P_x .
- $t_7 = t_{10} = t_2 = -1$ le darán una marca al nuevo lugar.

El cálculo del marcado inicial del nuevo lugar está definido por la ecuación 11, donde μ_{px} es el marcado inicial del nuevo lugar, b es el valor al que está igualado la

restricción, L Vector Y^T sin lugar P_x y μ_{p_0} el marcado inicial de la planta sin considerar el lugar P_x . En la ecuación 12 indica el marcado inicial del nuevo lugar.

$$\mu_{p_x} = b - L\mu_{p_0} \tag{11}$$

$$\mu_{p_x} = 3 - [0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = 3 - 3 = 0 \tag{12}$$

El planteamiento de la restricción general algunas relaciones para el nuevo lugar, gráficamente quedaría representado por la figura 7.

La falla que hacía al sistema no diagnosticable era T_{f1} , ya que el T-invariante que contiene t_2 y t_{13} se puede disparar de forma infinita, con ayuda del nuevo lugar monitor P_x , el sistema se vuelve diagnosticable. Supongamos que se dispara T_{f1} quitándole marca a p_6 y el marcado de la RPI es $M_{k+1} = [p_5 \ p_6 \ p_{11} \ p_{12} \ p_{13} \ p_{14} \ p_{15} \ p_{16} \ p_x] = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$, dicho marcado no permite el disparo de ninguna otra transición, por tal motivo la falla será diagnosticada en un número finito de pasos.

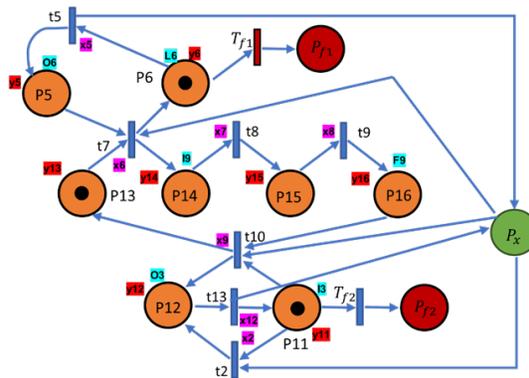


Figura 7 Monitor de Moody para forzar la diagnosticabilidad.

Validación de resultados con Factory IO y Fourier Motzkin

Con el fin de validar los resultados se diseñó en el software Factory IO una simulación del AMS, en la figura 8 se muestra una vista lateral del sistema que es

una réplica del AMS que se encuentra en el ITA. La figura 9 es una vista superior del sistema, en ella se encuentra los nombres con la equivalencia de los elementos que se presentaron en la figura 2 y finalmente, la figura 10 es la representación de la implementación del esquema de diagnóstico de [Paiva, 2021]. El sistema consta de un PLC conectado mediante un servidor OPC a Factory IO, el esquema de diagnóstico está implementado en el PLC. La ventaja de usar este esquema de diagnóstico es que sólo se basa en el disparo de transiciones para dar un veredicto sobre el estado del sistema, ya sea normal o de falla. Un lector interesado puede consultar a detalle el esquema de diagnóstico de [Al-Ajeli, 2021] y [Paiva, 2021].



Figura 8 AMS virtual.

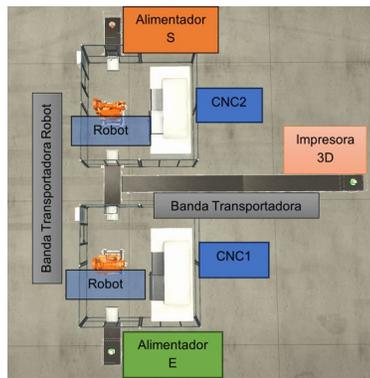


Figura 9 AMS virtual vista superior.

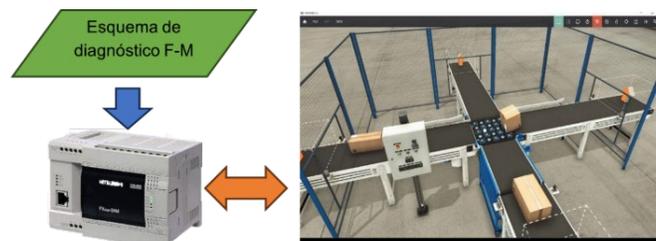


Figura 10 Esquema de implementación.

Con ayuda de instrucciones comparativas del PLC de la marca Mitsubishi y con el monitoreo del disparo de las transiciones que son comandos o señales de entrada al PLC se implementan contadores con el fin de realizar comparaciones de los disparos esperados con los deseados. Inicialmente se había concluido que el sistema era diagnosticable bajo la definición de [Ruiz, 2018], ahora con el esquema de diagnóstico se confirma dicha propiedad.

En la figura 11 se muestra el algoritmo de diagnóstico basado en F-M donde C_N y C_F son el conjunto de inecuaciones de comportamiento normal y de falla respectivamente, R_N y R_F son los conjuntos de inecuaciones después de aplicar el método de F-M. La siguiente definición del diagnosticador fue tomada de [Paiva, 2021].

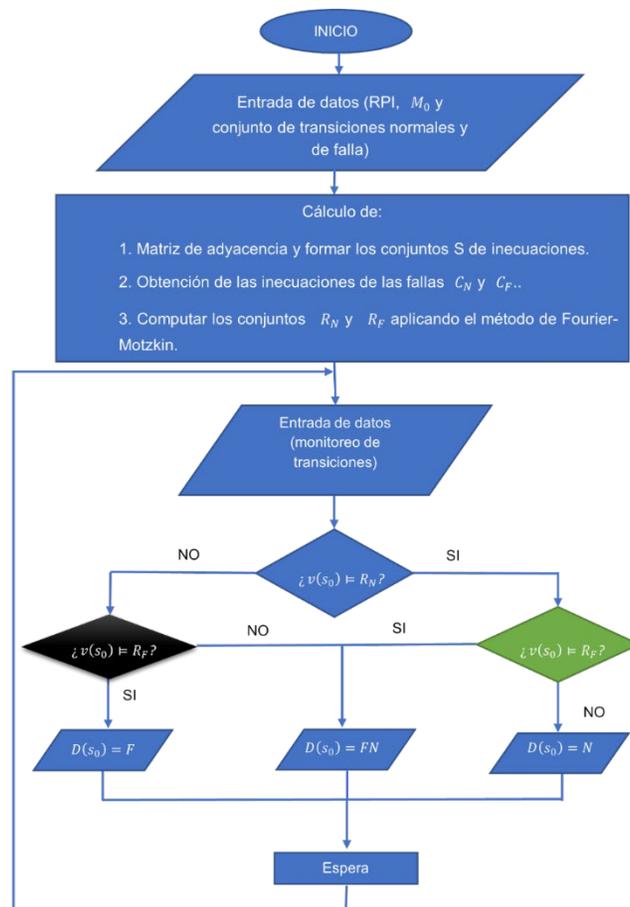


Figura 11 Algoritmo de diagnóstico de fallas mediante F-M.

Definición 3.4.1. Sea una secuencia $S \in L(N, M_0)$, $v(s_0)$ corresponde al número de veces que las transiciones asociadas se disparan. $D(s_0)$ corresponde al mapeo, encargado de establecer un juicio para el sistema (normal N , falla F o Falla/Normal FN). El diagnosticador en línea se basa en evaluar el conjunto de inecuaciones R_N y R_F , cual de ellos se ha cumplido, ecuación 14.

$$S_0 \mapsto D(S_0) = \begin{cases} N, & \text{si } v(S_0) \models R_N \text{ y } v(S_0) \not\models R_N \\ FN, & \text{si } v(S_0) \models R_N \text{ y } v(S_0) \models R_N \\ F, & \text{si } v(S_0) \not\models R_N \text{ y } v(S_0) \models R_N \end{cases} \quad (14)$$

4. Discusión

Basado en los resultados actuales se identifica que los lugares monitores que son agregados al modelo de RPI mediante el supervisor de Moody logra imponer la propiedad de la diagnosticabilidad, le metodología no resulta ser tan agresiva con las secuencias que puede generar la planta, es decir, el lenguaje de la planta sigue siendo el mismo y sólo en algunos marcados se restringe con el fin de asegurar que se cumpla la restricción propuesta.

El diagnóstico activo está relacionado con la propiedad de la diagnosticabilidad, si la falla es diagnosticable, el uso de cualquier esquema de diagnóstico será efectivo para identificar la falla. Las fallas propuestas en este documento son basadas en experiencias de usuario, por tal motivo son más apegadas a un contexto práctico. Este trabajo da una noción de como modelar AMS físicos tal y como lo propone [Guevara, 2019], aunque actualmente no se ha hecho experimentación de diagnóstico activo en el AMS real sólo se ha logrado simular mediante el software Factory IO y aplicar esquemas de diagnóstico de fallas en los sistemas virtuales.

5. Conclusiones

Con base en los resultados se ha demostrado que el uso del control supervisor de Moody puede imponer diagnosticabilidad en el modelo en RPI del sistema. Una de las principales contribuciones de este trabajo es que el diagnóstico activo en RPI utilizando como técnica el control supervisor de [Moody, 1998] actualmente no se

encuentra reportado en la literatura al igual que la aplicación en un sistema físico y simulado en Factory IO, a diferencia de otros trabajos que sólo modifican la estructura de la red, en este documento se proponen restricciones desde el enfoque del control, parte importante que no es considerada en trabajos de [Hernández, 2018], [Basile, 2015] y [Ran, 2019].

Como trabajo futuro se considera la creación de un algoritmo que encuentre la restricción adecuada para volver los sistemas diagnosticables, realizar experimentación en sistemas físicos y extender este trabajo a sistemas automatizados de manufactura descentralizados.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Al-Ajeli, Ahmed, y Parker David. Fault diagnosis in labelled Petri nets: A Fourier-Motzkin based approach. *Automatica*, 2021.
- [2] Basile, Francesco, Gianmaria De Tommasi, y Claudio Sterle. Sensors selection for K-diagnosability of Petri nets via Integer Linear Programming. *Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, 2015.
- [3] Guevara Lozano, Daniel, Carlos Renato Vázquez Topete, y Antonio Ramírez Treviño. Regulation Control of Discrete Event Systems for Industrial Automation. Guadalajara, 2019.
- [4] Hernández Rueda, Karen, M E Meda Campaña, y J Arámbulo Lizárraga. Enforcing Diagnosability in Interpreted Petri Nets. Guadalajara: International Federation of Automatic Control, 2015.
- [5] Hernández Rueda, Karen, María E Meda Campaña, y Bernardo Haro Martínez. Detección Activa de Faltas en Sistemas de Eventos Discretos. Guadalajara: Pistas Educativas, 2018.
- [6] Hu, Yihui, y Zhiwu Li. Active Diagnosis of Petri Nets Using Q-Diagnoser. *International Conference on Automation Science and Engineering*, n° 12, 2019.
- [7] Hu, Yihui, Ziyue Ma, Zhiwu Li, y Alessandro Giua. Diagnosability enforcement in labeled Petri nets using supervisory control. *Automatica*, n° 131, 2021.

- [8] Moody, John O, y Panos J Antsaklis. Supervisory Control of Discrete Event Systems Using Petri Nets. Nueva York: Springer Science+Business Media, 1998.
- [9] Paiva, Pedro, Braian Freitas, Lilian Cavalho, y Joao Basilio. Online fault diagnosis for Smart machines embedded in industry 4.0 manufacturing systems: A labeled Petri net based approach. IFAC Journal of Systems and Control, 2021.
- [10] Ramírez Treviño, Antonio, Elvia Ruiz Beltrán, y Ernesto López Mellado. Online Fault Diagnosis of Discrete Event Systems. A Petri Net-Based Approach. Guadalajara: IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2007.
- [11] Ran, Ning, Alessandro Giua, y Carla Seatzu. Enforcement of diagnosability in labeled Petri nets via optimal sensor selection. Automatic Control 64, nº 7, 2019.
- [12] Ruiz Beltrán, Elvia, Ramírez Treviño, Antonio, Orozco Mora, Jorge Luis. Formal Methods in Manufacturing: Fault diagnosis in Petri Nets. CRC Process, 2018.
- [13] Sampath, Meera, Stéphane Lafortune, y Demosthenis Teneketzis. Active Diagnosis of Discrete-Event Systems. Michigan: IEEE Transactions on Automatic Control, 1998.