

**TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AGUASCALIENTES**



**TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®**

**Ciencia y
Tecnología**

Secretaría de Ciencia, Humanidades,
Tecnología e Innovación



Instituto **Tecnológico®**
de Aguascalientes

DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Diagnóstico activo descentralizado

Tesis de Doctorado
Para obtener el título de:
Doctor en Ciencias de la Ingeniería

Presenta:
M.C. Josué Antonio Prieto Olivares

Directora
Dr. Elvia Ruiz Beltrán

Co-Director
Dr. Carlos Renato Vázquez Topete

Asesores
Dra. Jorge Luis Orozo Mora
Dr. J. Ascensión Guerrero Viramontes
Dr. Francisco Javier Villalobos Piña

Aguascalientes, Ags., México
Mayo 2025





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., 22/mayo/2025

No. De Oficio: 0223/2025

Asunto: Autorización de Tesis de Grado Para su Impresión

M.C. JOSUE ANTONIO PRIETO OLIVARES
PRESENTE

Los abajo firmantes, Miembros del Jurado para Examen de Grado de Doctorado, hacemos **CONSTAR** que, habiendo revisado el Trabajo de Tesis desarrollado por Usted, bajo el título: "**DIAGNÓSTICO ACTIVO DESCENTRALIZADO**" hemos dictaminado que éste es de aceptarse, por lo que se autoriza su impresión.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica.
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia.*

PRESIDENTE

Elvia Ruiz Beltrán.
DRA. ELVIA RUIZ BELTRAN

SECRETARIO

Jorge Luis Orozco Mora
DR. JORGE LUIS OROZCO MORA

VOCAL

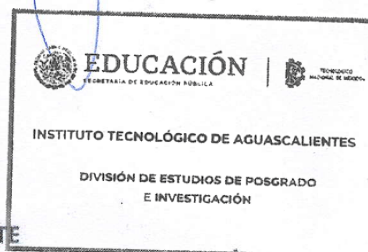
Francisco Javier Villalobos Piña
DR. FRANCISCO JAVIER VILLALOBOS PIÑA

VOCAL

J. Ascención Guerrero Viramontes
DR. J. ASCENCIÓN GUERRERO VIRAMONTES

VOCAL

Dr. Carlos Renato Vázquez Topete
DR. CARLOS RENATO VÁZQUEZ TOPETE



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Adolfo López Mateos #1801, Fracc. Bona Gens

C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127

e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx

tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., 21/mayo/2025
Asunto: Autorización de uso de derechos

PRIETO OLIVARES JOSUE ANTONIO, mayor de edad, con domicilio ubicado en **Primera Plaza Uxmal 107, número interior F, Infonavit Morelos, 20264, Aguascalientes, Aguascalientes** en mi calidad de titular y autor de la tesis denominada **"DIAGNÓSTICO ACTIVO DESCENTRALIZADO"** quien para todos los fines del presente documento se denominará **EL AUTOR Y/O TITULAR**, suscribo el presente documento de autorización de uso de derechos patrimoniales de autor a favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes el cual se registrá por las cláusulas siguientes:

PRIMERA – AUTORIZACIÓN: **EL AUTOR Y/O TITULAR**, mediante el presente documento autoriza la utilización de los derechos patrimoniales de autor al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, de la tesis denominada **"DIAGNÓSTICO ACTIVO DESCENTRALIZADO"**, a través del Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México (en lo sucesivo TecNM) y en el Repositorio Nacional, que puede ser consultado en la liga electrónica: (www.repositorionacionalcti.mx/).

SEGUNDA – OBJETO: Por medio del presente escrito, **EL AUTOR Y/O TITULAR** autoriza al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, a través del Repositorio Institucional del TecNM y en el Repositorio Nacional para que de conformidad con la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, use los derechos del documento antes referido, con fines exclusivamente académicos.

TERCERA – TERRITORIO: Los derechos aquí autorizados se dan sin limitación geográfica o territorial alguna.

CUARTA – ALCANCE: La presente autorización se da tanto para formato o soporte material, y se extiende a la utilización en medio óptico, magnético, electrónico, en red, mensajes de datos o similar conocido o por conocer, del ejemplar o número respectivo de la publicación.

QUINTA – EXCLUSIVIDAD: La autorización de uso aquí establecida no implica exclusividad en favor del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes. Por lo tanto, **EL AUTOR Y/O TITULAR** en su carácter de autor de la obra objeto del presente documento se reserva el derecho de publicar directamente, u otorgar a cualquier tercero, autorizaciones de uso similares o en los mismos términos aquí acordados.



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

SEXTA – DERECHOS MORALES (Créditos y mención): La Autorización de los derechos antes mencionados no implica la cesión de los derechos morales sobre los mismos por cuanto en conformidad con lo establecido en los artículos 18, 19, 20, 21, 22 y 23 de la Ley Federal de Derechos de Autor, dada la cuenta que estos derechos son inalienables, imprescriptibles, irrenunciables e inembargables. Por lo tanto, los mencionados derechos seguirán radicados en cabeza de EL AUTOR Y/O TITULAR, y siempre deberá mencionarse su nombre cuando se utilice la obra.

SÉPTIMA – AUTORIA: EL AUTOR Y/O TITULAR, declara y ratifica que el material objeto de la presente fue realizada por él o por ella sin violar o usurpar derechos de Propiedad Intelectual de terceros.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia

Vo.Bo.

PRIETO OLIVARES JOSUE ANTONIO
AUTOR DE LA TESIS

DRA. ELVIA RUIZ BELTRAN
DIRECTOR DE LA TESIS

ccp. Archivo



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Aguascalientes
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Aguascalientes, Ags., 21/mayo/2025
Asunto: Oficio de originalidad

**CLAUSTRO DOCTORAL
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
PRESENTE**

El director de tesis de el/la PRIETO OLIVARES JOSUE ANTONIO estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería con número de control R21153083 hace constar que, después de haber realizado la revisión del informe de originalidad generado con la herramienta Turnitin, el trabajo "DIAGNÓSTICO ACTIVO DESCENTRALIZADO" es original conforme a los criterios establecidos. El porcentaje de similitud es de 10 % y se adjunta resumen del reporte.

ATENTAMENTE

*Excelencia en Educación Tecnológica®
Ingenio, Cultura y Saber, que conducen a la Excelencia®*

Vo.Bo.

Elvia Ruiz Beltrán

**DRA. ELVIA RUIZ BELTRAN
DIRECTOR DE TESIS**

**DR. J. ASCENSIÓN GUERRERO VIRAMONTES
COORDINADOR DEL DOCTORADO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**

ccp. Archivo



2025
Año de
**La Mujer
Indígena**

Av. Adolfo López Mateos #1801. Fracc. Bona Gens
C.P. 20256 Aguascalientes, Ags. Tel. 449 910 5002 ext. 127
e-mail: jefatura.depi@aguascalientes.tecnm.mx
tecnm.mx | www.aguascalientes.tecnm.mx



Instituto Tecnológico
de Aguascalientes





Agradecimientos

Agradezco profundamente a mis asesores principales, integrado por mi directora de tesis, la Dra. Elvia Ruiz Beltrán, mi codirector, el Dr. Carlos Renato Vázquez Topete y mis asesores el Dr. Jorge Luis Orozco Mora, el Dr. J. Ascención Guerrero Viramontes y el Dr. Francisco Villalobos Piña, por sus invaluable apoyos durante el proceso de aprendizaje. La Dra. Elvia Ruiz Beltrán me brindó guía constante y compartió su valiosa experiencia en el área de diagnóstico de faltas ayudándome a fortalecer cada una de las etapas del proyecto, además de vincularme con instituciones como el Tecnológico de Monterrey Campus Guadalajara y el CINVESTAV Guadalajara donde curse materias relacionadas al tema de tesis. El Dr. Carlos Renato Vázquez Topete me ofreció un apoyo técnico crucial en todo lo referente a las implementaciones, marcando una diferencia significativa con su enfoque práctico y consejos precisos, aunado a ellos, nos abrió las puertas de su institución para un curso de automatización industrial en un sistema de manufactura donde pude comprender mejor los aspectos prácticos y técnicos de mi tema de tesis. Por su parte, el Dr. Jorge Luis Orozco Mora aportó una perspectiva crítica y me ayudó a identificar áreas de mejora en todo el proyecto en general, lo que fue esencial para alcanzar un nivel superior en esta investigación. Cada uno contribuyó de manera única y significativa, por lo que estoy agradecido por su tiempo, conocimiento y compromiso. Finalmente, de manera muy especial, agradezco también al Dr. Ascención Guerrero Viramontes y al Dr. Francisco Villalobos Piña, quienes fungieron como mis asesores a lo largo de este proceso. Ambos estuvieron presentes en cada uno de mis avances, brindándome retroalimentación constante, oportuna y siempre constructiva, lo cual fue fundamental para mejorar y consolidar mi trabajo de investigación. Además, su constante disposición para orientarme y apoyarme fue clave en mi desarrollo académico.

Finalmente, agradezco al TecNM / Instituto Tecnológico de Aguascalientes y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación, Secihti a través del apoyo 786532 por todo el soporte institucional brindado para la realización y conclusión de este proyecto doctoral.

Índice general

Agradecimientos	ii
Índice general	iii
Índice de figuras	v
Índice de tablas	vi
Glosario de términos.....	vii
Lista de símbolos.....	ix
Abreviaturas.....	x
Capítulo 1. Introducción.....	11
1.1 Estado del arte.....	12
1.1.1 Diagnóstico de faltas mediante Autómatas Finitos.....	13
1.1.2 Redes de Petri Interpretadas y modelado de Sistemas de Eventos Discretos (SED) 15	
1.1.3 Diagnóstico activo.....	17
1.2 Planteamiento del problema.....	19
1.2.1 Justificación.....	19
1.2.2 Objetivos.....	19
1.2.3 Objetivos específicos	19
Capítulo 2. Marco teórico	20
2.1 Sistemas de Eventos Discretos.....	20
2.2 Redes de Petri.....	20
2.3 Redes de Petri Interpretadas	22
2.4 Modelado de faltas permanentes.....	24
2.5 Diagnosticabilidad	24
2.6 Control supervisor	24
2.7 Método de eliminación Fourier Motzkin	25
Capítulo 3. Primera aproximación de Diagnóstico Activo.....	26
3.1 Modelado de sistema de manufactura en RPI.....	27
3.2 Análisis de la diagnosticabilidad en SAM del ITA.....	32
3.3 Diagnóstico activo con supervisor de Moody	33
3.4 Validación de resultados con software Factory IO y Fourier Motzkin	36
Capítulo 4. Segunda aproximación con Diagnóstico Activo.....	39
4.1 Segunda aproximación- modelo físico y sistema digital construido en software Factory IO.....	39

4.2	<i>Modelado de sistema físico o sistema digital en Redes de Petri Interpretadas</i>	43
4.3	<i>Análisis de la diagnosticabilidad</i>	46
4.4	<i>Imposición del Diagnóstico Activo</i>	46
4.5	<i>Resultados</i>	49
4.5.1	<i>Discusión</i>	50
Capítulo 5.	<i>Esquema de detección y localización de faltas en SED mediante RPI</i>	50
5.1	<i>Implementación de esquemas de diagnóstico de faltas mediante residuos</i>	51
5.2	<i>Diseño y fabricación de sistema embebido</i>	52
5.3	<i>Implementación</i>	56
5.3.1	<i>Caso de estudio</i>	57
5.4	<i>Discusión</i>	61
Capítulo 6.	<i>Conclusiones y recomendaciones</i>	61
Capítulo 7.	<i>Referencias bibliográficas</i>	63
Capítulo 8.	<i>Anexos</i>	68
8.1	<i>Laboratorio de pruebas</i>	68
8.2	<i>Códigos para pruebas de F-M</i>	69
8.2.1	<i>Programa de estación de transmisión de datos</i>	69
8.2.2	<i>Programa de estación de recepción de datos</i>	71
8.3	<i>Capacitaciones</i>	73
8.4	<i>Publicaciones y trabajos de colaboración</i>	73

Índice de figuras

Figura 1 Comportamiento de un SED.	12
Figura 2 Red de Petri Interpretada.	23
Figura 3 Red de Petri Interpretada con falta permanente.	24
Figura 4 Sistema automatizado de manufactura del ITA.	27
Figura 5 Esquema de la distribución del SAM.	28
Figura 6 Modelo de cada elemento del sistema.	30
Figura 7 Modelo completo con faltas permanentes.	31
Figura 8 Modelo reducido no diagnosticable.	32
Figura 9 Diagrama de flujo de trabajo.	33
Figura 10 Modelo de RPI diagnosticable basado en el lugar monitor.	35
Figura 12 SAM virtual vista superior.	36
Figura 11 SAM virtual en software Factory IO.	37
Figura 13 Esquema de implementación.	37
Figura 14 Algoritmo de diagnóstico de fallas mediante F-M.	38
Figura 15 Sistema Digital en Factory IO.	39
Figura 16 Vista Superior del modelo digital.	40
Figura 17 Vista Superior modelo físico.	41
Figura 18 Sistema eléctrico de control con PLC Mitsubishi serie Q.	42
Figura 19 Vista isométrica de SAM.	43
Figura 20 Modelos aislados en RPI.	45
Figura 21 Modelo Completo con faltas permanentes.	45
Figura 22 Diagnóstico Activo mediante supervisor de Moody.	49
Figura 23 Disparo de falta $Tf1$	50
Figura 24 Sistema embebido de medición de corriente y comunicación Modbus.	53
Figura 25 Arquitectura de diagnosticador.	54
Figura 26 Disposición para diagnóstico activo descentralizado.	54
Figura 27 Diferentes tamaños de cajas.	56
Figura 28 Disposición de sensores.	57
Figura 29 Laboratorio Digital para pruebas.	68
Figura 30 Sistema embebido no invasivo.	68
Figura 31 Sistema embebido y PLC Mitsubishi.	69
Figura 32 Constancia de participación SAM ITA.	73
Figura 33 Constancia de participación SENIE 2022.	74
Figura 34 Portada de revista Pistad Educativas SENIE 2022.	74
Figura 35 Constancia de ponencia UAA.	75
Figura 36 Constancia de participación SENIE 2023.	75
Figura 37 Portada de revista SENIE 2023.	76
Figura 38 Constancia de participación coloquio.	76
Figura 39 Correo de aceptación revista DYNA.	77

Índice de tablas

Tabla 1 Elementos que componen al sistema.	29
Tabla 2 Elementos que componen al sistema.	44
Tabla 3 Pseudocódigo del microcontrolador.	55
Tabla 4 Pseudocódigo del PLC.	56
Tabla 5 Valores registrados en un ciclo de escaneo.	59
Tabla 6 Valores registrados en un ciclo de escaneo segundo caso de estudio.	59

Glosario de términos

Análisis estructural: estudio de las propiedades inherentes a la estructura de un modelo de Red de Petri, basado exclusivamente en la disposición y conexiones entre lugares, transiciones, marcas y arcos. Permite identificar características como la conservación, persistencia, vivacidad, controlabilidad del sistema, entre otras.

Aislamiento de faltas: determinación del tipo, localización e instante de detección de una falta. Se realiza después de la etapa de detección.

Análisis de los efectos: consiste en el estudio de los efectos de una falta en un componente y de cómo éste se propaga por todo el sistema.

Control supervisor: es un enfoque para garantizar que un sistema modelado mediante una Red de Petri opere dentro de ciertos límites deseados, evitando estados no deseados como bloqueos, comportamientos no seguros o violaciones de restricciones del sistema.

Detección de faltas: determinación de la presencia de faltas en el sistema, así como el instante de su aparición.

Diagnóstico de fallas: determinación del tipo, tamaño, localización e instante de aparición de una falla. Incluye la detección, el aislamiento y la estimación de esta.

Diagnóstico activo: es una combinación entre observar y controlar. La palabra “control” en el diagnóstico de faltas hace referencia a la noción de testear o probar y es más un problema de diagnóstico fuera de línea.

Diagnóstico de faltas fuera de línea: se asume que el sistema está en un banco de pruebas y es probado ante posibles faltas.

Diagnóstico de faltas en línea: se asume que el sistema está operando y el diagnosticador se agrega como un subsistema que monitorea continuamente el comportamiento del sistema. Compara el comportamiento observado con el comportamiento normal esperado y detecta desviaciones que indican la presencia de una falta. La diferencia entre ambos comportamientos se interpreta como un error, que permite identificar, aislar y, en algunos casos, determinar la causa de la falla en tiempo real, facilitando una respuesta rápida para minimizar su impacto en la operación del sistema.

Estado de bloqueo en una Red de Petri: ocurre cuando la Red de Petri alcanza un marcado que no habilita ninguna transición para su disparo.

Estimación de la falla: determinación del tamaño y comportamiento de la falla a lo largo del tiempo.

Falta: desviación no permitida de, al menos, una propiedad característica de un sistema, de su condición aceptable, usual o estándar.

Falla: interrupción permanente de la capacidad de un sistema para realizar la función requerida.

Generación del residuo: determinación del residuo a partir del comportamiento de las entradas y salidas del sistema.

Handshake: En español "apretón de manos" es un proceso para establecer una conexión entre dos dispositivos o sistemas antes de que pueda iniciarse la comunicación normal.

Monitoreo: determinación discreta, asíncrona o continua en tiempo real del estado de operación de un sistema mediante el registro y análisis de información significativa e indicación de sus anomalías de comportamiento. Otros términos utilizados para este concepto son vigilancia y observación de estado.

Redundancia física o de hardware: es una estrategia utilizada en sistemas críticos para aumentar su fiabilidad y tolerancia a fallos mediante la duplicación o replicación de componentes físicos. Consiste en agregar elementos adicionales, como procesadores, sensores, actuadores o fuentes de alimentación, que puedan asumir la función de un componente en caso de falla. Esta redundancia permite que el sistema continúe operando sin interrupciones o con una degradación mínima del rendimiento.

Residuo: señal que contiene información de la falla basada en la desviación entre las medidas de las entradas y salidas del sistema (comportamiento real) y estimaciones obtenidas mediante un modelo (comportamiento modelado).

Sistema de Eventos Discretos (SED): sistema de estados discreto dirigido por un conjunto de eventos numerables, aunque posiblemente infinitos, su evolución depende enteramente de la ocurrencia de eventos discretos asíncronos sobre el tiempo.

Sistema tolerante a faltas: sistema que, ante la presencia de una falta, mantiene su función con o sin degradación de su desempeño, pero sin desembocar en una falla.

Transición pre-riesgo: es transición dentro de una Red de Petri que se activa antes de que ocurra un evento riesgoso. Su función es servir como una señal de advertencia que permite detectar condiciones que podrían generar faltas y proporciona la oportunidad de tomar medidas preventivas antes de que el problema evoque en una falla.

Transición post-riesgo: es una transición que se activa después de haber pasado una zona donde la transición de falta se puede disparar, indicando que la falta no se disparó. Su activación señala que el sistema ha logrado evitar o superar el potencial falta, funcionando como un indicador de que el sistema permanece operativo.

Lista de símbolos

- μ Marcado del vector de una Red de Petri.
- μ_0 Marcado inicial del vector de una Red de Petri.
- m El número de transiciones en la Red de Petri de la planta.
- n El número de lugares en la Red de Petri de la planta.
- p Un lugar de una Red de Petri.
- P El conjunto de lugares para una Red de Petri.
- $\bullet p$ El conjunto de transiciones con arcos de salida hacia el lugar p .
- $p \bullet$ El conjunto de transiciones con arcos de entrada desde el lugar p .
- q El vector de disparo de una Red de Petri. $q \in \mathbb{Z}^m$.
- s Vector de enteros no negativos cuyo soporte es un trampa o sifón. $s \in \mathbb{Z}^n$.
- S El conjunto lugares referidos a una trampa o sifón.
- $\bullet S$ El conjunto de transiciones con arcos de salida hacia todos los lugares en el conjunto S .
- $S \bullet$ El conjunto de transiciones que reciben arcos de entrada desde todos los lugares en el conjunto S .
- t Una transición de una Red de Petri.
- $\bullet t$ El conjunto de lugares con arcos de salida hacia la transición t .
- $t \bullet$ El conjunto de lugares que reciben arcos de entrada desde la transición t .
- T El conjunto de transiciones para una Red de Petri.
- x Un vector invariante de lugar en una Red de Petri. $x \in \mathbb{Z}^n$.
- X Una matriz, cuyas columnas forman una base para los invariantes de lugar de una Red de Petri.
- y Un vector invariante de transición en una Red de Petri. $y \in \mathbb{Z}^m$.
- Y Una matriz, cuyas columnas forman una base para los invariantes de transición de una red de Petri.
- $\mathbb{Z}$ El conjunto de los enteros.
- $\mathbb{Z}^n$ El conjunto de vectores enteros con n elementos.
- $\mathbb{Z}^{n \times m}$ El conjunto de matrices enteras con n filas y m columnas.
- $\mathbb{R}$ Conjunto de todos los números reales.

Abreviaturas

RP: Redes de Petri.

RPI: Redes de Petri Interpretadas.

SED: sistemas de Eventos Discretos.

SAM: la abreviatura es del idioma inglés *Automated Manufacturing System* que su traducción al español es Sistema Automatizado de Manufactura.

PLC: la abreviatura es del idioma inglés *Programmable Logic Controller* traducido al español es Controlador Lógico Programable.

Capítulo 1. Introducción

Recientemente, y gracias al avance tecnológico de la industria 4.0 los Sistemas Automatizados de Manufactura (SAM) se han vuelto más complejos dada la interacción de elementos mecánicos, eléctricos, neumáticos, hidráulicos y de distintas naturalezas. Esta compleja interacción de elementos vuelve a los SAM susceptibles a faltas mismas que en un momento dado pueden convertirse en fallas. Una falta, según Verde (Verde, 2013) es considerada una desviación no permitida de, al menos una propiedad característica de un sistema de manufactura, de su condición aceptable, usual o estándar, mientras que la falla es una interrupción permanente de la capacidad de un sistema para realizar una función requerida. Aunque las faltas se consideran inevitables según Ruiz (Ruiz, 2018), es necesario implementar esquemas de diagnóstico de faltas que determinen el tipo, tamaño, localización e instante de aparición con el fin minimizar su impacto en el sistema, permitir una respuesta rápida y efectiva, y garantizar la continuidad y seguridad de la operación.

En los SAM es común que el diseño del esquema de diagnóstico de faltas se agregue después del diseño del sistema y el subsistema de diagnóstico es agregado por separado como un módulo extra al sistema ya existente. La diagnosticabilidad, que es una propiedad de un sistema en donde es posible detectar y aislar la ocurrencia de las faltas, no suele estar tomada en cuenta en el diseño de los sistemas. El diagnóstico activo surge de la necesidad de imponer la propiedad de la diagnosticabilidad en aquellos sistemas que no la poseen. El énfasis de este estudio es el diseño de sistemas diagnosticables mediante un diseño apropiado de un controlador.

En general, los SAM tienen un enfoque descentralizado por su gran tamaño, por ejemplo, en una planta automotriz, que tenemos en la región del bajío, tienen tres áreas distintas para manufactura de un vehículo: carrocería, pintura y ensamble. Los sistemas reales de este tipo son grandes y no existe un dispositivo monolítico que controle y monitoree todo el proceso. Ciertamente los dispositivos están limitados en cuanto a periféricos se refiere (módulos para la conexión de sensores y actuadores), por lo tanto, es lógico pensar en un enfoque de control descentralizado. En estos SAM, la implementación de un control centralizado en un único controlador conlleva un mayor riesgo de interrupción total del proceso de producción, lo que puede tener un impacto económico significativo. Además, la propagación de fallas dentro del sistema podría comprometer su estabilidad y eficiencia. Por ello, resulta crucial analizar estrategias que mitiguen estos riesgos, como la redundancia, la descentralización del control o el aumento del rendimiento en los SAM.

En McKinsey (McKinsey, 2015) se presentan ocho impulsores de valor que tienen un impacto significativo en el rendimiento de un SAM, uno de ellos es la utilización de activos. Los activos se refieren a todos aquellos procesos o maquinaria de un sistema industrial. Cuando este tipo de elementos se encuentran inactivos (por faltas o bien paros de línea) se genera una pérdida monetaria de gastos de capital y/o de ingresos por cada minuto que pasa. A través de su metodología de industria 4.0 logra reducir este factor en 30%. La motivación de esta tesis radica en lograr que este impulsor de valor se reduzca aún más mediante la implementación de esquemas de diagnóstico activo de faltas en SAM.

Los SAM se modelan y analizan desde el enfoque de los Sistemas de Eventos Discretos (SED), ya que su funcionamiento o evolución del sistema depende de eventos, como la activación de un botón, sensor, un temporizador completado, un contador, entre otros. Cada evento cambia el estado del sistema de forma abrupta. El estado de un SED es una representación de la condición actual del sistema en un momento determinado, ver Figura 1.

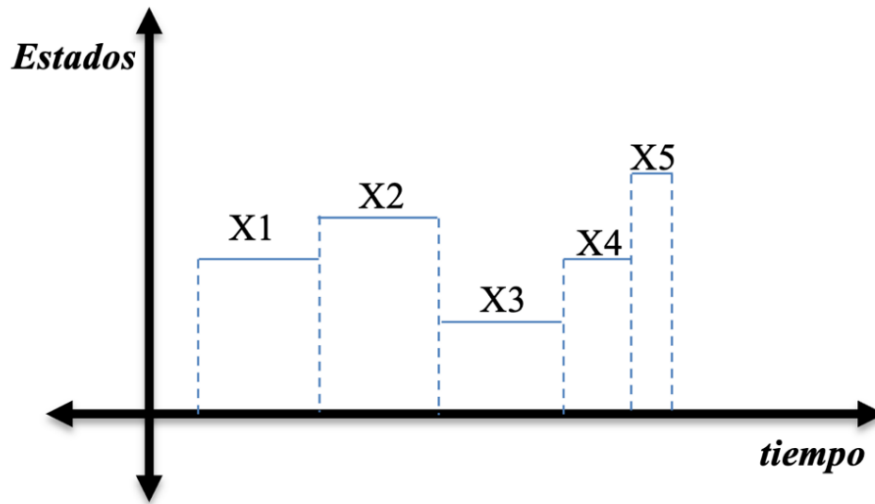


Figura 1 Comportamiento de un SED.

La dinámica de estos sistemas se puede representar mediante modelos de eventos discretos, como redes de Petri o Autómatas Finitos (AF), ya que analizan el flujo de trabajo, la sincronización de procesos y la toma de decisiones en tiempo real que son fundamentales para la eficiencia y el control en la producción. Actualmente, los sistemas modernos tienen muchos elementos interactuando entre sí y la representación mediante AF, es un problema combinatorio que crece exponencialmente, ya que en cada estado se evalúan los posibles eventos que pueden suceder. En contraste, los modelos basados en redes de Petri crecen de forma aritmética. Por esta razón, esta tesis se enfoca en la representación de SED a través del formalismo de Redes de Petri Interpretadas (RPI). Las RPI asocian símbolos de entrada y salida del sistema sobre el modelo de RP. Este formalismo es ideal para representar SED ya que permiten modelar sistemas usualmente asíncronos, concurrentes y de recursos compartidos.

1.1 Estado del arte

Los Sistemas Automatizados de Manufactura (SAM) debido a su gran tamaño y compleja interacción de elementos tienden a fallar de forma aleatoria y desconocida, el crecimiento de la industria y la tendencia a la automatización de los procesos industriales hace que los esquemas de diagnóstico activo de faltas evolucionen para atender estas necesidades. A través del estado del arte mostrado en esta tesis se recopilan las aportaciones más relevantes de otros autores para el desarrollo de este trabajo.

1.1.1 *Diagnóstico de faltas mediante Autómatas Finitos*

Cronológicamente una de las primeras metodologías de diagnóstico de faltas fue el árbol de fallas propuesto por Lapp (Lapp, 1977), a través de lógica booleana (verdadero y falso) se pueden determinar los estados de falta, esto es posible gracias al uso de compuertas lógicas tipo Y (*and*) o tipo O (*or*), por mencionar algunas. El esquema identifica la causa raíz de una falta mediante un diagrama de árbol. El árbol permite una sola ocurrencia indeseada. El punto de partida del árbol de fallas es la falta misma, las raíces son las posibles combinaciones que causan la falta. Por ejemplo, si el sensor no detecta y la banda transportadora está activada se puede concebir como una falta.

La redundancia analítica utilizada por Frank (Frank, 1990) duplica el sistema para comparar la salida, similar al funcionamiento de un observador de estados, como se conoce en sistemas lineales. La clave es verificar la paridad de las ecuaciones matemáticas del sistema, la cual se conoce como redundancia analítica. Presenta dos tipos de redundancia, la directa y la temporal. La redundancia directa es la relación entre las salidas redundantes de los sensores, es decir, la duplicidad del elemento y la comparación entre sus datos de salida. Por otro lado, la redundancia temporal son las relaciones dinámicas entre sensores y actuadores.

Posteriormente, se introdujo el modelo basado en razonamiento por Davis (Davis, 1992), la propuesta menciona que para determinar porque algo ha dejado de funcionar, es útil saber cómo se suponía que debía funcionar. Para entender el funcionamiento del sistema se parten de tres puntos principales, el primero es la observación de los elementos, que son medidas típicas con sus entradas y salidas, se pueden realizar medidas y tomarlas como una muestra. Después, se elabora la descripción de los dispositivos que tiene el sistema, es decir, una lista de los componentes y la interconexión que hay entre ellos. Finalmente, el comportamiento de cada componente y sus posibles estados, por ejemplo, si hablamos de una válvula estos podrían ser abierto o cerrado. La falta será determinada en los componentes donde se encuentre una discrepancia en su funcionamiento.

En Lin (Lin, 1994) se diagnostican las faltas con monitores fuera de línea a partir del lenguaje de entrada y salida aceptado por el sistema. El lenguaje de entrada son todas las posibles secuencias de eventos o señales que pueden ser aplicadas al sistema, mientras que el lenguaje de salida son todas las posibles secuencias de eventos o señales que el sistema puede generar en respuesta. Para el diagnóstico fuera de línea se envía comandos de prueba, y a partir del conocimiento de sus entradas se infiere el estado del sistema. La principal desventaja de este método es que no se puede aislar las faltas, ya que el diagnóstico se realiza de manera global y no permite identificar con precisión qué componente específico ha fallado. Además, diferentes tipos de fallas pueden generar respuestas similares, lo que dificulta su diferenciación. Al no contar con monitoreo continuo, la falta de información en tiempo real impide determinar el instante exacto y la ubicación específica de la falla, limitando la efectividad del diagnóstico.

Sampath (Sampath, 1995) y (Sampath, 1996) propone un método para el análisis de los estados de falta basado en el análisis del lenguaje generado por la ocurrencia de eventos en SED. Define como lenguaje regular diagnosticable, a aquellos en los que es posible determinar la ocurrencia de un evento de falta a partir del conocimiento de las secuencias de

símbolos de entrada al sistema. En su trabajo modela el comportamiento del sistema en su modo normal o aceptable, además del comportamiento de falta mediante un autómata determinista. Dicho autómata es denominado diagnosticador el cual proporciona información necesaria y suficiente para determinar si el sistema modelado es diagnosticable, en base a las secuencias de símbolos de entrada. Aunque en este enfoque se superan los problemas que presentan los resultados propuestos por Lin (Lin, 1994), una de las principales desventajas de esta aportación es el grado de complejidad para construir el modelo diagnosticador de sistemas de gran tamaño, puesto que se debe representar en el modelo todos los estados que visita el sistema. Otro aporte importante de este trabajo es la definición y caracterización de la propiedad de la diagnosticabilidad en SED modelados como AF. Desde su perspectiva, la diagnosticabilidad consiste en deducir a partir de una secuencia de eventos observables la ocurrencia de los no observables. El proceso de diagnóstico se basa en los eventos observables que pasan a través de un diagnosticador con el fin de determinar el tipo de falta. El diagnosticador está construido a partir del modelo del sistema que contiene todos los posibles estados y sus combinaciones, incluyendo los estados normales y los de falta. Para determinar la diagnosticabilidad se verifica que no existan ciclos F_i - indeterminados.

Debouk (Debouk, 2000) lleva a cabo el diagnóstico de faltas de forma descentralizada. El sistema se descompone en múltiples subsistemas a los cuales les asigna un diagnosticador individual, con el que infiere el estado del sistema global a partir de la información proporcionada por cada subsistema, su objetivo es obtener la misma información que al hacerlo de manera centralizada de (Sampath, 1997). La metodología usa un algoritmo que permite analizar las secuencias de entrada generadas por el diagnosticador a fin de determinar la propiedad de la diagnosticabilidad. Este método presenta mejor rendimiento en el monitoreo de faltas, el problema radica en su habilidad para evaluar si el sistema al que se aplica es diagnosticable, ya que este es igual que el del método centralizado, tiene como problema el análisis de alcanzabilidad.

En Wonham (Wonham, 2003), se construye un diagnosticador basado en la información proporcionada a la entrada y salida del sistema, así como el tiempo asociado a cada uno de los eventos, una desventaja es que asume que diagnosticador y el sistema no son inicializados al mismo tiempo, lo cual genera un espacio de estados mayor. Más tarde en Contant (Contant, 2004) se agregan propiedades a los diagnosticadores para detectar una clase mayor de faltas con el uso de modelos en autómatas finitos, como lo son faltas intermitentes y faltas permanentes. Sin embargo, la complejidad en el cálculo de estados para el diseño del monitor sigue creciendo de forma exponencial.

Hadjicostis (Hadjicostis, 2005) presenta un nuevo enfoque a varios de sus trabajos (Hadjicostis, 1999) y (Hadjicostis, 2002) en los que aborda el problema de diagnóstico de faltas usando autómatas estocásticos, los cuales determinan la propiedad de diagnosticabilidad mediante diagnosticadores que contienen la probabilidad de ocurrencia de todos los eventos: normales y de falta. La desventaja de este método radica en calcular la probabilidad para cada estado que puede alcanzarse en el grafo.

Aunque los autómatas finitos son adecuados para representar SED, su aplicación se limita a sistemas de tamaño pequeño, ya que los modelos deben considerar todos los estados posibles del sistema, lo que limita el análisis cuando los modelos son grandes.

1.1.2 *Redes de Petri Interpretadas y modelado de Sistemas de Eventos Discretos (SED)*

Naturalmente, los SED se pueden representar de una mejor manera con RP y se han mostrado apropiados para modelar y analizar sistemas de manufactura, ya que estos sistemas son asíncronos, concurrentes y de recursos compartidos según Paiva (Paiva, 2021).

A continuación, se presentan algunos trabajos basados Redes de Petri. El trabajo de Prock (Prock, 1991) fue uno de los primeros en utilizar el formalismo de RP para el modelado de SED. La detección de faltas está relacionada con el conocimiento del peso de cada arco y número de marcas máximas que un lugar puede aceptar. El diagnosticador establece los rangos máximos. Existe una k que es una cota discreta de tiempo, el algoritmo realiza una sumatoria de todas las marcas en ese tiempo y evalúa la diferencia con las marcas en el marcado inicial ($M_i(k) - M_i(0)$), posteriormente se compara con el rango máximo establecido, si esta diferencia es mayor al rango, se concibe al sistema en falla. La metodología se limita a identificar sensores o procesos en los que las señales se relacionen con cantidades físicas, el autor lista posibles causas. Una de las áreas de oportunidad es que la complejidad computacionalmente está dada por determinar la cantidad de marcas en todos los lugares de la red.

Por otro lado, en Ramírez (Ramírez, 2007) propone un formalismo de modelado de SED llamadas Redes de Petri Interpretadas capaz de capturar el comportamiento del sistema de funcionamiento normal y de faltas. Una de las contribuciones de este trabajo es la propuesta de una metodología de modelado de SED mediante información como variables de estado y sus rangos. Para modelar un sistema real se enlistan los elementos que componen al sistema, llamados módulos. Posteriormente, para cada elemento o dispositivo se debe obtener las variables que participan en la dinámica, por ejemplo, posición, nivel, entre otras. Finalmente, para cada variable se propone un rango, si es una válvula, los rangos de su variable, que es posición, pueden ser abiertos y cerrados. La técnica de modelado define etiquetas de sensores y actuadores, de sincronía y causalidad. Entre más detalles se captan del sistema, mejor será el modelo obtenido. Adicionalmente, se muestra el modelo de diferentes sensores y actuadores industriales en RPI. Finalmente, otra aportación importante de Ramírez (Ramírez, 2007) es la caracterización de la propiedad de la diagnosticabilidad en SED modelados como RPI, se dice que una falta es diagnosticable si esta puede ser detectada en un número finito de pasos.

En Ramírez (Ramírez, 2012) presenta un diagnosticador reducido donde el valor enviado al diagnosticador es la diferencia del funcionamiento requerido y el funcionamiento actual del sistema. Su diagnosticador en línea contiene cuatro partes principales. El primero es un recuperador de eventos que determina mediante el monitoreo en tiempo real las transiciones detectables que se disparan para transmitir la información a los siguientes dos bloques. Después, un bloque del funcionamiento actual, que está construido con el monitoreo de las transiciones y las relacionadas con los lugares de riesgo y finalmente, un bloque del funcionamiento ideal. Estos últimos son los encargados de comunicarse con el diagnosticador que da juicio sobre el estado del sistema.

En el contexto de los esquemas de diagnóstico de faltas en Sistemas de Eventos Discretos (SED) donde se reportan implementaciones prácticas de algoritmos en redes de Petri (RP), uno de los trabajos más destacados es el de Al-Ajeli (Al-Ajeli, 2016) que utiliza el método de eliminación de Fourier-Motzkin (F-M) con el fin obtener un diagnosticador con eventos observables. En dicho trabajo las faltas se modelan como transiciones no observables. Finalmente, Al-Ajeli (Al-Ajeli, 2021) construye un algoritmo que trabaja fuera de línea y en línea. Esta última implementación es ideal para los sistemas de manufactura ya que el monitoreo en línea permite observar y analizar los datos en tiempo real. En Paiva (Paiva, 2021) también se aborda su trabajo mediante F-M, la mejora que hace es la integración de transiciones con eventos duplicados o que comparten la misma etiqueta. El interés principal del artículo es la ocurrencia de faltas en línea en sistemas de manufactura, el contexto está enfocado en el monitoreo inteligente. Una de las desventajas de estos trabajos es que los esquemas de diagnóstico de faltas modelados con RP e implementados con F-M, se aplican sobre modelos acíclicos ya que está basado en el conteo de los disparos de las transiciones. En un contexto práctico no son aplicables a la mayoría de los SAM, que usualmente son concurrentes y cíclicos.

Otro trabajo con implementaciones prácticas es de Basile (Basile, 2022). El uso de esquemas de diagnóstico con residuos comienza con Moreira (Moreira, 2018) y (Moreira, 2019), la propuesta consiste en el modelo de un diagnosticador de faltas mediante un autómata determinista con salidas y transiciones condicionales. En Basile (Basile, 2022) se adoptan las RPI gracias a su fácil interpretación de entrada y salida. A diferencia de lo propuesto por Moreira, Basile utiliza residuos para el diagnóstico de faltas en lugar de árbol de faltas, además de agregar cotas de tiempo en el disparo de transiciones por eso el término de RPI temporizadas. Una de las desventajas de utilizar temporizadores para el diagnóstico en un sistema real son limitaciones en la flexibilidad, es decir, los temporizadores se programan para operar bajo condiciones predefinidas, si las condiciones del sistema cambian o existe una modificación del proceso, se necesitarán ajustes constantes en los temporizadores.

En el trabajo de Kohler (Kohler, 2023) se utiliza un diagnosticador de faltas aplicando residuos en sistemas de manufactura. El trabajo utiliza un árbol de fallas para el controlador y la planta, que ambos son modelados con RPI. Para el monitoreo se utiliza un sensor predictivo y las señales de los actuadores. Comparando lo observado con lo esperado, logra identificar las faltas. La implementación es teórica puesto que no reporta algo práctico. Actualmente, el estado del arte referente a diagnóstico de faltas en SED no suele llegar hasta la etapa de la implementación.

Los modelos en RP proporcionan características gráficas y matemáticas más atractivas, las cuales pueden ser usadas con el fin de tratar tanto sistemas finitos e infinitos de acuerdo con Al-Ajeli (Al-Ajeli, 2021). En el estado del arte encontramos diversas arquitecturas de modelado, entre ellas, la centralizada, descentralizada y distribuida. La clasificación de estas depende de cómo se transmite la información entre los elementos o bien desde el enfoque del diagnóstico cómo se monitorea al sistema. En el modelo centralizado el sistema global es monitoreado por un solo esquema de diagnóstico o bien sus elementos interactúan directamente con un operador o controlador central. Los términos descentralizados y distribuidos algunas veces son confundidos. En el descentralizado cada grupo de elementos o elementos son monitoreado por un esquema de diagnóstico (esquema local) mismos que

pueden tener o no, comunicación con un esquema global. En contraste con el descentralizado, una arquitectura distribuida permite la comunicación entre esquemas locales con sus vecinos. Es decir, los esquemas locales no sólo usan información propia sino de lo que pasa en el resto de los esquemas según Pourbabak (Pourbabak, 2019).

1.1.3 *Diagnóstico activo*

Cronológicamente por primera vez se introduce el término de diagnóstico activo en Sampath (Sampath, 1998), el trabajo consiste en usar acciones de control para alterar las propiedades de diagnosticabilidad de un modelo en AF, es decir, restringir el comportamiento de un sistema no diagnosticable mediante un control apropiado. Evaluando las faltas del sistema de válvulas se obtiene un modelo no diagnosticable según Sampath (Sampath, 1995), es decir, la ocurrencia de las faltas no podrá ser identificadas por el diagnosticador. El diseño del controlador basado en lo propuesto por Lin (Lin, 1994) restringe el lenguaje de la planta, convirtiéndolo en un lenguaje K activo contenido en el lenguaje K, un subconjunto del lenguaje de la planta diagnosticable.

En el trabajo de Sampath (Sampath, 1998), se define y caracteriza la propiedad de la diagnosticabilidad. Existen dos formas de imponer dicha propiedad, la primera de ellas consiste en confinar el lenguaje de la planta mediante la modificación estructural del sistema. La otra aproximación es mediante la implementación de un supervisor (controlador) que se ejecuta en paralelo a la planta para inhibir los comportamientos no diagnosticables.

El diagnóstico activo surge de la necesidad de generar sistemas diagnosticables. La diagnosticabilidad es una propiedad de un sistema donde es posible detectar y aislar la ocurrencia de faltas según Ramírez (Ramírez, 2007). El diagnóstico activo es una combinación de observar y controlar, el énfasis de este estudio es el diseño de sistemas diagnosticables mediante el diseño apropiado de un controlador. El controlador confina el lenguaje de la planta para volverlo diagnosticable.

Uno de los primeros trabajos del enfoque descentralizado es el de Lin (Lin, 1988). Se define el concepto de coordinador y se resaltan las condiciones necesarias para la existencia de un coordinador supervisor. Esto se muestra con un ejemplo de un sistema de manufactura. Su esquema descentralizado está compuesto por un coordinador y varios subsistemas. La función principal del coordinador es realizar el monitoreo de faltas y controlar a cada subsistema que se ha generado a partir del modelo descentralizado. Una de las áreas de oportunidad es la intervención del coordinador en las tareas de control es realmente mínima.

Otro autor con enfoque descentralizado es Holloway (Holloway, 1994) que presenta un método de monitoreo de faltas distribuido basado en plantillas de tiempo. Las plantillas de tiempo usan conjuntos de temporizadores y relaciones de secuencia. El evento no puede exceder el retraso máximo que se le asigna al proceso a través de las plantillas. Este último enfoque resulta atractivo porque no agrega sensores extras al proceso. Un área de oportunidad es que basa todo su monitoreo en temporizadores, cualquier cambio en la concurrencia de los eventos de los procesos pudiera ser concebido como una falta.

Posteriormente, Debouk (Debouk, 2002) presenta un algoritmo para evaluar la diagnosticabilidad, este algoritmo es más eficiente desde la perspectiva computacional. La arquitectura consiste en un sistema G que tiene dos subsistemas G_1 y G_2 . Presenta tantos diagnosticadores como subsistemas que están asociados a cada uno de los antes mencionados mediante observaciones locales directamente en cada subsistema de G , estos diagnosticadores rinden cuentas a un coordinador general que se encarga de concebir al sistema en falta o comportamiento normal.

En el trabajo de Chen (Chen, 2014) se impone la propiedad de la diagnosticabilidad mediante la selección de secuencias apropiadas con el fin de que la falta sea diagnosticable de un ejemplo en particular. En Basile (Basile, 2015) y Ran (Ran, 2019) mediante la solución de un problema de programación lineal encuentran el número y la colocación óptima de sensores usando optimización para obtener el mínimo con el fin de forzar al sistema a ser diagnosticable, esto se logra a través del mínimo conjunto de transiciones observables que asegura la diagnosticabilidad. El conjunto mínimo de transiciones se garantiza mediante la solución del problema de optimización planteado.

En Hernández (Hernández, 2015) se propone un enfoque para imponer la propiedad de diagnosticabilidad en RPI utilizando un controlador llamado circuito de regulación. La solución es estructural, se obtiene añadiendo lugares extras a la red con el fin de restringir el disparo de algunas transiciones en RPI. La metodología consiste en evitar el disparo infinito de los T-invariantes de la red, esto se logra mediante un circuito llamado circuito regulador sobre dos T-invariantes con el fin de que ambos compartan un lugar en común. De este modo se inhiben las secuencias al infinito y se restringe el lenguaje de la planta volviéndola diagnosticable. La principal desventaja es que al aumentar la cantidad de lugares las palabras se ven reducidas y si no se sigue una correcta metodología se puede llegar al estado de bloqueo en la RPI. Más tarde nuevamente Hernández (Hernández, 2018) presenta una propuesta de diagnosticabilidad activa a través de un circuito de regulación inteligente, con el fin de mejorar lo propuesto en su anterior trabajo con un enfoque menos restrictivo ante la red. El término inteligente tiene que ver con que el circuito sólo actúa cuando se requiere hacer la detección de faltas, el análisis se hace cuando se detecta el disparo de una transición de pre-riesgo, si después de una secuencia de eventos dados no se ha detectado el disparo de la transición de post-riesgo se puede concebir al sistema en falta.

Otro enfoque de diagnóstico activo es el de Hu (Hu, 2019) y (Hu, 2021) donde las plantas tienen un comportamiento de inactividad, ya sea porque el sistema se encuentra inactivo o bien porque ha caído dentro de un sifón. Las faltas que evalúan son permanentes mismas que son modeladas como un sifón. Para evaluar la diagnosticabilidad y conocer los estados de inactividad se propone un diagnosticador Q , este diagrama identifica los estados de inactividad y las transiciones que te llevan a ellos. La solución propuesta es instruir al control supervisor para que desactive aquellas transiciones que llevan a los estados de inactividad cuando este se encuentre en un estado previo.

Finalmente, es importante recalcar la diferencia entre los conceptos de diagnóstico activo y diagnóstico de faltas. El diagnóstico de faltas determina el tipo, tamaño, localización e instante de aparición de una falta. Incluye la detección, el aislamiento y la estimación de la falta según Verde (Verde, 2013). Mientras que el diagnóstico activo consiste en imponer la

propiedad de la diagnosticabilidad en sistemas con faltas no diagnosticables según Sampath (Sampath, 1997).

1.2 Planteamiento del problema

En la mayoría de los sistemas industriales, el diseño del esquema de diagnóstico de faltas se crea después del modelado del sistema, en otras palabras, la propiedad de la diagnosticabilidad no es tomada en cuenta en el diseño del sistema, lo que provoca que el diagnosticador y el diseño del sistema estén desacoplados. El diagnóstico activo surge de la necesidad de imponer la propiedad de la diagnosticabilidad en aquellos sistemas que no la poseen. Asegurar esta propiedad no sólo es importante desde el punto de vista de la seguridad sino también para la productividad y calidad en los procesos los cuales impactan directamente en pérdidas monetarias.

1.2.1 Justificación

El diagnóstico activo de faltas es un tema fundamental que asegura la continuidad operativa, la eficiencia y la seguridad especialmente en entornos industriales como los SAM. Desde la perspectiva monetaria, reduce costos asociados a paros de línea no programados y evita el desperdicio de materiales en la manufactura errónea de productos. En términos de seguridad, disminuye riesgos al prever fallos críticos que puedan comprometer la integridad de los equipos y la seguridad del personal.

A pesar de los beneficios potenciales del diagnóstico activo, existe una carencia de aplicaciones prácticas reportadas en la literatura. En algunos trabajos se concentran en desarrollos teóricos y simulaciones que, aunque valiosos, no ofrecen una validación experimental suficiente para confirmar su viabilidad en entornos reales. Esta brecha en la literatura subraya la necesidad de realizar trabajos que aborden la aplicación práctica del diagnóstico activo, lo cual podría resultar de gran utilidad para SAM que requieren una detección proactiva de fallas.

1.2.2 Objetivos

Proponer y aplicar esquemas de diagnóstico activo de faltas en Sistemas Automatizados de Manufactura modelados mediante Redes de Petri Interpretadas.

1.2.3 Objetivos específicos

1. Modelar Sistemas Automatizados de Manufactura desde el enfoque de Redes de Petri Interpretadas.
2. Definir y caracterizar la propiedad de P-semiflujo activo mediante RPI como propuesta de solución al problema de diagnóstico activo.
3. Proponer algoritmos descentralizados de diagnóstico de faltas.
4. Implementar algoritmos de diagnóstico de faltas en un SAM descentralizado.
5. Analizar la efectividad de los diagnosticadores en estos sistemas.

La principal contribución de esta tesis radica en dos vertientes importantes, la primera de ellas está enfocada en el diagnóstico activo de faltas y la segunda en los esquemas de diagnóstico. En el contexto del diagnóstico activo de faltas, un aspecto que no ha sido explorado en estudios previos, incluyendo el trabajo de Hernández (Hernández, 2018), Hu (Hu, 2023), Hu (Hu, 2024) y Cong (Cong, 2023), es preservar las propiedades estructurales de una red de Petri. A diferencia de los enfoques anteriores, la presente investigación propone una metodología menos restrictiva con el lenguaje de la planta ya que se conserva en su totalidad los T-semiflujos, propiedad que los otros enfoques limitaban al aplicar sus metodologías. Cabe resaltar que al tener un enfoque práctico se garantiza que en ciertas tareas o procesos se puedan repetir de forma secuencial, en contraste de los esquemas de Paiva (Paiva, 2021) y Al-Ajeli (Al-Ajeli, 2021) que sólo funciona para sistemas acíclicos. Por otro lado, en el caso del diagnóstico de faltas mediante residuos, la aportación de esta tesis consiste en el diseño y fabricación de un sistema embebido capaz de monitorear el estado de las salidas de un PLC que comparten la información vía protocolo industrial Modbus con el diagnosticador. A diferencia de lo propuesto por Basile (Basile, 2022) donde el diagnosticador no tiene certeza de que la señal enviada por el PLC al actuador haya sido recibida, en esta tesis el diagnosticador obtiene información confiable referente al estado de las salidas. En este sentido y con el fin de obtener un veredicto certero, el sistema embebido logra informar al diagnosticador el estado en tiempo real de los actuadores (salidas) del PLC.

Este trabajo de tesis pretende cubrir esta brecha con aplicaciones prácticas en diagnóstico activo, para validar su efectividad en contextos reales. A través de esta investigación, se generarán aportaciones metodológicas y experimentales que podrán servir como referencia para futuros estudios y como base para su implementación en SAM. Los resultados obtenidos muestran una viabilidad prometedora en la implementación del diagnóstico activo de faltas, demostrando que es posible imponer la propiedad de la diagnosticabilidad sin las restricciones de lenguaje que encontramos en el estado del arte.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Sistemas de Eventos Discretos

Los SED son sistemas dinámicos, cuyo espacio de estado es numerable, aunque posiblemente infinito, y donde el estado cambia abruptamente en respuesta a eventos que ocurren, en general, de manera asíncrona. Actualmente, estos sistemas son muy importantes, por lo que se han realizado investigaciones en el modelado, análisis, control y diagnóstico de faltas en estos sistemas. La presente investigación está orientada al diagnóstico activo de faltas en Sistemas Automatizados de Manufactura (SAM) modelados como Sistemas de Eventos Discretos (SED) mediante el formalismo de Redes de Petri Interpretadas (RPI), cuyos estados cambian abruptamente con la ocurrencia de eventos. Su evolución es determinada por el cambio de los propios estados y no del tiempo.

2.2 Redes de Petri

Las siguientes definiciones y resultados fueron tomados de Ramírez (Ramírez, 2007). Las Redes de Petri (RP) son un formalismo matemático adecuado para describir las características de los SED tales como sincronía, concurrencia, exclusión y decisión. De forma

gráfica los lugares se representan por círculos, las transiciones por rectángulos, donde los lugares y transiciones se relacionan con flechas dirigidas y hay marcas alojadas en los lugares que se pueden desplazar por la red siguiendo distintas reglas que permiten el movimiento de la marca.

A continuación, se presenta la definición formal de una red de Petri donde m y n son un número, después las principales propiedades relacionadas con su estructura y dinámica.

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

Las funciones I y O están caracterizadas por $|P| \times |T|$ matrices pre y post, sea $pre[i, j] = I(p_i, t_j) = C^-$ y $post[i, j] = O(p_i, t_j) = C^+$, respectivamente, donde $a_{ij} = pre(p_i, t_j)$ y $b_{ij} = post(p_i, t_j)$. La matriz de incidencia $C = [c_{ij}]$, $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, m$, está definida por $c_{ij} = b_{ij} - a_{ij} = C = C^+ - C^-$. 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, es el número de marcas que residen dentro de un lugar. M_0 es el marcado inicial. Una RP es una estructura $N = (G, M_0)$.

Para una transición dada $t_j \in T$, $\bullet(t_j)$ y $(t_j) \bullet$ denotan los conjuntos de lugares p_i tal que $I(p_i, t_j) \neq 0$ y $O(t_j, p_i) \neq 0$, respectivamente. De forma similar $\bullet(p_i)$ denota el conjunto de todas las transiciones t_j tal que $I(p_i, t_j) \neq 0$ y $(p_i) \bullet$ es el conjunto de todas las transiciones t_j tal que $O(t_j, p_i) \neq 0$.

Definición 2. Un sifón es un subconjunto de lugares $S = \{P_1, \dots, P_S\} \subseteq P$ de una RP tal que $\bullet S \subseteq S \bullet$, la notación $\bullet S$ y $S \bullet$ denotan las transiciones de entrada y salida, respectivamente, de los lugares que forman el sifón S . Si la inclusión es propia, $\bullet S \subset S \bullet$, se dice que S es un sifón propio.

Un sifón en una RP es una estructura que, al desmarcarse, puede causar la inactividad de ciertas transiciones, generando bloqueos y afectando la funcionalidad del sistema.

Definición 3. Sea (G, 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 $T_i = \{t_j | X_i(t_j) > 0\}$.

Definición 4. Sea (G, M_0) una RP. Los vectores Y_i tal que $Y_i C = 0$, $Y_i \geq 0$ son conocidos como P-semiflujos.

Una transición t_j está habilitada en el marcado M_k si $M_k(p_i) \geq I(p_i, t_j)$ 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 , el evento genera un nuevo marcado M_{k+1} , es decir $M_k \xrightarrow{t_j} M_{k+1}$. El marcado alcanzado se puede calcular con 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 de transiciones.

2.3 Redes de Petri Interpretadas

En el trabajo de Ramírez (Ramírez, 2007) se define la subclase Redes de Petri Interpretadas. Su uso principal es para representar símbolos de entrada en transiciones y de salida para los lugares. En Guevara (Guevara, 2019) se muestra la metodología de modelado de SAM desde la perspectiva de las RPI, algunas definiciones fueron tomadas de dicho trabajo.

Definición 5. 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 son 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:

- 1) Un símbolo (evento) $a \in \Sigma_I$ puede ser indicado si este es activado por un dispositivo externo, controlador, sensor o usuario.
- 2) Si $\lambda(t_j) = a$, se indica el evento a y t_j está habilitada, entonces se debe disparar.
- 3) Si $\lambda(t_j) = a$ y t_j está activa, pero no se da el evento a entonces no se debe disparar.
- 4) Si $\lambda(t_j) = \emptyset$, t_j está habilitada, entonces t_j se puede disparar en cualquier momento.

Definición 6. Sea (Q, M_0) una RPI. El conjunto $\Lambda(Q, M_0) = \{\omega | \omega \text{ es una secuencia de símbolos de entrada – salida}\}$ denota el conjunto de todas las secuencias de símbolos de entrada-salida de (Q, M_0) . El conjunto de todas las secuencias de entrada-salida de un tamaño mayor que k serán denotadas por $\Lambda^k(Q, M_0)$, es decir $\Lambda^k(Q, M_0) = \{\omega \in \Lambda(Q, M_0) | |\omega| \geq k\}$.

Definición 7. La distancia relativa $D_R(t_j, t_k)$, entre cualquier par de transiciones $t_j, t_k \in T$, es el número máximo que t_k puede dispararse sin disparar t_j cuando la marca es retenida en los lugares $\bullet t_j$. La distancia relativa máxima $D_H(t_j, t_k)$, entre cualquier par de transiciones $t_j, t_k \in T$ es $D_H(t_j, t_k) = \max \{D_R(t_j, t_k), D_R(t_k, t_j)\}$.

Ejemplo 1. Considere la RPI de la Figura 2, la cual se denota por (Q, M_0) . El conjunto de lugares de la RP es $P = \{p_1, p_2, p_3\}$; el conjunto de transiciones es $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4\}$. Y Finalmente, las etiquetas de color morado a, b, c y d son las etiquetas de transiciones.

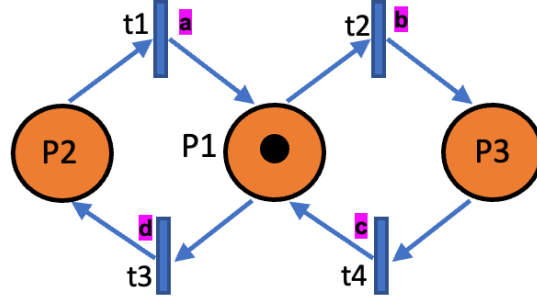


Figura 2 Red de Petri Interpretada.

La matriz de incidencia, ver ecuación 1, que corresponde a la RPI es:

$$C = \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & t_3 & t_4 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{matrix} \quad (1)$$

La matriz de pre-incidencia está dada por la ecuación 2:

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

La matriz de post-incidencia está representada por la ecuación 3:

$$C^+ = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

El marcado inicial de la RP se representa en la ecuación 4:

$$M_0 = [1 \quad 0 \quad 0]^T \quad (4)$$

A partir del marcado M_0 las transiciones t_2 y t_3 se encuentran habilitadas. Si la transición t_2 se dispara, el nuevo marcado alcanzado está dado por la ecuación 5:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Por otro lado, para la transición t_2 su conjunto de lugares de entrada $\bullet t_2 = \{p_1\}$ y el conjunto de lugares de salida es $t_2 \bullet = \{p_3\}$. En el caso del lugar p_1 el conjunto de transiciones de entrada es $\bullet p_1 = \{t_1, t_4\}$ y el conjunto de transiciones de salida es $p_1 \bullet = \{t_2, t_3\}$.

2.4 Modelado de faltas permanentes

Las faltas permanentes se definen a continuación, según Ruiz (Ruiz, 2007).

Definición 8. Una falta permanente ocurre cuando una tarea deja de ejecutarse mientras que otras u otra tarea puede continuar su ejecución en el sistema. Una falta permanente permanece como falla hasta que es atendida.

Para modelar una falta permanente considere el modelo (Q^N, M_0^N) que describe el funcionamiento normal del sistema. Después, para cada lugar P_i^N que representa una operación a partir de la cual puede ocurrir una falta, se debe agregar una transición incontrolable de falta T_{f1} , un lugar de falla P_f^F , y los arcos (P_i^N, t_f) y (t_f, P_f^F) . En la Figura 3 se muestra un modelo de RPI con falta permanente T_{f1} y un lugar de falla P_{f1} .

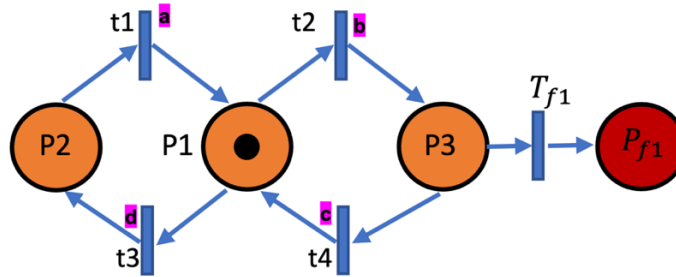


Figura 3 Red de Petri Interpretada con falta permanente.

2.5 Diagnosticabilidad

La diagnosticabilidad es una de las propiedades más importantes en el diagnóstico de faltas. La siguiente definición fue tomada de Ramírez (Ramírez, 2007) para RPI. El conjunto de lugares P de una (Q, M_0) está particionado en dos subconjuntos, $P = P^N \cup P^F$, donde P^N es el conjunto de lugares de estado normal y P^F es el conjunto de lugares de fallas permanentes modeladas. El conjunto de transiciones T de una (Q, M_0) se particiona en los siguientes subconjuntos: T^F y T^N , que son el conjunto de transiciones de faltas permanentes y transiciones normales tal que $T = T^N \cup T^F$.

Definición 9. Una RPI dada por (Q, M_0) es diagnosticable entrada-salida en $k < \infty$ pasos si y solo si usando cualquier palabra $\omega \in \Lambda^k(Q, M_f) \cup \Lambda_B(Q, M_f)$, la información de C, φ, λ (Q, M_0) son suficientes para distinguir la presencia de fallas en el SED. Donde $\Lambda_B(Q, M_f)$, es el conjunto de todas las secuencias de símbolos de entrada-salida que llevan a marcados de bloque en la red de Petri.

2.6 Control supervisor

El control supervisor es una teoría fundamental dentro del control de SED propuesta por Ramadge (Ramadge, 1989). El problema del control supervisor consiste en modificar el

comportamiento en lazo abierto de un SED, de manera que se encuentre dentro (como un conjunto) de algún rango deseable. Este rango puede ser especificado proporcionando explícitamente el comportamiento deseado en lazo cerrado, o especificando dichos conjuntos de manera indirecta a través de objetivos cualitativos de rendimiento.

En el trabajo de Moody (Moody,1998) se propone un control supervisor, la solución estructural se hace mediante un lugar extra a la red, el objetivo del controlador es restringir los marcados de la planta M_p , ver ecuación 6.

$$LM_p \leq b \quad (6)$$

Donde M_p es el marcado de la planta, b es un escalar, $L \in \mathbb{Z}^{n_c \times n}$, donde $\mathbb{Z}$ es un conjunto de enteros, n es el número de lugares de la planta, m el número de transiciones y n_c es el número de restricciones del tipo de la ecuación 1.

La solución del problema utiliza las variables de holgura, ver ecuación 7, donde $M_c \in \mathbb{Z}^{n_c}$ es el vector entero que representa el marcado de los lugares de control, el subíndice p representa la planta y el subíndice c representa el controlador.

$$LM_p + M_c = b \quad (7)$$

Por otro lado, la matriz C_c contiene arcos que conectan los lugares de control a transiciones de la planta. La matriz de incidencia $C \in \mathbb{Z}^{(n+n_c) \times m}$ del lazo cerrado está dada por la ecuación 8.

$$C = \begin{bmatrix} C_p \\ C_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

El vector de marcados $M \in \mathbb{Z}^{n+n_c}$ y el marcado inicial M_0 , ver ecuación 9.

$$M = \begin{bmatrix} M_p \\ M_c \end{bmatrix}; M_0 = \begin{bmatrix} M_{p0} \\ M_{c0} \end{bmatrix} \quad (9)$$

La ecuación 7 tiene forma de un P-semiflujo mismo que se puede sustituir por la ecuación 10 y 11. Donde $I \in \mathbb{Z}^{n_c \times n_c}$ es la matriz identidad con los coeficientes de las variables de holgura definidas como uno.

$$X^T C = [L \quad I] \begin{bmatrix} C_p \\ C_c \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

$$LC_p + C_c = 0 \quad (11)$$

2.7 Método de eliminación Fourier Motzkin

La siguiente definición fue extraída del trabajo de Al-ajeli (Al-Ajeli, 2021). La eliminación de una variable de un conjunto de desigualdades $I := Cx \leq b$, donde $C \in \mathbb{Z}^{n \times m}$, $b \in \mathbb{Z}^m$ y $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$ puede ser alcanzable mediante el método de eliminación Fourier

Motzkin según Dantzing (Dantzig, 1872). El método consiste en eliminar las variables una por una. Para simplificar el análisis, se asume que la última columna de C solo contiene los valores 0, +1 o -1. Supongamos que se desea eliminar. El sistema I puede reescribirse como la ecuación 12.

$$\begin{aligned} I^0: c'_i x' &\leq b_i, \quad i = 1, \dots, m_1 \\ I^-: c'_j x' - x_n &\leq b_j, \quad i = m_1 + 1, \dots, m_2 \\ I^+: c'_k x' + x_n &\leq b_k, \quad k = m_2 + 1, \dots, m \end{aligned} \quad (12)$$

Donde $x' = (x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$, es el mismo conjunto de variables, pero sin x_n . También I^0 , I^- e I^+ son inecuaciones de I que tiene cero, positivo y negativo coeficientes de x_n . Consideremos el siguiente sistema I de desigualdades, ver ecuación 13.

$$I = \begin{cases} x_1 + x_2 - x_3 \leq 4 \\ 2x_1 - x_2 + 3x_3 \leq 10 \\ -x_1 + 2x_2 + x_3 \leq 6 \\ x_1 - x_2 + 2x_3 \leq 8 \end{cases} \quad (13)$$

Supongamos eliminar la variable x_3 del sistema I utilizando el método de eliminación Fourier Motzkin. En la ecuación 14 se reescriben las desigualdades en la forma de la ecuación 12.

$$I^0 = \{\emptyset\}; I^- = \{x_1 + x_2 - x_3 \leq 4\}; I^+ = \begin{cases} 2x_1 - x_2 + 3x_3 \leq 10 \\ -x_1 + 2x_2 + x_3 \leq 6 \\ x_1 - x_2 + 2x_3 \leq 8 \end{cases} \quad (14)$$

Se operan las desigualdades de I^- con cada desigualdad de I^+ con el fin de eliminar x_3 . El proceso se repite hasta que ya no quede la variable que se pretende eliminar. Luego de eliminar la variable x_3 , el sistema reducido I' quedaría como la ecuación 15. Este proceso se puede repetir para seguir reduciendo el sistema hasta obtener una desigualdad en una sola variable.

$$I' = \begin{cases} 5x_1 + 2x_2 \leq 22 \\ x_2 \leq \frac{10}{3} \\ 3x_1 + x_2 \leq 16 \end{cases} \quad (15)$$

Capítulo 3. Primera aproximación de Diagnóstico Activo

En esta tesis se abordó el tema de diagnóstico activo mediante dos aproximaciones, la primera está documentada en este capítulo 5 y la segunda en el capítulo 6. En la primera aproximación documentada en esta tesis se encontró la relación que tiene el control supervisor con la imposición de la propiedad de la diagnosticabilidad en los modelos de RPI. La segunda aproximación, documentada en el capítulo 6 de esta tesis, se encontró la regla de asignación de restricción que impone la propiedad de la diagnosticabilidad en los modelos de RPI no

diagnosticables bajo en el enfoque de Ramírez (Ramírez, 2007), misma que se definió y caracterizó en esta tesis y lleva el nombre de “P-semiflujo activo”.

En este apartado se muestra todo lo relacionado con el diagnóstico de faltas, desde el modelado de un SAM en RPI, el análisis de la propiedad de la diagnosticabilidad y la imposición de la diagnosticabilidad utilizando técnicas de control supervisor como primera aproximación a la solución del problema de diagnóstico activo.

3.1 Modelado de sistema de manufactura en RPI

En la primera aproximación se utilizó el SAM del Instituto Tecnológico de Aguascalientes (ITA) representado por la Figura 4.

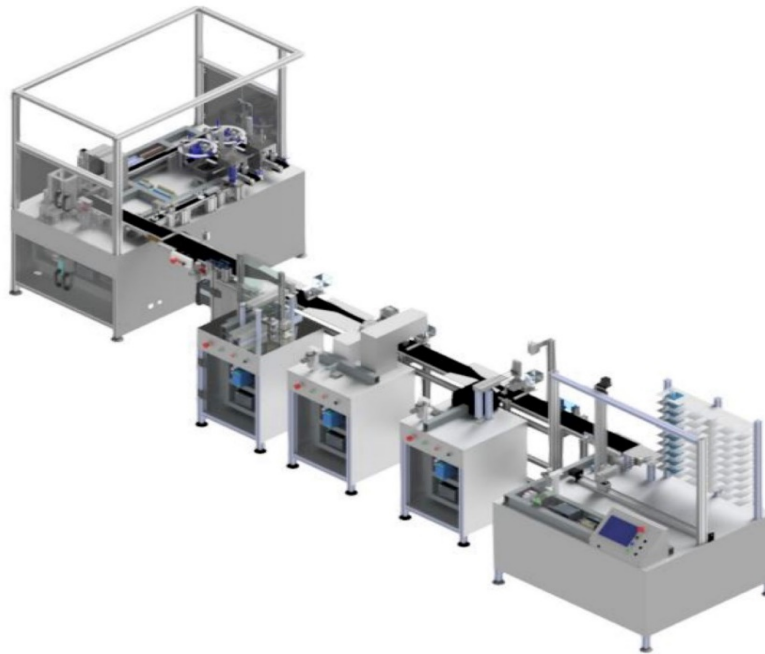


Figura 4 Sistema automatizado de manufactura del ITA.

En la Figura 5 se muestra un esquema de distribución del sistema de manufactura para el recipiente mediante máquinas CNC (Control Numérico Computarizado). El funcionamiento consiste en que las piezas llegan en bruto al alimentador de entrada (alimentador E), el robot montado en la banda transportadora se desplaza 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.

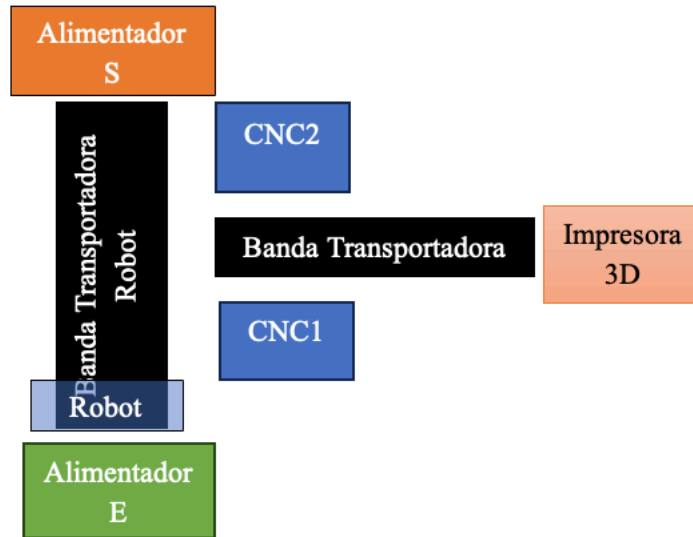


Figura 5 Esquema de la distribución del SAM.

La metodología de modelado de SED mediante RPI aplicada en esta tesis es la propuesta en Ramírez (Ramírez, 2007). 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, ver Tabla 1. En la Figura 6 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 (Ramírez, 2007) con el fin de obtener más detalles de la metodología.

Para la creación de la Tabla 1 se tomó como conocimiento el funcionamiento de los elementos inmiscuidos en la interacción del sistema. La “Banda Transportadora Robot” es un sistema de transporte encargado de mover las piezas hacia el robot industrial. Su posición puede variar en tres niveles: superior, centro e inferior. Esto permite que las piezas sean entregadas en diferentes alturas según los requerimientos del proceso. En la Red de Petri, cada una de estas posiciones será representada por un lugar, con transiciones que reflejen el movimiento de la banda entre cada nivel.

El “Robot” es un manipulador industrial que traslada piezas entre estaciones de trabajo. Su posición dentro del sistema se define en tres ubicaciones: izquierda, centro y derecha. Esto le permite interactuar con distintos equipos en la línea de producción, mientras que el “Efector final” es el mecanismo que permite al “Robot” sujetar y soltar piezas. Su estado se define en dos valores: libre, cuando no sostiene nada, y ocupado, cuando ha tomado una pieza. Este comportamiento será modelado en la Red de Petri con dos lugares, donde la transición entre ellos representará la acción de sujetar o liberar una pieza.

El “CNC1” y “CNC2” son máquinas de control numérico computarizado encargada de mecanizar piezas. Su estado puede ser libre, cuando está disponible para procesar una nueva pieza, u ocupado, cuando se encuentra en operación. En la Red de Petri, este estado será representado por dos lugares y la transición ocurrirá cuando la máquina reciba una nueva pieza o termine su proceso. La “Impresora 3D” es un equipo de manufactura aditiva que fabrica piezas a partir de materiales como plástico o resina. Su estado puede ser libre, cuando está lista para recibir un nuevo trabajo, u ocupado, cuando se encuentra en proceso de impresión.

El “Alimentador E” es el mecanismo que coloca piezas dentro del sistema de producción. Su estado puede ser libre, cuando no hay piezas listas para ser tomadas, u ocupado, cuando hay una pieza disponible. Por otro lado, el “Alimentador S” es el mecanismo que retira las piezas procesadas del sistema. Su estado también se divide en libre y ocupado, dependiendo de si hay una pieza lista para ser retirada.

Finalmente, la “Banda Transportadora Impresora” es el sistema de transporte que mueve las piezas hacia o desde la “Impresora 3D”. Su posición se define en dos estados: inicio, cuando la banda se encuentra en su posición original, y final, cuando ha transportado la pieza hasta su destino. En la Red de Petri, estos estados serán modelados como lugares, con transiciones que representen el movimiento de la banda.

Tabla 1 Elementos que componen al sistema.

Nombre en Modelo	Disposición	Descripción	Variable	Rango
Banda Transportadora Robot	Salida/Digital	Banda Transportador	Posición	<Superior (S1), centro (C1), inferior (I1)>
Robot	Salida/Digital	Robot Industrial	Posición	<Izquierda (I2), centro (C2), derecha (D2)>
Efactor final	Salida/Digital	Efactor de Robot	Estado	<Libre (L3), ocupado (O3)>
CNC1	Salida/Digital	Máquina CNC1	Estado	<Libre (L4), ocupado (O4)>
CNC2	Salida/Digital	Máquina CNC2	Estado	<Libre (L5), ocupado (O5)>
Impresora 3D	Salida/Digital	Impresora 3D	Estado	<Libre (L6), ocupado (O6)>
Alimentador E	Entrada/Digital	Colocación de pieza	Estado	<Libre (L7), ocupado (O7)>
Alimentador S	Entrada/Digital	Retirado de pieza	Estado	<Libre (L8), ocupado (O8)>
Banda Transportadora Impresora	Salida/Digital	Banda frente a impresora 3D	Posición	<Inicio (I9), final (F9)>

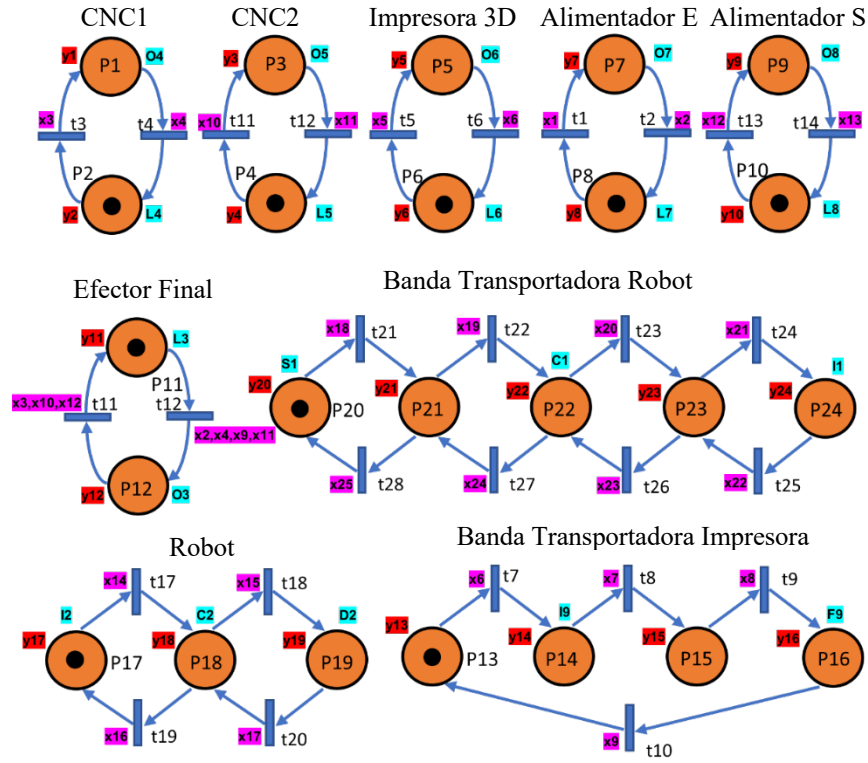


Figura 6 Modelo de cada elemento del sistema.

La Figura 7 se basa en la construcción del modelo global del sistema a partir de la integración de los modelos aislados de la Figura 6. La integración se realiza mediante dos tipos de relaciones clave: la relación síncrona, que establece que ciertas transiciones en distintos módulos deben ocurrir simultáneamente para garantizar la coordinación entre los elementos, por ejemplo, el “Efecto Final” del robot es el encargado de colocar la pieza en el “CNC1”. Cuando el “Efecto Final” sostiene una pieza, se encuentra ocupado y no puede tomar otra hasta que la coloque. Para que el robot pueda depositar la pieza en el “CNC1” o el “CNC2”, es necesario que al estén libres. En el momento en que el robot coloca la pieza sobre el “CNC1”, su estado cambia de ocupado a libre, mientras que el “CNC1” pasa de libre a ocupado. Debido a esta interacción, estas transiciones deberán fusionarse en una sola, asegurando la correcta sincronización del sistema. Esa es la razón de que las transiciones t_3 y t_{11} comparten la misma etiqueta de sincronía x_3 , ver Figura 6.

Por otro lado, la relación permisiva permite que una transición en un módulo habilite otra en un módulo diferente sin necesidad de sincronización estricta, otorgando mayor flexibilidad al sistema; por ejemplo, un robot podría recoger un objeto de una banda transportadora solo si un sensor detecta su presencia, pero el robot no necesita activarse en el mismo instante en que el sensor lo detecta, sino cuando esté listo para operar. A medida que los distintos modelos individuales se combinan con estas relaciones, se construye progresivamente un modelo global que refleja el comportamiento completo del sistema con sus interacciones y restricciones correctamente establecidas. En este SAM no consideramos ninguna interacción permisiva, aunque podrían incorporarse algunas para mayor flexibilidad. Cuantas más

características se extraigan del SAM, más fiel será el modelo al comportamiento real del sistema.

La Figura 7 representa el modelo completo del SAM y un grupo potencial de faltas permanentes (lugares y transiciones de color rojo). Estas faltas se determinaron a partir del análisis de los estados y transiciones del sistema, considerando condiciones de bloqueo, fallas en sincronización y errores en la regulación del flujo de producción al conocer el comportamiento de un SAM.

Para que una situación se considere una falta en el modelo, se establecieron criterios como la permanencia indefinida en un lugar sin habilitación de transiciones o la activación de eventos en secuencias no permitidas. En este trabajo, se abordan faltas permanentes, es decir, aquellas que, una vez ocurren, no se resuelven sin una intervención externa. Estas faltas afectan el desempeño de los dispositivos del sistema y pueden provocar interrupciones en la producción. Ejemplos de estas faltas incluyen el paro indefinido de la banda transportadora, la ocupación prolongada de las máquinas CNC sin liberación de recursos y la acumulación de piezas en los alimentadores sin posibilidad de ser procesadas.

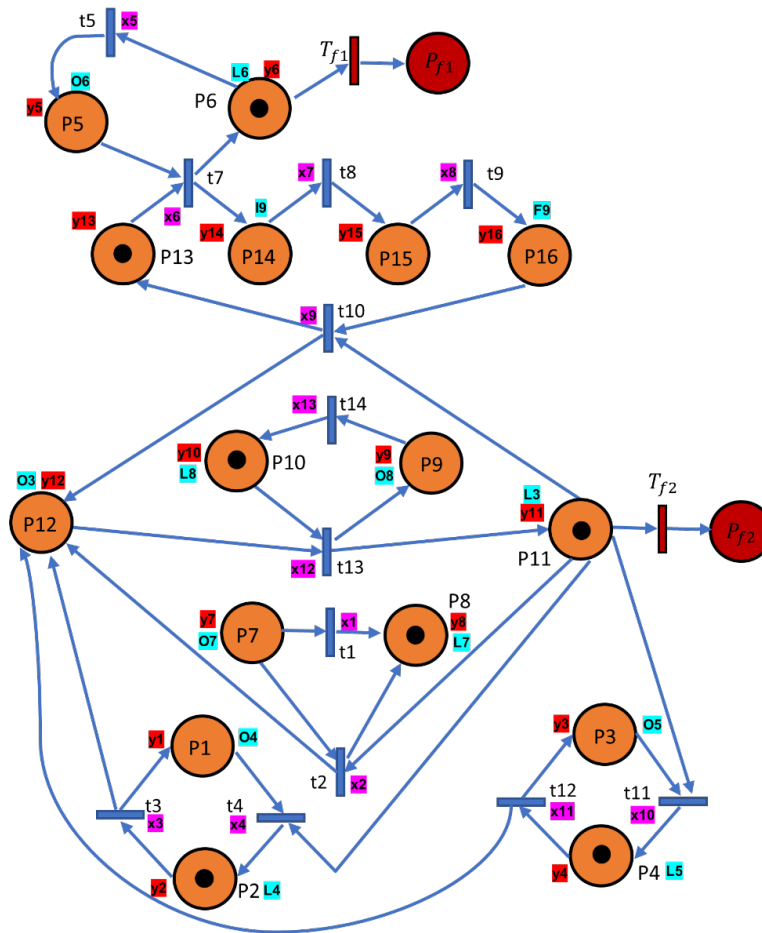


Figura 7 Modelo completo con faltas permanentes.

3.2 Análisis de la diagnosticabilidad en SAM del ITA

Para ejemplificar el análisis de la diagnosticabilidad, se optó por tomar el modelo donde interactúan la “Impresora 3D”, la “Banda Transportadora Impresora” y el “Efector final”, dichos modelos contienen dos faltas, T_{f1} y T_{f2} , ver Figura 8. 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” no pudo tomar la pieza o bien el robot no recibió la señal para accionar su efector final. La decisión de simplificar el modelo se basa en la necesidad de delimitar un escenario representativo que permitiera observar con claridad la interacción entre componentes y la manifestación de faltas relevantes, sin incrementar innecesariamente la complejidad del modelo. Además, al reducir el número de elementos modelados, se facilita la interpretación del comportamiento del sistema y se enfoca el análisis en los aspectos esenciales del diagnóstico, sin comprometer la validez ni la generalización del enfoque.

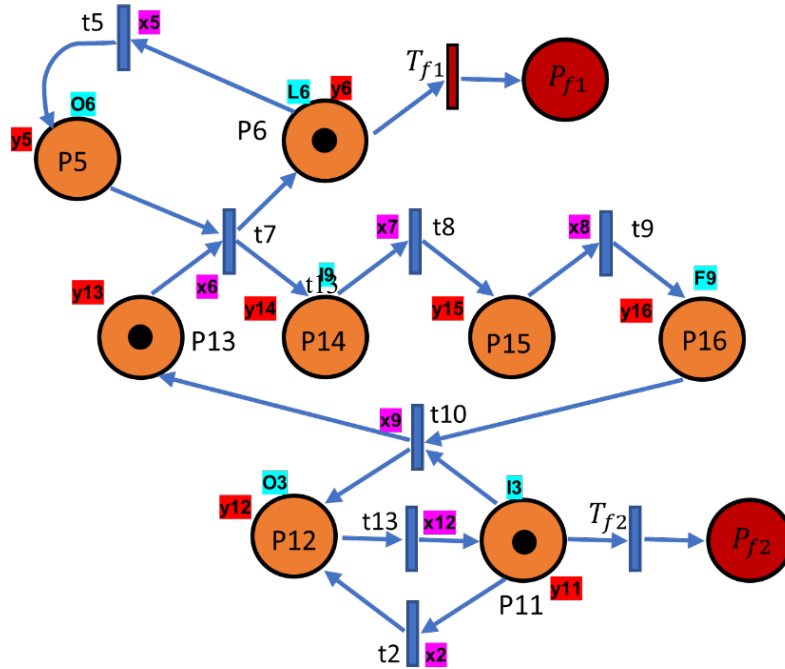


Figura 8 Modelo reducido no diagnosticable.

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 (Ruiz, 2007) la falta T_{f2} es diagnosticable ya que cada T- semiflujo se relaciona con el sifón $W_1 = \{p_{11}, p_{12}, p_{f2}\}$, cuando el sifón 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 sifón $W_2 = \{p_5, p_6, p_{f1}\}$, si se dispara la falla T_{f1} , X_2 podría dispararse infinitamente.

3.3 Diagnóstico activo con supervisor de Moody

Una de las principales desventajas de los sistemas automatizados de manufactura es que, cuando no poseen la propiedad de la diagnosticabilidad, las faltas pueden permanecer ocultas hasta que generan interrupciones graves en la producción. En esta tesis se modelan faltas permanentes, es decir, aquellas que, una vez que ocurren, no se resuelven sin intervención externa.

El interés principal de esta tesis es imponer la propiedad de la diagnosticabilidad en aquellos modelos SAM que no la poseen. De acuerdo con Sampath (Sampath, 1997) el control es útil para resolver este problema. Dentro del estado del arte de control en SED para RPI, existen algunos trabajos como control por regulación o el control supervisor. Estos dos enfoques no han sido reportados desde el enfoque del diagnóstico activo, es decir, para imponer la propiedad de la diagnosticabilidad. El control por regulación (Guevara, 2019) consiste en establecer una trama de lenguaje en específico para la planta, el control forzará a que se cumpla dicha secuencia de eventos. Este enfoque no resulta apropiado para buscar imponer la propiedad de la diagnosticabilidad ya que es muy restrictivo de acuerdo con lo reportado en Guevara (Guevara, 2019). Por otro lado, el control supervisor de Moody (Moody, 1998) se basa en el uso de lugares monitor que resultan del planteamiento de una restricción. La inspiración de esta tesis en el uso del control supervisor de Moody se originó ya que una falta es no diagnosticable cuando no existe relación vía transición con los T-semiflujos de la red o bien cuando existen secuencias que se disparan al infinito. Desde la perspectiva de las restricciones se debe forzar (control) a la planta a inhibir las secuencias al infinito cuando una falta se da. Para el modelo no diagnosticable de la Figura 8, se pueden generar restricciones de comportamiento con el fin de cumplir el objetivo de inhibir el comportamiento de la planta, 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. Las restricciones propuestas en este capítulo fueron determinadas con base en criterios experimentales fundamentados en el conocimiento del problema estudiado, dicho proceso se ve resumido en el diagrama de flujo de la Figura 9.



Figura 9 Diagrama de flujo de trabajo.

Para imponer la propiedad de la diagnosticabilidad en el sistema de la Figura 8 se establece una restricción que cree dependencia del T- invariante $\langle X_2 \rangle = \{t_2, t_{13}\}$ vía transiciones con el sifón $W_2 = \{p_5, p_6, p_{f1}\}$. La elección del invariante $\langle X_2 \rangle = \{t_2, t_{13}\}$ se hace debido a que cuando se dispara la falta T_{f1} se alcanza el marcado $M_3 = [p_5 \ p_6 \ p_{11} \ p_{12} \ p_{13} \ p_{14} \ p_{15} \ p_{16}] = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$ este se dispara al infinito alcanzando los siguientes marcados $M_4 = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$ y $M_5 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$ de forma cíclica.

La ecuación 16 muestra la restricción que impone la propiedad de la diagnosticabilidad. En la ecuación 17 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.

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

$$M(P_6) + M(P_{12}) + M(P_{13}) + M(P_{14}) + M(P_{15}) + M(P_{16}) + M(P_x) = 3 \quad (17)$$

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, ver ecuación 18.

$$Y^T \cdot \begin{bmatrix} C \\ P_x \end{bmatrix} = 0 \quad (18)$$

$$[0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & -1 \\ t_5 & t_7 & t_8 & t_9 & t_{10} & t_{13} & t_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (19)$$

$$[-1 + t_5 \quad 1 + t_7 \quad t_8 \quad t_9 \quad 1 + t_{10} \quad -1 + t_{13} \quad 1 + t_2] = 0 \quad (20)$$

La solución a la ecuación 19 y 20, 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. Mientras que $t_5 = t_{13} = 1$ las transiciones le quitan una marca al nuevo lugar P_x . y finalmente, $t_7 = t_{10} = t_2 = -1$ le darán una marca al nuevo lugar.

El cálculo del marcado inicial del nuevo lugar está definido por la ecuación 21, 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 22 indica el marcado inicial del nuevo lugar.

$$\mu_{px} = b - L\mu_{P_0} \quad (21)$$

$$\mu_{px} = 3 - [0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = 3 - 3 = 0 \quad (22)$$

El planteamiento de la restricción genera relaciones para el nuevo lugar, gráficamente quedaría representado por la Figura 10.

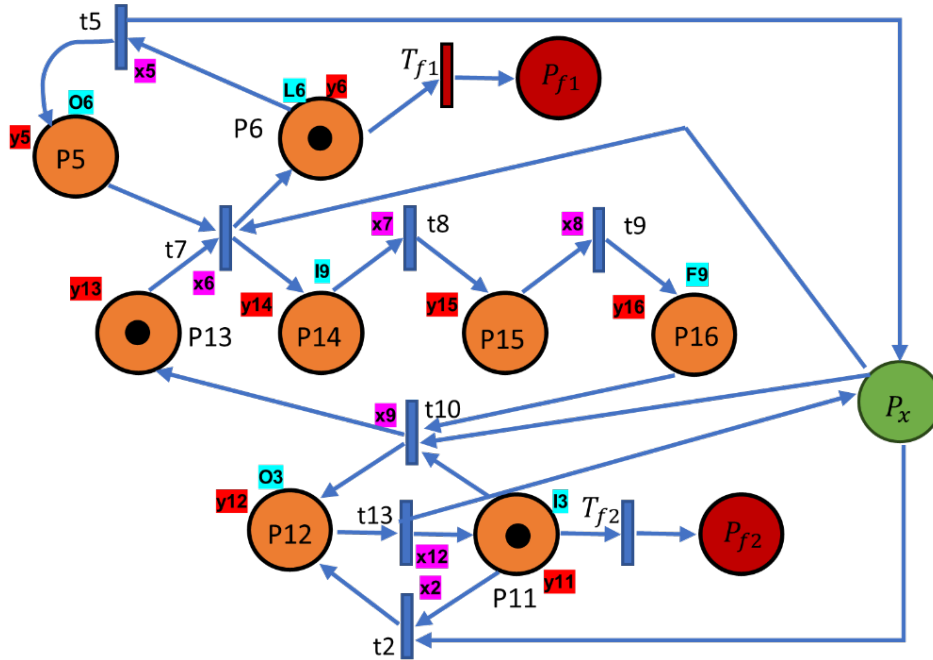


Figura 10 Modelo de RPI diagnosticable basado en el lugar monitor.

La falta que volvía al sistema no diagnosticable era T_{f1} , ya que el T-invariante que contiene las transiciones t_2 y t_{13} se pueden disparar de forma infinita, ver Figura 8, con ayuda del nuevo lugar monitor P_x , el modelo en RPI del sistema se vuelve diagnosticable, ver Figura

10. Supongamos un marcado inicial $M_0 = [p_5 \ p_6 \ p_{11} \ p_{12} \ p_{13} \ p_{14} \ p_{15} \ p_{16} \ p_x] = [0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ y se dispara la transición t_5 el marcado alcanzado será $M_1 = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$, esto permite el disparo en comportamiento normal de la RPI. Si, por otro lado, se dispara T_{f1} quitándole marca a p_6 , el marcado de la RPI es $M_1 = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$, dicho marcado no permite el disparo de ninguna otra transición, ya que la marca la retiene el lugar de falla P_{f1} por tal motivo la falta será diagnosticada en un número finito de pasos.

3.4 Validación de resultados con software Factory IO y Fourier Motzkin

Para validar los resultados y con el fin de simular faltas y condiciones críticas sin poner en riesgo el equipo, se diseñó en el software Factory IO (Real Games, 2024) una simulación del SAM, en la Figura 12 se muestra una vista lateral del sistema, una réplica del SAM del ITA. La Figura 11 es una vista superior del sistema, en ella se encuentran los nombres con la equivalencia de los elementos que se presentaron en la Figura 4 y finalmente, la Figura 13 es la representación de la implementación del esquema de diagnóstico de Paiva (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 (Al-Ajeli, 2021) y Paiva (Paiva, 2021).

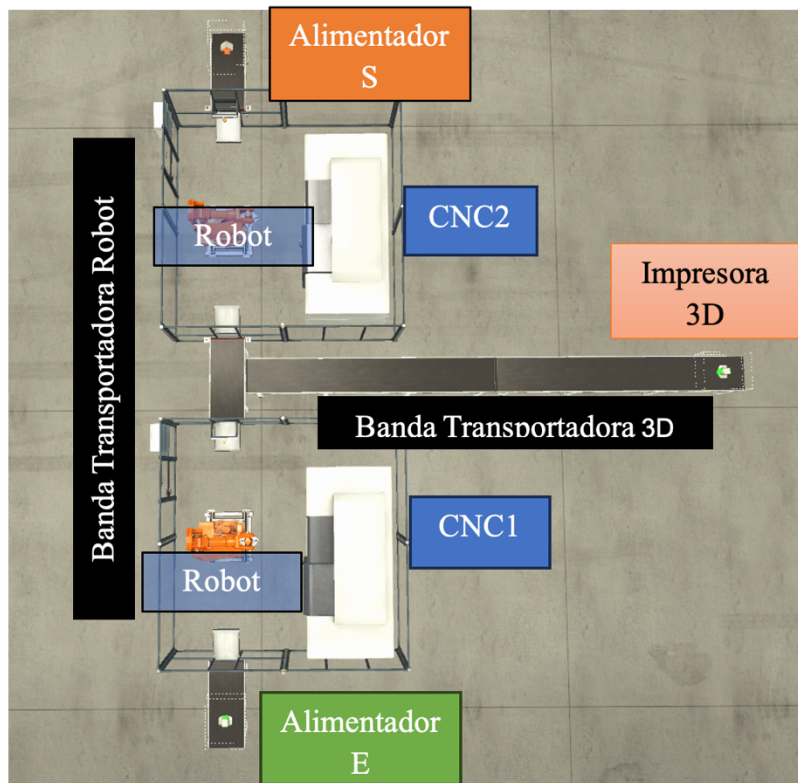


Figura 11 SAM virtual vista superior.



Figura 12 SAM virtual en software Factory IO.

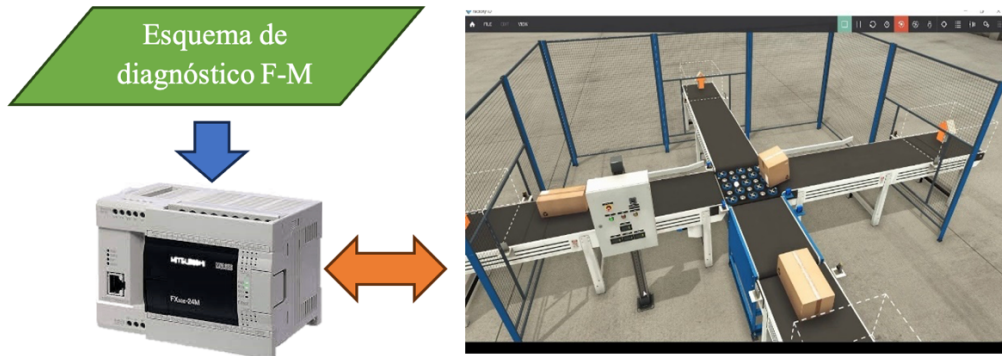


Figura 13 Esquema de implementación.

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

La Figura 14 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 (Paiva, 2021).

Definición 10. Sea una secuencia $S \in G(N, M_0)$, $v(s_0)$ corresponde al número de veces que las transiciones observables 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 , cuál de ellos se ha cumplido, ver ecuación 23. En el apartado de anexos 10.2, con el título “Códigos para pruebas de F-M”

se puede ver el código utilizado en el microcontrolador para la implementación del esquema de diagnóstico de F-M. S_0 corresponde a la proyección de eventos observables en la secuencia S de eventos.

$$S_0 \mapsto D(S_0) = \begin{cases} N, & \text{si } v(S_0) \models R_N \text{ y } v(S_0) \not\models R_F \\ FN, & \text{si } v(S_0) \models R_N \text{ y } v(S_0) \models R_F \\ F, & \text{si } v(S_0) \not\models R_N \text{ y } v(S_0) \models R_F \end{cases} \quad (23)$$

La ecuación 23 describe el funcionamiento del diagnosticador en línea basado en la evaluación de las desigualdades R_N y R_F , estos conjuntos son calculados mediante el método F-M obtenido un conjunto de sólo transiciones observables. Si las inecuaciones del conjunto R_N se satisfacen cuando se da una secuencia $v(S_0)$ pero no R_F , el sistema se considera en estado Normal (N), indicando certeza de que no ha ocurrido una falla. Si satisface tanto R_N como R_F , se clasifica como Falla/Normal (FN), reflejando incertidumbre sobre la ocurrencia de la falla. Finalmente, si $v(S_0)$ no satisface R_N pero sí R_F , el sistema está en Falla (F), confirmando que la falla ha ocurrido. Este enfoque permite diagnosticar en tiempo real el estado de un sistema, facilitando la detección y gestión de fallas en procesos automatizados.

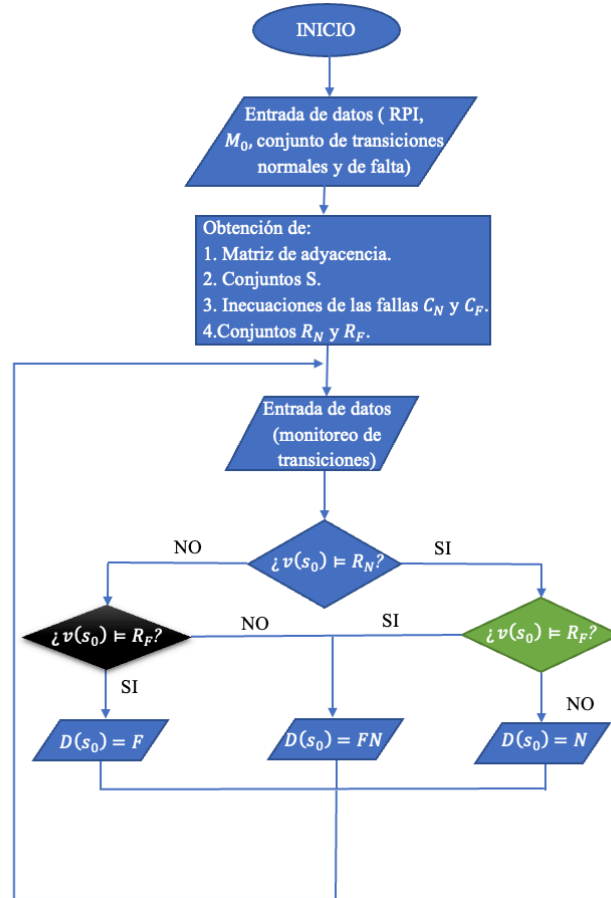


Figura 14 Algoritmo de diagnóstico de fallas mediante F-M.

Capítulo 4. Segunda aproximación con Diagnóstico Activo

Aunque los resultados de la primera aproximación de esta tesis arrojaban resultados en relación a encontrar una restricción que volviera al sistema diagnosticable. En esta tesis se definió y caracterizó el concepto de P-semiflujo activo, un elemento innovador diseñado para garantizar la diagnosticabilidad sin comprometer los T-semiflujos del lenguaje de la planta. Además, se desarrolló un sistema embebido para monitorear en tiempo real el estado de las salidas, fortaleciendo la precisión del diagnosticador mediante residuos.

4.1 Segunda aproximación- modelo físico y sistema digital construido en software Factory IO

En esta sección se presenta el modelo en físico y la simulación del SAM en el software Factory IO (Real Games, 2024), ver Figura 15.

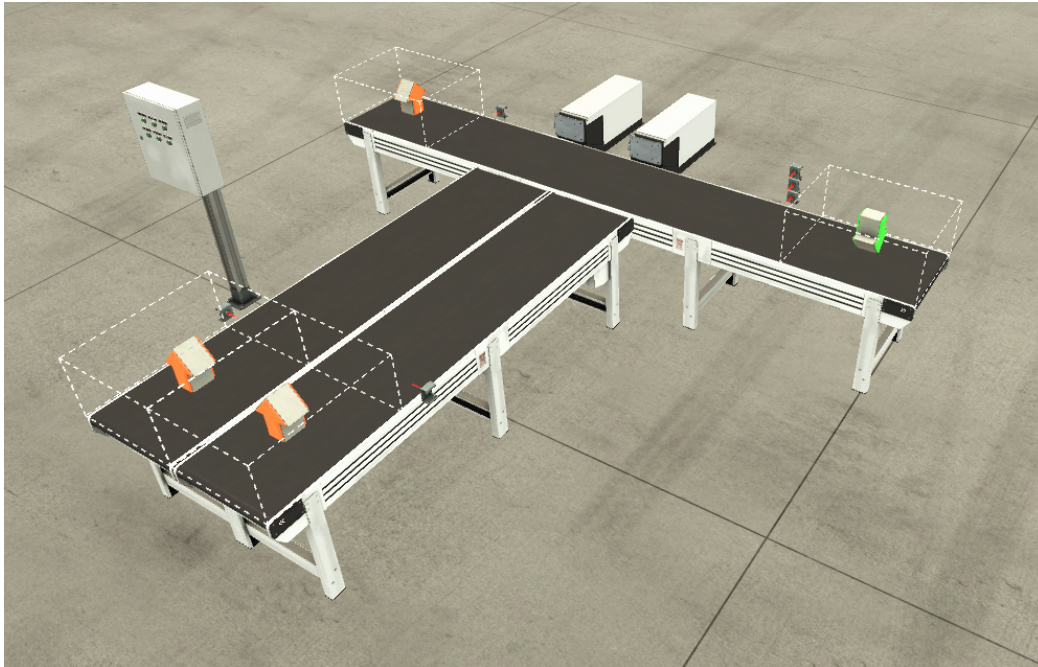


Figura 15 Sistema Digital en Factory IO.

El funcionamiento del sistema consiste en clasificar cajas de acuerdo con su tamaño. Las cajas se pueden separar en tres tamaños: pequeña, mediana y grande. En la Figura 16 se presenta una vista superior del modelo digital, todo lo descrito en esta sección estará referenciado a dicha ilustración. El funcionamiento del sistema comienza al presionar el botón de arranque (BA), el siguiente evento es la creación de un tamaño caja aleatorio en el generador de cajas sobre la banda transportadora (B1). La caja avanza sobre la banda transportadora hasta la zona de sensores. Los sensores presentan una disposición con el fin de detectar las diferentes cajas, para caja pequeña (SI1), caja mediana (SI2) y caja grande (SI3). La disposición de los sensores es uno sobre otro lo que permite que el controlador pueda determinar el tamaño de la caja de acuerdo con la combinación de ellos. Si la caja es

pequeña, recorrerá toda la banda transportadora (B1), al final se encuentra un sensor (SF_{B1}), mismo que al activarse reinicia el ciclo.

En el caso de la caja mediana, al posicionarse frente al pistón (P2) la banda (B1) se detiene y el pistón (P2), se activa. La caja pasa a la zona de la banda transportadora (B3) donde al llegar al sensor final (SF_{B3}), reinicia el ciclo. Finalmente, para la caja grande, al posicionarse frente al pistón (P1) se extiende luego de que la banda transportadora (B1) se detiene, la caja grande pasa a la zona de la banda transportadora (B2) para que el ciclo se reinicie luego de que el sensor final se active (SF_{B2}). Los tres elementos llamados “removedor de cajas” corresponden a elementos digitales que eliminan el elemento luego de que entra a la zona punteada. En un contexto práctico sería equivalente a retirar el elemento del SAM.

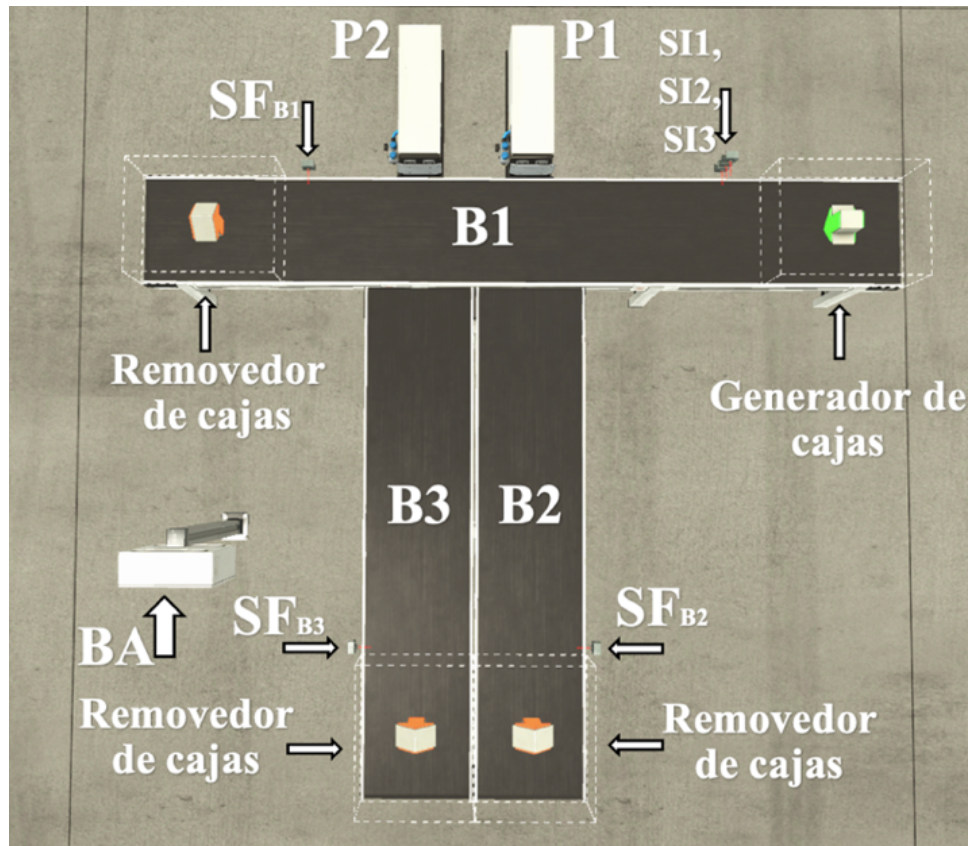


Figura 16 Vista Superior del modelo digital.

El gemelo del sistema digital se construyó con tres bandas transportadoras, actuadores lineales eléctricos tipo pistón, sensores inductivos y un PLC Mitsubishi serie Q. La Figura 17 muestra la vista superior del sistema de manufactura físico. Los elementos identificados como P1 y P2 corresponden a los pistones eléctricos encargados de posicionar las cajas durante el proceso. Los elementos B1, B2, y B3 corresponden a las bandas transportadoras. Los sensores que detectan el tamaño de las cajas son SI1, SI2, SI3. Finalmente, SF_{B1} , SF_{B2} y SF_{B3} corresponden a los sensores que se encuentran en la parte final de las bandas transportadoras.

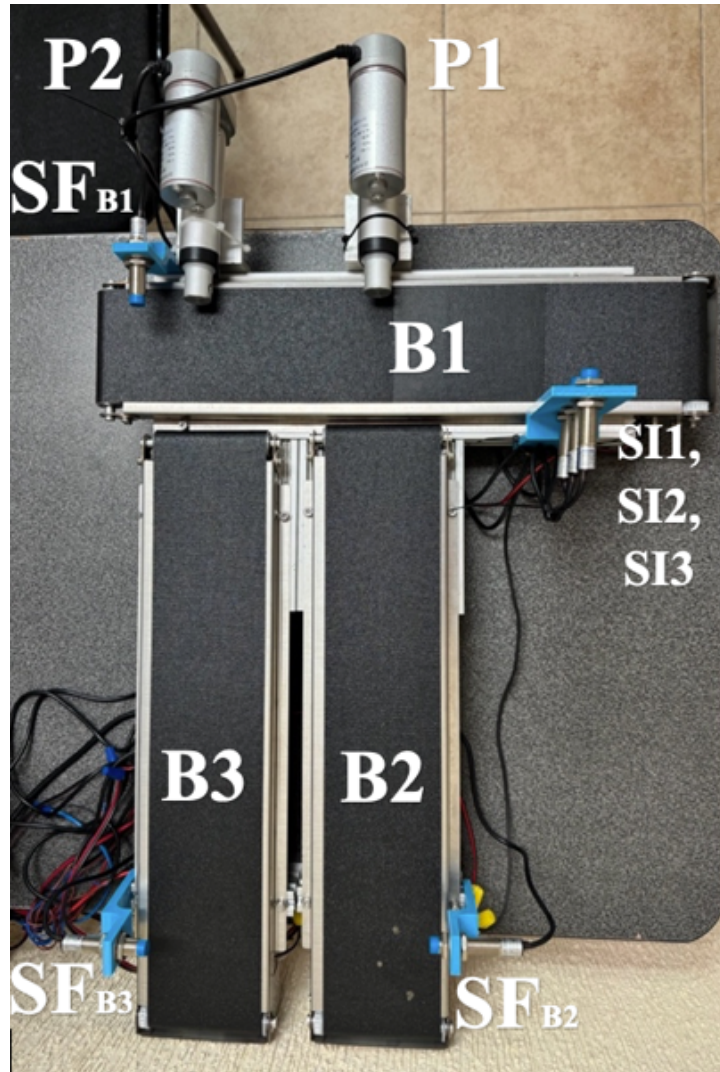


Figura 17 Vista Superior modelo físico.

La Figura 18 muestra la etapa eléctrica de control del sistema implementado, organizada en siete conjuntos funcionales que permiten identificar claramente la disposición y función de cada uno de los elementos. En el “Conjunto 1” se encuentra el PLC de la serie Q de la marca Mitsubishi, el cual incluye sus módulos de entradas digitales, salidas digitales, y una tarjeta de red modelo QJ71E71-100, que permite la comunicación industrial bajo el protocolo Modbus TCP. Este conjunto representa el núcleo del sistema de automatización y diagnóstico. El “Conjunto 2” está conformado por las clemas eléctricas, que facilitan una interconexión ordenada, segura y accesible entre los distintos componentes del sistema, permitiendo además un mantenimiento más eficiente.

En el “Conjunto 3” se localizan los sensores no invasivos tipo gancho SCT-013, los cuales se encargan de detectar la presencia de corriente en los conductores asociados a los actuadores, sin necesidad de interrumpir el cableado. Estos sensores son fundamentales para obtener una retroalimentación confiable sobre el estado real de los dispositivos de salida. El “Conjunto 4” corresponde al sistema embebido diseñado en este trabajo, basado en un

Arduino Nano, que recibe las señales de corriente de los sensores, las procesa y las transmite hacia el PLC mediante el módulo Ethernet ENC28J60, consolidando una arquitectura distribuida y eficiente para el diagnóstico de fallas. El “Conjunto 5” contiene las fuentes de poder de 24 VCD, responsables de alimentar tanto al PLC como a los sensores y al sistema embebido. Este conjunto garantiza la estabilidad y protección eléctrica del sistema. Por su parte, el “Conjunto 6” incluye un switch Ethernet, que permite el intercambio de información entre los dispositivos que comparten la red industrial, y una pastilla termoelectrica que actúa como dispositivo de protección ante sobrecargas térmicas o cortocircuitos. Finalmente, el “Conjunto 7” está integrado por relevadores eléctricos, que permiten el control de cargas a través de las salidas digitales del PLC, ofreciendo aislamiento entre la lógica de control y los actuadores conectados al sistema.

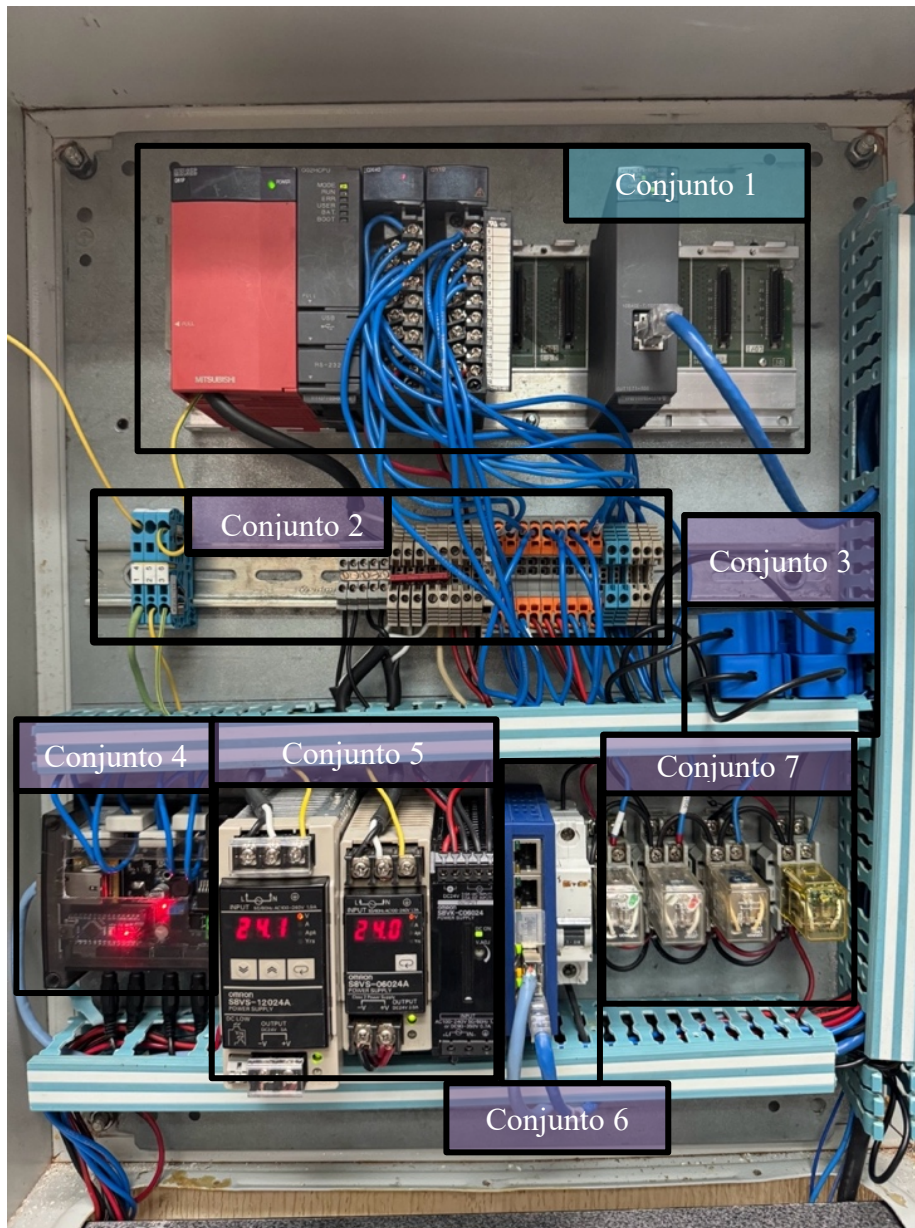


Figura 18 Sistema eléctrico de control con PLC Mitsubishi serie Q.

La Figura 19 corresponde a una vista isométrica del SAM, esto facilita la comprensión especial sin necesidad de utilizar varias vistas ortogonales del SAM.

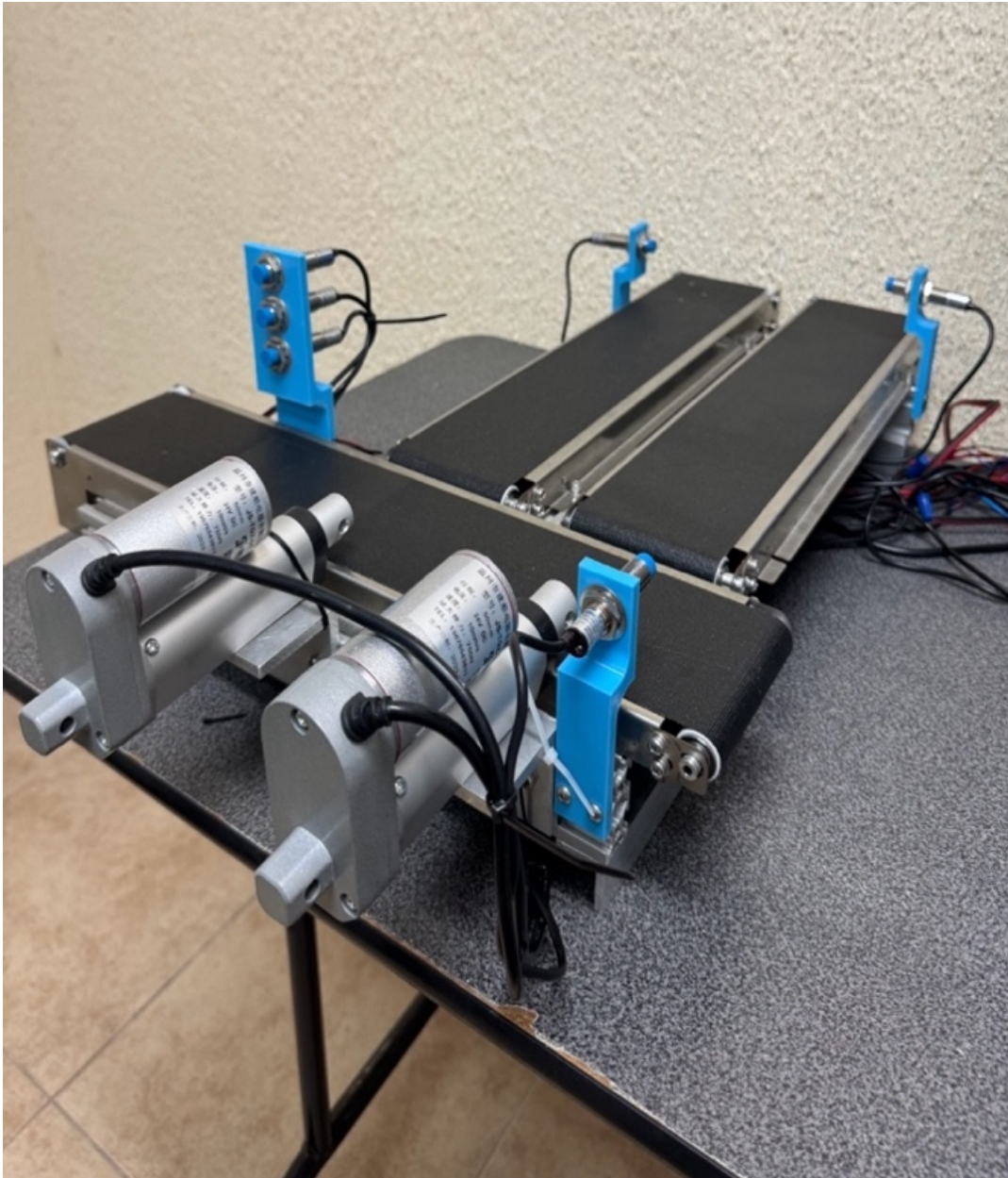


Figura 19 Vista isométrica de SAM.

4.2 Modelado de sistema físico o sistema digital en Redes de Petri Interpretadas

En este apartado se muestra el modelo en RPI del SAM bajo el enfoque de Guevara (Guevara, 2019). En la Tabla 2 se definen los elementos que componen el sistema, las variables que participan en la dinámica y el rango para cada variable propuesta.

Tabla 2 Elementos que componen al sistema.

Nombre en Modelo	Disposición	Descripción	Variable	Rango
BA	Entrada/Digital	Botón de arranque	Estado	<activado (A1), desactivado(D1)>
Sensor Tamaño (SI_1, SI_2 y SI_3)	Entrada/Digital	Sensor Inductivo 1 Sensor Inductivo 2 Sensor Inductivo 3	Estado	<activado tamaño 1 (AT1), activado tamaño 2 (AT2), activado tamaño 3 (AT3), desactivado(D2)>
SF_{B1}	Entrada/Digital	Sensor Inductivo 4	Estado	<activado (A3), desactivado(D3)>
SF_{B2}	Entrada/Digital	Sensor Inductivo 5	Estado	<activado (A4), desactivado(D4)>
SF_{B3}	Entrada/Digital	Sensor Inductivo 6	Estado	<activado (A5), desactivado(D5)>
B1	Salida/Digital	Banda transportadora	Estado	<encendido (E1), apagado (Ap8)>
B2	Salida/Digital	Banda transportadora	Estado	<encendido (E2), apagado (Ap9)>
B3	Salida/Digital	Banda transportadora	Estado	<encendido (E3), apagado (Ap10)>
P1	Salida/Digital	Pistón eléctrico	Posición	<Extendido (Ex1), Retraído(R1)>
P2	Salida/Digital	Pistón eléctrico	Posición	<Extendido (Ex2), Retraído(R2)>

La Figura 20 con base en la Tabla 2 presenta el modelo de cada elemento del sistema en RPI. Cada rango del sistema está descrito por un lugar P y su descripción está abreviada en la columna “Rango” de la Tabla 2. La relación sincrónica está identificada por las etiquetas “X”, mismas que relacionan el disparo de dos o más transiciones en el mismo instante de tiempo. Finalmente, las etiquetas de causalidad son aquellas que relacionan transiciones con lugares, las cuales se identifican con la “Y”, estas etiquetas corresponden a eventos que son causa-efecto.

De acuerdo con la metodología de Guevara (Guevara, 2019), después del modelado aislado de cada elemento, se establecen las relaciones permisivas y de sincronía. En la Figura 21 se observa que la relación permisiva, de color rojo Y_n , relaciona lugares con transiciones. Esta relación indica que una transición podrá dispararse únicamente si el lugar asociado se encuentra marcado, es decir, si existe una condición previa que habilita la acción. Por otro lado, la relación de sincronía, de color morado X_n , sucede cuando dos eventos suceden en el mismo instante de tiempo. Finalmente, se obtiene una abstracción del AMS en RPI completo siguiendo la metodología de modelado para Sistemas de Eventos Discretos modelados como RPI, ver Figura 21.

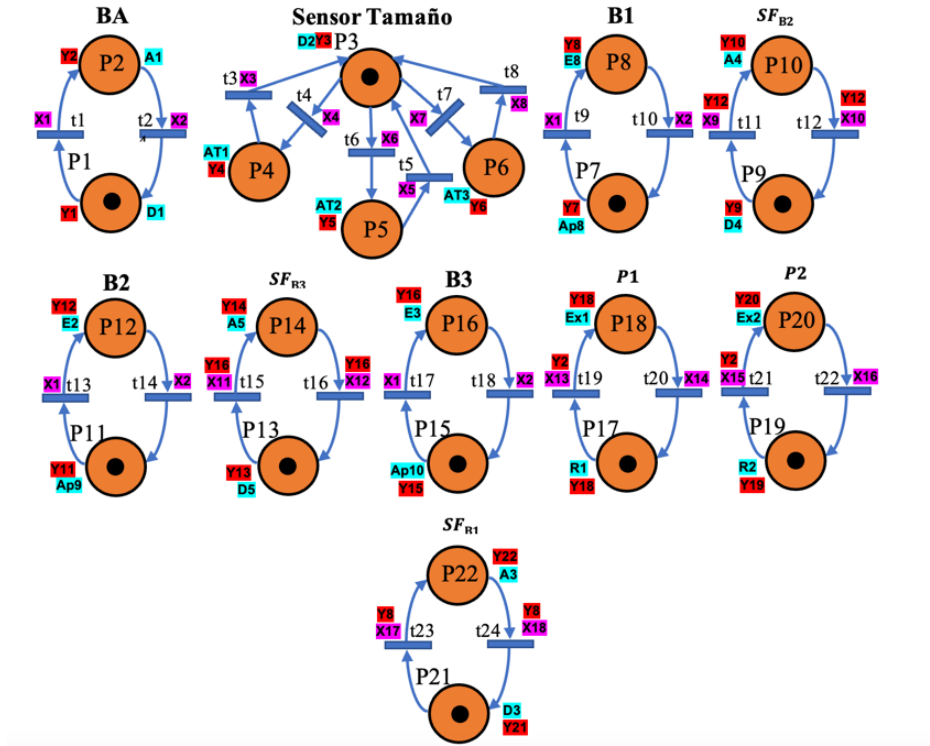


Figura 20 Modelos aislados en RPI.

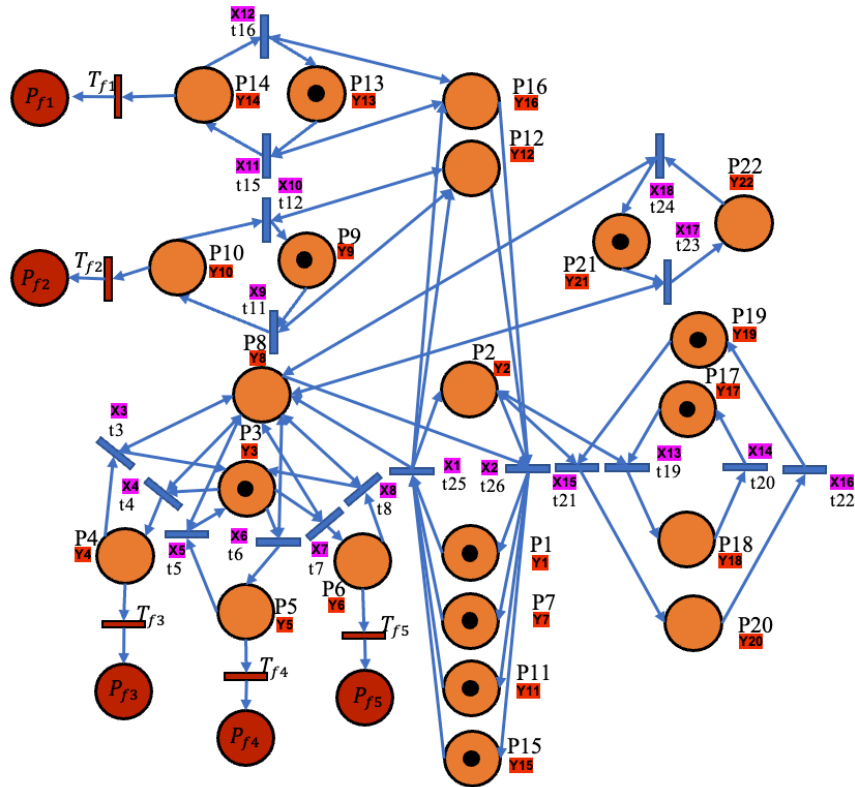


Figura 21 Modelo Completo con faltas permanentes.

4.3 Análisis de la diagnosticabilidad

Con base en lo propuesto por Ruiz (Ruiz, 2007) se modelan faltas permanentes. En la Figura 21 se muestran las faltas permanentes T_{f1} , T_{f2} , T_{f3} , T_{f4} y T_{f5} , que corresponden a faltas en los sensores a los que estén referenciadas. Por ejemplo, T_{f1} indica que el sensor inductivo 6 (SF_{B3}) presenta una falta. La posición de la falta está colocada en un lugar representativo de los diferentes sensores que contiene el sistema.

Para fines prácticos el vector M_k tendrá el valor de la cantidad de marcas que tiene cada lugar p_n , $M_k = [p_1 \dots p_{22}]$. Bajo la caracterización de Ruiz (Ruiz, 2007), todas las faltas no son diagnosticables debido a que los T-semiflujos $\langle X_a \rangle$ no se relacionan vía transiciones con los sifones (W_b). En un contexto práctico los T-semiflujos relacionados con la activación de sensores no representarán al sistema como no diagnosticable, por tal motivo, los T-semiflujos relacionados con sensores cuándo otro sensor este en falta, no se considerarán como T-semiflujo de interés, ya que la activación o no activación de un sensor no afectará al sistema de manufactura real. Por ejemplo, la falta T_{f1} es no diagnosticable debido a que los T-semiflujos $\langle X_1 \rangle = \{t_3, t_4\}$, $\langle X_2 \rangle = \{t_5, t_6\}$, $\langle X_3 \rangle = \{t_7, t_8\}$, $\langle X_4 \rangle = \{t_{11}, t_{12}\}$, $\langle X_5 \rangle = \{t_{20}, t_{22}, t_{25}, t_{26}\}$ y $\langle X_6 \rangle = \{t_{23}, t_{24}\}$ no se relaciona vía transiciones con la subred inducida por el sifón $W_1 = \{p_{13}, p_{14}, p_{f1}\}$, si se dispara la falla T_{f1} , los T-semiflujos X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 y X_6 se pueden disparar infinitamente. Como se había mencionado, los T-semiflujos relacionados con los sensores no serán considerados, por tal motivo sólo será considerado el T-semiflujo X_5 . Dicha T-semiflujo será el único que hace que la falta T_{f1} no sea diagnosticable, ya que estamos abordando el problema desde un contexto real.

4.4 Imposición del Diagnóstico Activo

El control supervisor de Moody (Moody, 1998) consiste en el planteamiento de una restricción de comportamiento, misma que se convierte en un lugar monitor que forzará a la planta al cumplimiento de la restricción. Las restricciones se deben plantear con base en la cantidad de marcas por lugar, por ejemplo, $M(P_1) + M(P_{12}) \geq 1$ indica que el número de marcas del lugar P_1 sumado al número de marcas de P_{12} debe ser mayor o igual a uno.

La propuesta de esta tesis consiste en calcular un P-semiflujo con un lugar monitor sobre los lugares de riesgo. El objetivo es que los T-semiflujos que vuelven al sistema no diagnosticable porque tienden a dispararse al infinito se vuelvan finitos. En este trabajo de tesis se introduce por primera vez el concepto de P-semiflujo activo y se define a continuación

Definición 11. Sea (Q, M_0) una RPI y $t_i \in T_f$. El conjunto de lugares de riesgo de t_i son $P_{R_i} = \{p_k | p_k \in \bullet t_i\}$. Los T-semiflujos de interés que se disparan al infinito luego de que la falta t_i se dio, se definen como $\langle X_{int} \rangle = \{\langle X_i \rangle | D_H(t_j, t_k) = \infty, \text{ donde } t_j, t_k \in \langle X_i \rangle\}$. Los lugares de interés son aquellos que pertenecen al P semiflujo donde la marca se desplaza de forma infinita luego de que se da la falta y sólo tiene un arco de entrada y uno de salida, la definición formal es $P_{int} = \{p_i \in P | |\bullet p_i \in \langle X_{int} \rangle| = 1 \wedge |p_i \bullet \in \langle X_{int} \rangle| = 1\}$. El P-

semiflujo activo se define como $\langle Y_{Act} \rangle = \{p_{int_1}, \dots, p_{int_{|X_{int}|}}, P_R\}$, este P-semiflujo activo vuelve diagnosticable la falta. Se debe elegir sólo un lugar P_{int} por cada elemento de $\langle X_{int} \rangle$ que cumplan con la definición de lugar de interés, a pesar de que dos o más lugares cumplan. Finalmente, las relaciones vía transiciones con la RPI se calculan bajo el enfoque de control supervisor de Moody donde: $M(p_{int_1}) + \dots + M(p_{int_{|X_{int}|}}) + M(P_R) \geq 0$.

Para imponer diagnosticabilidad en el sistema, se establece una restricción que crea dependencia del soporte del T- semiflujo $X_{int} = \langle X_5 \rangle = \{t_{20}, t_{22}, t_{25}, t_{26}\}$ con las transiciones de la subred inducida por el sifón $W_1 = \{p_{13}, p_{14}, p_{f1}\}$. Dado que el lugar de riesgo es $P_R = \{p_{14}\}$ y los lugares de interés son $P_{int} = \{p_{17}, p_{18}, p_{19}, p_{20}\}$ debido a que en estos lugares la marca se desplaza de forma infinita después de la ocurrencia de una falta, lo que provoca que dicha falta no sea diagnosticable. Del conjunto P_{int} sólo se elige un lugar por subred inducida de los T-semiflujos, con base en el conjunto se establece una restricción con todos los lugares que forman al P-semiflujo activo $\langle Y_{Act} \rangle = \{p_{14}, p_{18}, p_{20}\}$.

La ecuación 24 muestra la restricción que vuelve al sistema diagnosticable. En la ecuación 25 se agrega la variable de holgura para dar solución al problema, dicha ecuación contiene el nuevo lugar monitor P_x .

$$M(P_{14}) + M(P_{18}) + M(P_{20}) \geq 0 \quad (24)$$

$$M(P_{14}) + M(P_{18}) + M(P_{20}) + M(P_x) = 0 \quad (25)$$

La ecuación 26, muestra el anulador izquierdo de la matriz de incidencia, de acuerdo con la metodología de control supervisor de Moody, el nuevo lugar forma un P-semiflujo.

$$Y^T \cdot \begin{bmatrix} C_p \\ C_c \end{bmatrix} = 0 \quad (26)$$

$$Y^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1] \quad (27)$$

El resultado de la ecuación 27 y 28 muestra la solución estructural para establecer la restricción planteada en la ecuación 1. La relación del nuevo lugar P_x con el modelo de RPI queda representado gráficamente por la Figura 22. El resultado de la ecuación 26 indica las relaciones estructurales del nuevo lugar P_x , siendo estas: $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = x_6 = x_7 = x_8 = x_9 = x_{10} = x_{17} = x_{18} = 0$, indica que las transiciones no se relacionan con el nuevo lugar. En cambio, $x_{12} = x_{14} = x_{16} = 1$ indica que esas transiciones le quitan una marca al nuevo lugar P_x , mientras que $x_{11} = x_{13} = x_{15} = -1$ le darán una marca al nuevo lugar (P_x). Finalmente, el marcado inicial del lugar P_x está definido por la ecuación 29, donde μ_{px} es el marcado inicial del nuevo lugar P_x , b es el valor al que está igualado la restricción, L representa el vector Y^T sin considerar el lugar P_x y μ_{p_0} el marcado inicial de la planta sin incluir el lugar P_x . De acuerdo con la ecuación 29 el marcado inicial del nuevo lugar es 0. Esto se observa en el lugar P_x marcado de color verde de la Figura 22.

$$\begin{bmatrix} C \\ P_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{matrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 & x_{10} & x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} & x_{16} & x_{17} & x_{18} \end{matrix} \quad (28)$$

$$\mu_{px} = b - L\mu_{P_0} = 0 - [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (29)$$

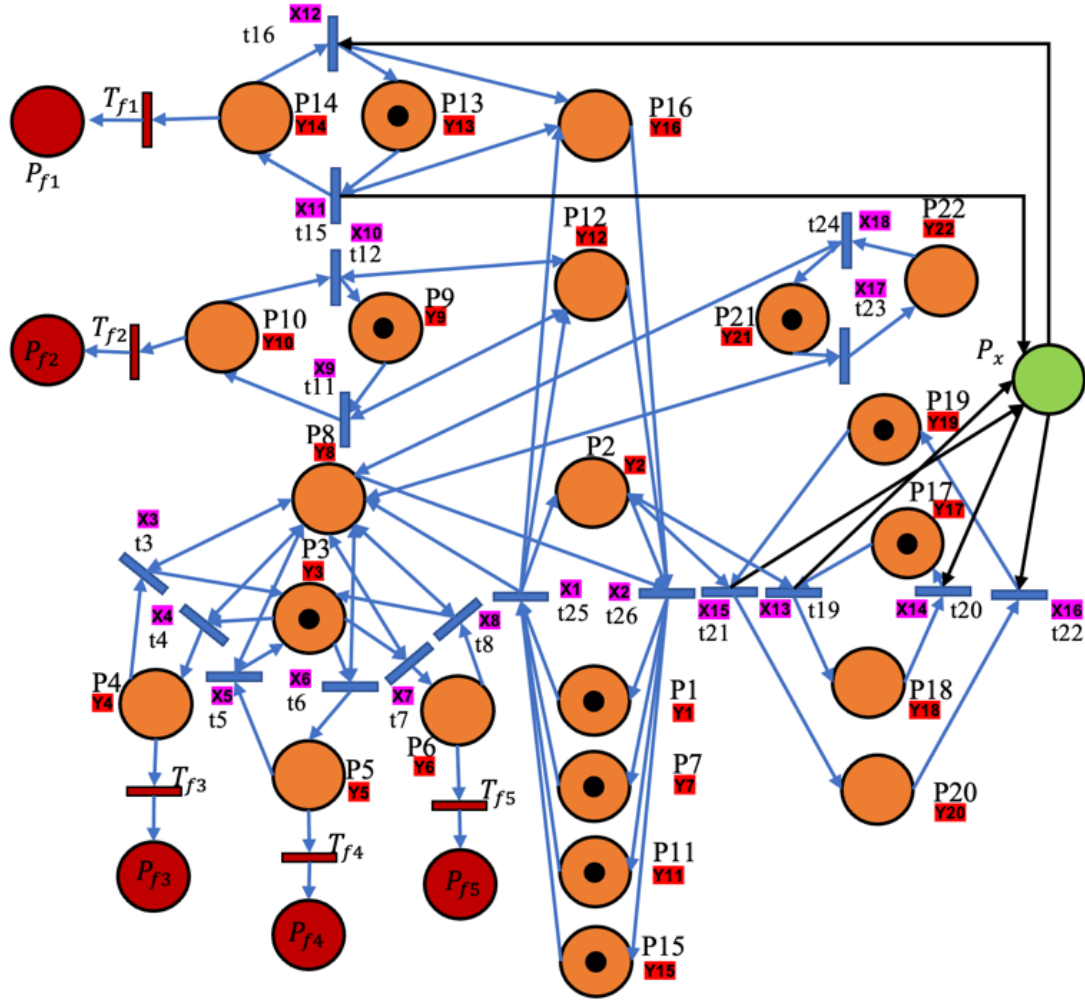


Figura 22 Diagnóstico Activo mediante supervisor de Moody.

4.5 Resultados

Una de las múltiples faltas que volvía al sistema no diagnosticable era T_{f1} , después de aplicar la metodología de diagnóstico activo mediante el supervisor Moody, con ayuda del nuevo lugar monitor P_x , la falta T_{f1} se vuelve diagnosticable. En la Figura 23 se muestra el disparo de T_{f1} la cual le quita la marca a p_{14} , dicho marcado no permite el disparo de ninguna otra transición ya que el lugar monitor P_x no permite que las transiciones de los pistones P_1 $\{t_{17}, t_{18}\}$ y P_2 $\{t_{19}, t_{20}\}$ se disparen al infinito, por tal motivo la falta será diagnosticada en un número finito de pasos de acuerdo con la definición de Ruiz (Ruiz, 2007). A diferencia de lo mostrado por Hernández (Hernández, 2018) la presente propuesta si conserva en su totalidad los T-semiflujos de la red. Esto garantiza que el comportamiento cíclico y repetitivo del sistema no se ve afectado por la inclusión del supervisor, manteniendo la coherencia funcional del modelo. Además, la implementación del lugar monitor no genera ambigüedad ni interfiere con otras transiciones no relacionadas con la falta, lo cual refuerza la robustez del enfoque propuesto.

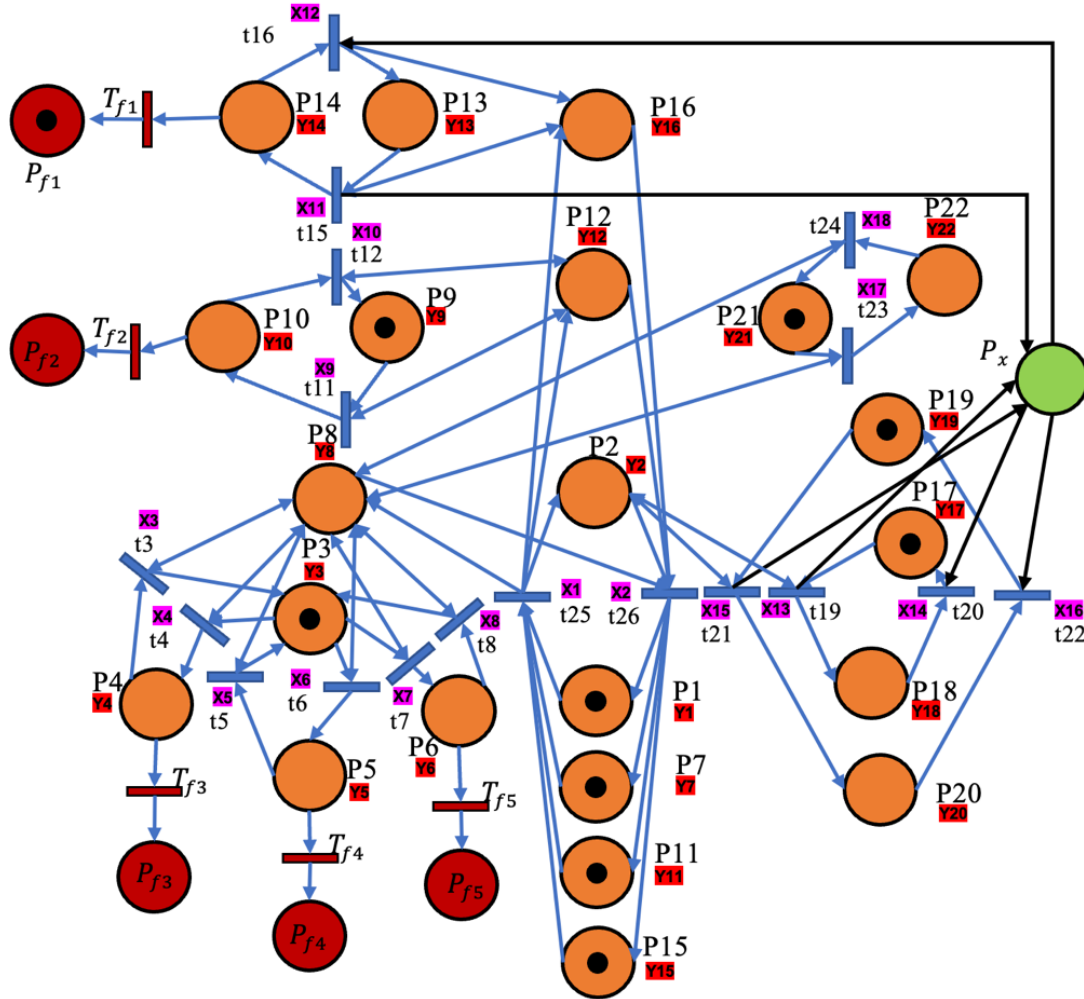


Figura 23 Disparo de falta T_{f1} .

4.5.1 Discusión

Hasta ahora se obtiene una metodología que es menos restrictiva en comparación a los circuitos de regulación de Hernández (Hernández, 2018) ya que se conservan las propiedades estructurales como los T-semiflujos, y se evitan los mono T-semiflujos que se presentaban en trabajos anteriores. La imposición de la propiedad de la diagnosticabilidad tiene muchas variantes, en nuestra propuesta se evita el uso de sensores extras en el modelo del sistema y, además, todo el análisis surge desde la estructura del sistema.

Capítulo 5. Esquema de detección y localización de faltas en SED mediante RPI

En este apartado se muestra el contenido relacionado con el diseño e implementación de esquemas de diagnóstico de faltas para SAM modelados como RPI. El esquema de diagnóstico utilizado es de Basile (Basile, 2022), su propuesta consiste en el monitoreo de las entradas y salidas del sistema cada cierto tiempo de acuerdo con un modelo de diagnóstico.

5.1 Implementación de esquemas de diagnóstico de faltas mediante residuos

Para validar los resultados obtenidos, se diseñó y construyó un sistema automatizado de manufactura, ver Figura 19. El esquema de residuos compara lo que espera ver, con lo que puede observar desde el punto de vista de un Controlador Lógico Programable. En el trabajo de Basile se asume que el PLC envía un vector v_k y la estampa de tiempo al diagnosticador. Al finalizar cada ciclo del PLC donde los eventos son registrados se puede determinar las faltas, ver ecuación 30.

$$v_k = \begin{bmatrix} l_{I,k} \\ l_{O,k} \\ t_{s_k} \end{bmatrix} \quad (30)$$

Donde $l_{I,k}$ representa a todos los elementos de entrada conectados al PLC y $l_{O,k}$ son los actuadores de salida, finalmente, t_{s_k} es la estampa de tiempo, es decir el tiempo de actualización de datos para comparar la información en el diagnosticador. Basile propone dos tipos de residuos, aquellos que son de comportamiento observado, ver ecuación 31 y 32.

$$Res_1(M_k, v_k, v_{k+1}) = Eventos_{obs}(v_k, v_{k+1}) \setminus Eventos_{exp}^U(M_k) \quad (31)$$

$$Res_2(M_k, v_k, v_{k+1}) = Eventos_{obs}(v_k, v_{k+1}) \setminus Eventos_{exp}^N(M_k) \quad (32)$$

La segunda clase de residuos está definida como comportamientos perdidos, ver ecuación 33 y 34. Un lector interesado puede consultar el método de residuos propuesto por Basile (Basile, 2022).

$$Res_3(M_k, v_k, v_{k+1}) = Eventos_{exp}^N(M_k) \setminus Eventos_{obs}(v_k, v_{k+1}) \quad (33)$$

$$Res_4(M_k, v_k, v_{k+1}) = Eventos_{exp}^U(M_k) \setminus Eventos_{obs}(v_k, v_{k+1}) \quad (34)$$

Donde $Eventos_{obs}(v_k, v_{k+1})$ es una función que mapea los eventos que fueron detectados por el controlador cuando el sistema evoluciono del estado v_k al v_{k+1} . $Eventos_{exp}^U(M_k)$ es el conjunto de todos los eventos posibles que el modelo permite en el sistema. Representan cualquier evento que podría ocurrir dentro del comportamiento esperado, incluso si no es obligatorio. $Eventos_{exp}^N(M_k)$ es el conjunto de eventos requeridos de acuerdo aquellos eventos que el usuario espera que se den. El residuo $Res_1(M_k, v_k, v_{k+1})$ se genera cuando un evento fue observado, pero no estaba en la lista de eventos esperados. El residuo $Res_2(M_k, v_k, v_{k+1})$ se genera cuando un evento fue observado, pero no estaba en la lista de eventos requeridos necesarios. El $Res_3(M_k, v_k, v_{k+1})$ señala la diferencia entre los eventos que se esperaban como necesarios (los obligatorios) y los eventos que realmente fueron observados en el sistema y finalmente, el $Res_4(M_k, v_k, v_{k+1})$ refleja la diferencia entre todos los eventos posibles y los eventos realmente observados. Básicamente, muestra los eventos que el modelo permitiría pero que no se han observado.

Desde el contexto práctico, el PLC identifica la activación de una entrada, es decir un elemento del conjunto $l_{O,k}$. Por ejemplo, si un sensor se activa, la señal la recibe el PLC directamente en sus periféricos. Si un botón de arranque se acciona, sucede lo antes mencionado. Un problema relevante radica en las salidas o bien los elementos del conjunto $l_{O,k}$. En SAM, comúnmente el PLC envía una señal para activar un pistón, pero en el estado actual, no existe una confirmación directa de que este se haya activado efectivamente. Esto puede ocasionar fallas críticas, como movimientos incompletos o inexactos, que a su vez impactan la seguridad del operador, la calidad del producto y la eficiencia del proceso. Por ejemplo, en una línea de ensamblaje, la falta de confirmación puede resultar en productos defectuosos si el pistón no realiza el movimiento esperado. En este trabajo se propone un sistema embebido que verifica activamente la respuesta del actuador, asegurando así que las fallas sean detectadas a tiempo, ver Figura 24.

5.2 Diseño y fabricación de sistema embebido

El sistema embebido propuesto es capaz de confirmar, mediante la lectura de sensores de corriente no invasivos, la activación de los elementos de salida, o bien $l_{O,k}$. En la Figura 24 se muestra el diseño electrónico del sistema embebido que consiste en cuatro sensores de corriente AC/DC modelo WCS1800, este sensor es tipo dona y para que funcione se tiene que pasar a través de él el cable que va conectado a la salida o al elemento del conjunto $l_{O,k}$. Además, contiene cuatro sensores de corriente alterna tipo gancho SCT-013. Los ocho sensores envían la información al microcontrolador y este a su vez procesa la información y mediante un módulo Ethernet ENC28J60 comparte la información al módulo de red QJ71E71-100 del PLC de la Marca Mitsubishi (modelo Q02HCPU) utilizando el protocolo de comunicación industrial Modbus.

El sistema embebido propuesto cuenta con ocho sensores de corriente no invasivos: cuatro sensores WCS1800 y cuatro SCT-013. El modelo WCS1800 es un sensor tipo dona de efecto Hall, capaz de medir corriente alterna y directa hasta ± 35 A, con una salida analógica proporcional a la corriente y un ancho de banda de aproximadamente 20 kHz, lo que permite detectar variaciones rápidas o transitorios. Por su parte, los sensores SCT-013 son de tipo gancho (transformador de corriente de núcleo dividido), diseñados para corriente alterna hasta 100 A RMS, con salida analógica de bajo voltaje y un ancho de banda centrado en 50–60 Hz, ideal para monitoreo en instalaciones eléctricas industriales. La información proveniente de los sensores es procesada por un microcontrolador ATmega328P, que opera a 16 MHz con una arquitectura de 8 bits y una resolución de 10 bits en su convertidor analógico-digital (ADC). Este procesador es adecuado para las tareas de adquisición de señales, comparación contra umbrales definidos y determinación lógica del estado de activación de los elementos de salida.

La comunicación entre el sistema embebido y el PLC Mitsubishi Q03UDECPU, a través del módulo de red QJ71E71-100, se establece mediante un módulo Ethernet ENC28J60, utilizando el protocolo Modbus TCP. En esta arquitectura, el PLC cumple el rol de cliente Modbus maestro, mientras que el sistema embebido actúa como servidor esclavo, respondiendo a las solicitudes de lectura de registros que contienen los valores monitoreados. El intercambio de información se realiza mediante una conexión TCP/IP estable, que incluye

el procedimiento de *handshake* propio del protocolo. Cada sensor está vinculado a una dirección específica de memoria en el Arduino, lo que permite al PLC acceder de forma estructurada y en tiempo real a los datos del sistema. Esta implementación asegura compatibilidad con estándares industriales y contribuye al desarrollo de mecanismos de diagnóstico activo, reforzando la confiabilidad operativa del sistema automatizado.

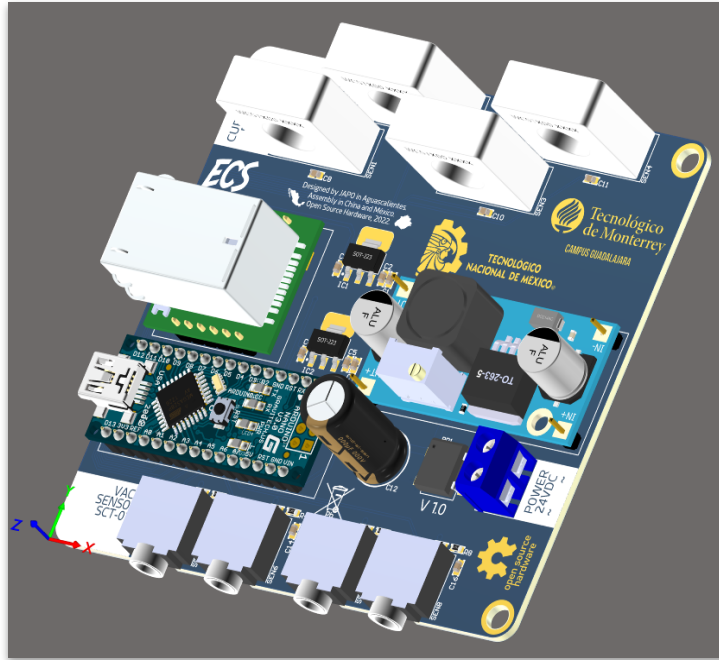


Figura 24 Sistema embebido de medición de corriente y comunicación Modbus.

La Figura 25 muestra la arquitectura dispuesta para el diagnóstico de faltas aplicado al SAM que se construyó, después de la ejecución de un ciclo del PLC, el diagnosticador (que está almacenado en el PLC) procesa el vector v_k y determina, mediante el método de residuos de Basile, la presencia de las faltas. Cabe destacar que esta disposición, con el sistema embebido que se diseñó, le permite al diagnosticador tener información certera sobre las salidas, además la propuesta no invasiva permite una implementación sin modificar el cableado eléctrico ni agregar entradas o salidas extras al PLC, ya que el intercambio de información es mediante el protocolo de comunicación Modbus. La ventaja de usar este tipo de protocolo es que se puede establecer comunicación con PLCs de diferentes marcas, ver Figura 26. En los Anexos de esta tesis se muestra el proceso de investigación que llevó a la elaboración del sistema embebido presentado en este apartado.

Una de las principales ventajas de utilizar el protocolo Modbus es su amplia adopción como estándar abierto y su compatibilidad con múltiples fabricantes de PLCs, como Siemens, Allen-Bradley, Schneider Electric, Omron, y Mitsubishi. Esto permite que la arquitectura de diagnóstico propuesta pueda ser replicable y escalable sin estar limitada a un proveedor específico. Además, Modbus TCP, al operar sobre redes Ethernet, facilita la integración con otros sistemas SCADA, HMIs o dispositivos embebidos, sin necesidad de hardware propietario o licencias. Esta interoperabilidad es particularmente valiosa en entornos

industriales heterogéneos, donde coexisten múltiples tecnologías, y se requiere flexibilidad para incorporar soluciones innovadoras como el sistema embebido propuesto sin comprometer la robustez del sistema original.

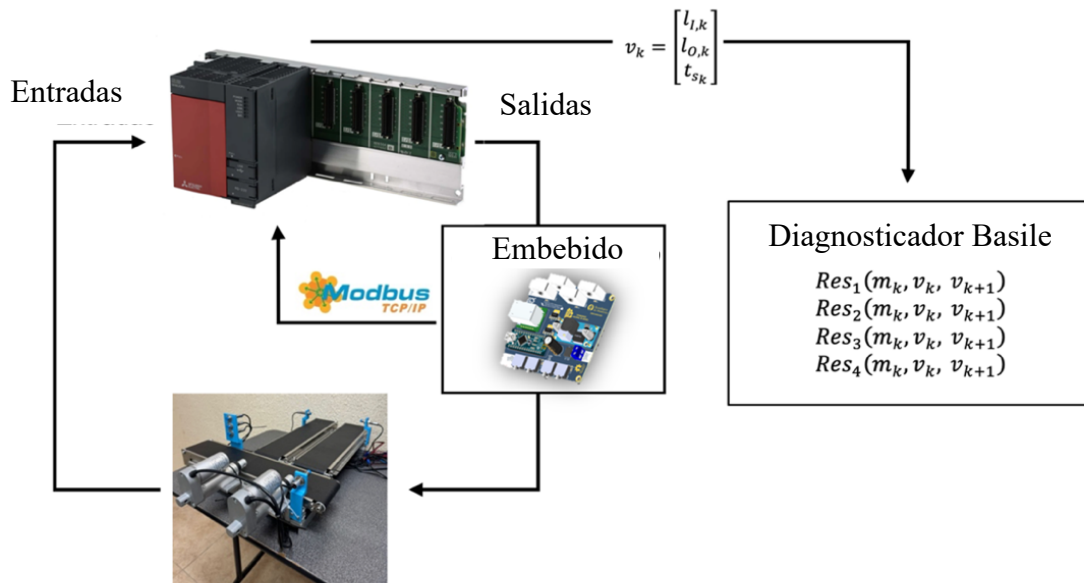


Figura 25 Arquitectura de diagnosticador.



Figura 26 Disposición para diagnóstico activo descentralizado.

A continuación, en la Tabla 3 y Tabla 4 se presentan el pseudocódigo empleado en microcontrolador con sensores de corriente y protocolo Modbus y el diagnosticador del PLC, respectivamente.

La Tabla 3 presenta el pseudocódigo correspondiente a la lógica implementada en el microcontrolador encargado de monitorear sensores de corriente y comunicarse con un PLC mediante el protocolo Modbus. El proceso inicia con la inicialización de los sensores de corriente y del módulo Ethernet. A continuación, se configuran ocho pines de entrada digital para conectar sensores de corriente, tanto de corriente directa (DC1 a DC4) como alterna (AC5 a AC8). Dentro de un bucle infinito, el microcontrolador realiza lecturas continuas del estado de demanda eléctrica de cada sensor y agrupa estos valores en un vector de salida. Este vector se empaqueta y se transmite hacia el PLC utilizando el protocolo Modbus sobre una conexión Ethernet. Finalmente, se establece un retardo temporal entre ciclos para mantener un intervalo constante de actualización.

Tabla 3 Pseudocódigo del microcontrolador.

Pseudocódigo 1. Microcontrolador con sensores de corriente y protocolo Modbus	
Línea de código	Resultado: Salidas activadas por el PLC
1	inicializar_sensores_corriente() inicializar_modulo_ethernet()
2	sensor_DC1 = CONFIGURAR(PIN_1) sensor_DC2 = CONFIGURAR(PIN_2) sensor_DC3 = CONFIGURAR(PIN_3) sensor_DC4 = CONFIGURAR(PIN_4) sensor_AC5 = CONFIGURAR(PIN_5) sensor_AC6 = CONFIGURAR(PIN_6) sensor_AC7 = CONFIGURAR(PIN_7) sensor_AC8 = CONFIGURAR(PIN_8)
3	While True: DC1 = LEER_DEMANDA (sensor_DC1) DC2 = LEER_DEMANDA (sensor_DC2) DC3 = LEER_DEMANDA (sensor_DC3) DC4 = LEER_DEMANDA (sensor_DC4) AC5 = LEER_DEMANDA (sensor_AC5) AC6 = LEER_DEMANDA (sensor_AC6) AC7 = LEER_DEMANDA (sensor_AC7) AC8 = LEER_DEMANDA (sensor_AC8)
4	Vector_salidas = VECTOR (DC1, DC2, DC3, DC4, AC5, AC6, AC7, AC8)
5	ENVIAR_MODBUS(paquete_datos, direccion_PLC, puerto_Modbus)
6	DELAY(tiempo_ciclo)

De acuerdo con el diagnosticador mediante residuos se establecen para cada estampa de tiempo los eventos esperados, que están relacionados con las activaciones de salidas y la lectura de las entradas. La función de la línea 8 en la Tabla 4 de la contiene dichos eventos en forma binaria. En el caso de los eventos observados definidos por la función de la línea 7 en la Tabla 4, en ella se guardan los eventos que el microcontrolador identificó como activos, mismos que son compartidos en forma binaria. Finalmente, la función “diferencia” compara los datos en las líneas de la 10 a la 13 en la Tabla 4, la cual consiste en realizar una simple diferencia de conjuntos, entre las variables inmiscuidas.

Tabla 4 Pseudocódigo del PLC.

Pseudocódigo 2. Diagnosticador PLC	
Línea de código	Resultado: Diagnóstico de faltas basado en residuos de Basile.
1	configurar_conexion_modbus()
2	While True:
3	l_I_k = LEER_ENTRADAS PLC ()
4	t_s_k = LEER_ESTAMPA_TIEMPO ()
5	l_O_k=RECIBIR_DATOS_MODBUS(direccion_microcontrolador, puerto_Modbus)
6	
7	eventos_obs = CALCULAR_EVENTOS_OBS(l_I_k, l_O_k, t_s_k)
8	eventos_exp = CALCULAR_EVENTOS_EXP(m_k)
9	
10	Res_1 = DIFERENCIA (eventos_obs, UNION (eventos_exp))
11	Res_2 = DIFERENCIA (eventos_obs, INTERSECCION (eventos_exp))
12	Res_3 = DIFERENCIA (INTERSECCION (eventos_exp), eventos_obs)
13	Res_4 = DIFERENCIA (UNION (eventos_exp), eventos_obs)
14	
15	if Res_1! = 0 or Res_2! = 0 or Res_3! = 0 or Res_4! = 0:
16	ACTIVAR_ALARMA ()
17	REGISTRAR_ERROR (Res_1, Res_2, Res_3, Res_4)
18	else:
19	FUNCIONAMIENTO_CORRECTO ()
20	DELAY(tiempo_ciclo)

5.3 Implementación

El SAM de la Figura 19 clasificador de cajas en su funcionamiento normal, logra clasificar el tamaño de las cajas de forma correcta, ver Figura 27.

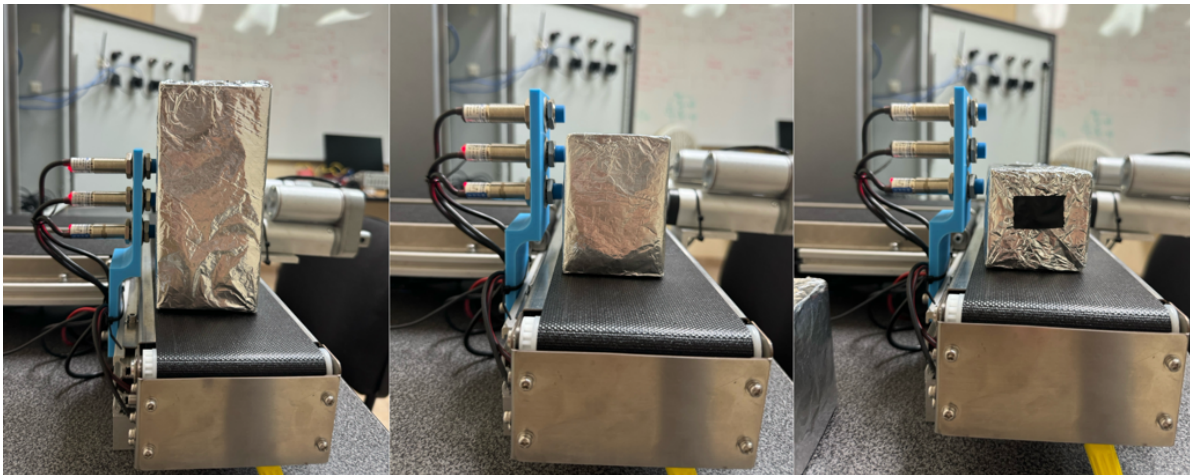


Figura 27 Diferentes tamaños de cajas.

Algunas de las faltas que fueron físicamente emulada de acuerdo al modelo de la Figura 23. En la siguiente Figura 28 se muestran las faltas asociadas a cada sensor, es decir, si t_{f3} se dispara significa que hubo una falta en el sensor superior, lo que puede indicar que el sensor no detectó correctamente la pieza, no envió la señal adecuada o está averiado.

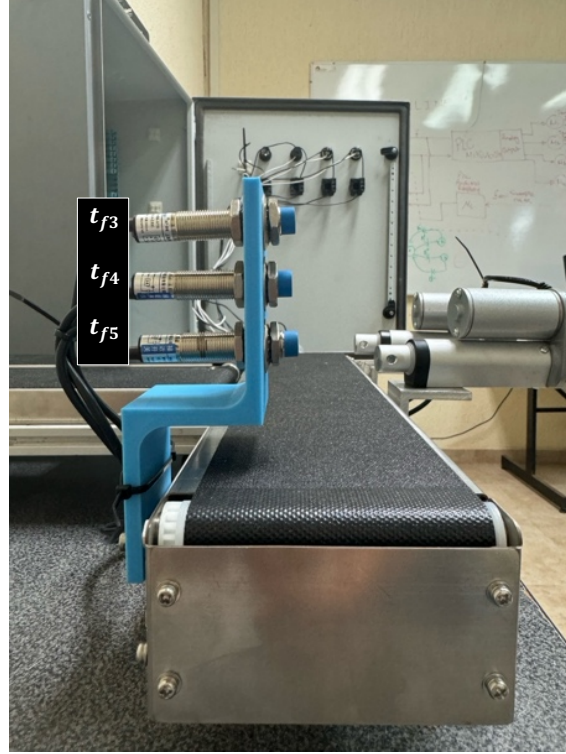


Figura 28 Disposición de sensores.

5.3.1 Caso de estudio

Para validar los resultados obtenidos en el sistema de diagnóstico de fallas, se implementó el método propuesto por Basile en un sistema automatizado de manufactura controlado por un PLC Mitsubishi de la serie Q. Este sistema replica un entorno de producción real, donde múltiples sensores y actuadores interactúan bajo el control cíclico del PLC.

El enfoque de Basile se basa en el análisis de residuos diagnósticos, los cuales se generan al comparar lo que el PLC observa contra lo que espera observar. Para ello, se requiere enviar al diagnosticador, al finalizar cada ciclo de escaneo del PLC, un vector de observación v_k y una estampa de tiempo asociada t_{s_k} . Este vector, ecuación 35, contiene toda la información relevante para el diagnóstico:

$$v_k = \begin{bmatrix} l_{I,k} \\ l_{O,k} \\ t_{s_k} \end{bmatrix} \quad (35)$$

Organización de datos en registros del PLC

Para registrar la información, se utilizaron los siguientes registros en el PLC Mitsubishi:

- D0: Almacena las entradas digitales. Cada bit del registro representa una señal de entrada, por ejemplo:
 - D0.0 → Sensor Inductivo 1 (SI_1)
 - D0.1 → Sensor Inductivo 2 (SI_2)
 - D0.2 → Sensor Inductivo 3 (SI_3)
 - D0.3 → Sensor Inductivo 4 (SF_{B1})
 - D0.4 → Sensor Inductivo 5 (SF_{B2})
 - D0.5 → Sensor Inductivo 6 (SF_{B3})
 - D0.6 → Botón de arranque (BA)
- D1: Almacena las salidas digitales, igualmente representadas por bits individuales:
 - D1.0 → Banda transportadora (B1)
 - D1.1 → Banda transportadora (B2)
 - D1.2 → Banda transportadora (B3)
 - D1.3 → Pistón eléctrico (P1)
 - D1.4 → Pistón eléctrico (P2)
- D2 y D3: Estos registros fueron utilizados para representar los eventos esperados, definidos por el modelo diagnóstico. Así:
 - D2 contiene el patrón de entradas y salidas esperado en un instante dado.
 - D3 contiene el patrón observado, a comparar contra D2 para detectar residuos.

En un PLC Mitsubishi, un registro D (*Data Register*) es una memoria interna de 16 bits utilizada para almacenar datos numéricos, resultados de operaciones, valores temporales o información de sensores y actuadores. Cada bit de estos registros puede ser accedido individualmente (por ejemplo, D0.0, D0.1, etc.), lo que permite trabajar con señales digitales dentro de un mismo registro. Los registros D pueden manejar datos en formato binario, BCD o decimal, y se identifican por su número, como D0, D1, D100, entre otros.

Ejemplo de operación y diagnóstico de fallas

Durante el ciclo de operación del sistema, al presionar el botón de arranque BA ($D0.6 = 1$), se debe encender la banda transportadora 1 B1 ($D1.0 = 1$) para iniciar el movimiento. Cuando el sensor inductivo 1 SI_1 ($D0.0 = 1$) detecta una pieza pequeña, esta comienza su trayecto por la banda. Finalmente, al llegar al final de la banda, el sensor final SF_{B1} ($D0.3$) debe activarse, lo cual indica que la pieza completó su recorrido y permite reiniciar el ciclo. Esta secuencia representa el comportamiento esperado para un ciclo normal de detección y transporte de una pieza pequeña, ver Tabla 5.

Tabla 5 Valores registrados en un ciclo de escaneo.

Registro	Valor binario	Significado
D0	01000001	Se presionó el botón de arranque BA (D0.6) y se detectó pieza pequeña SI_1 (sensor D0.0).
D1	00000001	Se activó la banda transportadora 1 (D1.0).
D2	01001001	Se esperaban: botón de arranque (D0.6), sensor de pieza pequeña (D0.0), y sensor final de banda SF_{B1} (D0.3).
D3	01000001	Se observaron: botón de arranque (D0.6) y sensor de pieza pequeña (D0.0).

Análisis

Durante el ciclo de operación del sistema, al presionar el botón de arranque ($D0.6 = 1$), se debe encender la banda transportadora 1 ($D1.0 = 1$) para iniciar el movimiento. Cuando el sensor inductivo 1 ($D0.0 = 1$) detecta una pieza pequeña, esta comienza su trayecto por la banda. Finalmente, al llegar al final de la banda, el sensor final SF_{B1} (D0.3) debe activarse, lo cual indica que la pieza completó su recorrido y permite reiniciar el ciclo. Esta secuencia representa el comportamiento esperado para un ciclo normal de detección y transporte de una pieza pequeña. Sin embargo, al comparar los registros D2 (eventos esperados) y D3 (eventos observados), se detecta que el sensor SF_{B1} (D0.3) no fue activado, lo cual evidencia una discrepancia en el comportamiento del sistema. Esta omisión genera un residuo tipo 3, $Res_3(M_k, v_k, v_{k+1}) = Eventos_{exp}^{\cap}(M_k) \setminus Eventos_{obs}(v_k, v_{k+1})$, ya que el sistema esperaba un evento (activación del sensor final SF_{B1}) que no se observó.

Esta condición puede deberse a diversas causas, como que la pieza no llegó al final de la banda debido a un atasco, caída o mal posicionamiento. También es posible que el sensor SF_{B1} (D0.3) esté dañado, mal conectado o desalineado. Otra posibilidad es que el tiempo de escaneo del PLC haya sido tan corto que la señal del sensor no fue detectada durante ese ciclo específico. Finalmente, no se descarta una falla eléctrica o la presencia de ruido que haya impedido el registro correcto de la señal en el sistema.

Segundo ejemplo de operación y diagnóstico de fallas

Durante el ciclo normal de operación, al presionar el botón de arranque BA ($D0.6 = 1$), el sistema debe activar la banda transportadora 1 B1 ($D1.0 = 1$), permitiendo que la pieza comience su recorrido. Posteriormente, si el sensor inductivo 1 SI_1 ($D0.0 = 1$) y el sensor inductivo 2 SI_2 ($D0.1 = 1$) detectan la presencia de una pieza mediana, al pasar frente al pistón eléctrico P1 y este lo desplaza a la banda transportadora B2 ($D1.1$), el sistema la desplaza hasta el final de la banda, donde el sensor SF_{B2} (D0.4) la detecta y se reinicia el ciclo. Este comportamiento, el valor en binario y los registros utilizados se observan en la Tabla 6.

El residuo tipo $Res_1(M_k, v_k, v_{k+1}) = Eventos_{obs}(v_k, v_{k+1}) \setminus Eventos_{exp}^{\cup}(M_k)$, se genera cuando el sistema observa la activación de un actuador que no debería haberse encendido. En el ejemplo proporcionado, si se observa una salida no contemplada en el modelo, como

por ejemplo la activación de D1.1 (que no estaba en el conjunto de eventos esperados), se genera un residuo tipo 1. Esto indica que el sistema registró un evento inesperado, como la activación de una salida o actuador que no forma parte de los eventos predichos por el modelo diagnóstico.

El residuo tipo 2, $Res_2(M_k, v_k, v_{k+1}) = Eventos_{obs}(v_k, v_{k+1}) \setminus Eventos_{exp}^n(M_k)$, se genera cuando el sistema observa un evento que no forma parte del conjunto mínimo de eventos esperados. En este caso, si se observa un evento como la activación de D1.2 (que no estaba en el conjunto de eventos esperados), se genera un residuo tipo 2. Este tipo de residuo indica que el sistema ha detectado una señal que no debería haber ocurrido según el modelo de diagnóstico. Las posibles causas para este residuo incluyen fallas en el hardware, como un actuador mal conectado o una salida activada por error.

El residuo tipo 3, $Res_3(M_k, v_k, v_{k+1}) = Eventos_{exp}^n(M_k) \setminus Eventos_{obs}(v_k, v_{k+1})$, se genera cuando el sistema esperaba que la banda transportadora 1 (D1.0) se activara, pero este evento no ocurrió. Al comparar los valores esperados (D2 = 01000001) y los observados (D3 = 01000000), se detecta que la banda no se activó, lo que genera la discrepancia. Este tipo de residuo indica que, a pesar de que el botón de arranque y el sensor inductivo 1 estuvieron activos, la banda transportadora no cumplió con la activación esperada. Las posibles causas de este residuo incluyen: falla eléctrica o mecánica en el motor de la banda 1.

El residuo tipo 4, $Res_4(M_k, v_k, v_{k+1}) = Eventos_{exp}^u(M_k) \setminus Eventos_{obs}(v_k, v_{k+1})$, se genera cuando el sistema esperaba una mayor cantidad de eventos, pero solo se observó una parte de ellos. En este caso, además de la activación del botón de arranque (D0.6 = 1) y el sensor inductivo 1 (D0.0 = 1), el sistema esperaba que la banda transportadora 1 (D1.0 = 1) y el sensor SF_{B1} (D0.3 = 1) también se activaran. Sin embargo, al comparar los valores esperados (D2 = 01000001) con los observados (D3 = 01000000), se observa que solo se activaron algunos de los eventos esperados, lo que genera el residuo tipo 4. Esto indica que, aunque el botón de arranque y el sensor inductivo 1 funcionaron correctamente, la banda transportadora y el sensor SF_{B1} no se activaron. Las causas comunes para este residuo incluyen: una falla en la conexión o desalineación del sensor SF_{B1} , problemas mecánicos con la banda transportadora o ruido eléctrico que afectó la señal.

Los residuos generados por el sistema de diagnóstico permiten identificar discrepancias específicas entre el comportamiento esperado y el observado. Cada tipo de residuo evidencia una clase distinta de faltas.

Tabla 6 Valores registrados en un ciclo de escaneo segundo caso de estudio.

Registro	Valor binario	Significado
D0	01000001	Botón de arranque (D0.6) y sensor inductivo 1 (D0.0) activos
D1	00000000	Ninguna banda activada
D2	01000001	Modelo diagnóstico: se esperaba botón de arranque (D0.6) y banda 1 (D1.0)
D3	01000000	Sólo se observó botón de arranque (D0.6); la banda no fue activada

5.4 Discusión

En el enfoque del diagnóstico activo, el presente trabajo es una mejora significativa respecto a lo que se había reportado hasta ahora. Mientras que el método de Hernández (Hernández, 2019) impone la propiedad de la diagnosticabilidad restringiendo al lenguaje de la planta a un único T- semiflujo, la aportación de este trabajo radica en la conservación de todos los T- semiflujo de la planta mediante la introducción del P-semiflujo activo que ha sido definida y caracterizada en esta tesis.

Aunque el P-semiflujo activo ofrece una solución menos restrictiva, es importante señalar que la implementación práctica de esta metodología puede requerir un análisis detallado de la complejidad computacional asociada y una evaluación de su aplicabilidad en sistemas de mayor escala requiere del modelado completo del sistema, además del análisis de la propiedad de la diagnosticabilidad desde el enfoque de Ruiz (Ruiz, 2007).

Referente a los esquemas de diagnóstico de faltas, la implementación de un sistema embebido con sensores no invasivos como soporte para el diagnosticador ha demostrado ser una solución efectiva para mejorar la precisión en el veredicto, proporcionando datos reales y actualizados sobre el estado de las salidas monitoreadas. Este enfoque resuelve una de las limitaciones principales sobre el método de residuos: la dependencia de supuestos para estimar el estado de las salidas, ya que el controlador mediante sus periféricos activa o desactiva las salidas sin recibir una retroalimentación sobre el estado real de las antes mencionadas.

En comparación con trabajos previos, donde los esquemas de diagnóstico con el método de residuos se basan en análisis indirecto, el trabajo propuesto ofrece una ventaja significativa en reducir el margen de error y la incertidumbre en el diagnóstico. Sin embargo, aún existe trabajo por abordar, como la mejoras en la velocidad de procesamiento por el microcontrolador y el uso de protocolos de redes industriales con mayor velocidad en el intercambio de información.

Además, aunque el sistema embebido ha mostrado un rendimiento sobresaliente en el SAM con pruebas controladas, es necesario evaluar su comportamiento en condiciones reales de operación, donde factores externos como el ruido eléctrico podrían influir en su desempeño. Este análisis abre la posibilidad de incorporar otras funcionalidades al sistema embebido, como algoritmos adaptativos que permitan ajustar la frecuencia de muestreo en el diagnóstico en tiempo real, lo cual podría ampliar significativamente el impacto y la aplicabilidad del sistema en SAM físicos.

Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones

La implementación del P-semiflujo activo para garantizar la propiedad de la diagnosticabilidad aporta al estado del arte desde la perspectiva teoría-práctica en SED enfocado a SAM. A diferencia de las metodologías previas que restringen el lenguaje de la planta a un solo T-semiflujo, la presente propuesta preserva la totalidad de T-semiflujos, asegurando la propiedad de la diagnosticabilidad en aquellos sistemas que no la poseen. La propuesta de P- semiflujo activo desarrollada crea dependencias entre T-semiflujos y faltas

no diagnosticables. Esta aportación sienta las bases para el desarrollo de métodos de diagnóstico activo de faltas menos restrictivos. En futuros trabajos, sería valioso explorar la aplicabilidad del P-semiflujo activo en sistemas de mayor complejidad, como aquellos con mayor número de elementos lo cual representa un reto el modelado del sistema y el análisis de la propiedad de la diagnosticabilidad. También se recomienda trabajar en optimizar el rendimiento computacional del método, buscando reducir el tiempo de procesamiento y los recursos necesarios para su implementación. Actualmente no se ha indagado si el P-semiflujo activo puede imponer la propiedad de la diagnosticabilidad en más de una falta a la vez, por tal motivo, se considera trabajar en esta propuesta.

Con respecto a la implementación del sistema embebido a los esquemas de diagnóstico de faltas al método de Basile (Basile, 2022) se logró incrementar la precisión del veredicto al proporcionar información directa y en tiempo real sobre el estado de las salidas. Además, se reduce la dependencia de las suposiciones en relación con las salidas, lo que representa una aportación significativa en la implementación de esquemas de diagnóstico en SAM. En el trabajo a futuro, se pretende explorar la optimización del sistema embebido, enfocándose en aspectos como incrementar la cantidad de periféricos y la velocidad de procesamiento del microcontrolador para entornos más complejos y diversificados para evaluar su desempeño en condiciones reales. Otra línea prometedora sería la integración de tecnologías emergentes, como sensores inalámbricos o aquellos pertenecientes a la industria 4.0, que podrían enriquecer aún más la capacidad del sistema para predecir faltas y mejorar la toma de decisiones en tiempo real. Finalmente, se recomienda implementar protocolos de redes industriales que no sean de uso libre ya que éste limita la velocidad de intercambio de información.

Capítulo 7. Referencias bibliográficas

1. ABUBAKAR, Umar; LIU, Gaiyun; UZAM, Murat. PETRI NET-BASED ROBUST SUPERVISORY CONTROL OF AUTOMATED MANUFACTURING SYSTEMS WITH MULTIPLE UNRELIABLE RESOURCES. *IEEE Access*, julio 2021, vol. 9, p. 100264-100278. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3096595. ISSN: 2169-3536.
2. ACOSTA, Samantha; RUIZ, Elvia; PRIETO, Josué; OROZCO, Jorge; VALDÉS, Octavio. DIAGNOSIS OF INTERMITTENT FAILURES IN AUTOMATIC MANUFACTURING SYSTEMS USING MACHINE LEARNING. *Pistas Educativas*, junio 2023, vol. 44, n° 144, p. 154-170. ISSN: 2448-847X.
3. AMRI, Omar; FRI, Mohamed; MSAAF, Mohammed, BELMAJDOUB, Fouad. INDUSTRIAL SYSTEMS FAULT'S DIAGNOSIS APPROACHES ADAPTED TO THE CONTEXT OF THE SMART INDUSTRY. 3rd International Conference on Innovative Research in Applied Science, Engineering and Technology, junio 2023, p. 1-5. DOI: 10.1109/IRASET57153.2023.10153043.
4. AL- AJELI, Ahmed; BORBDAR, Behzad. FOURIER-MOTZKIN METHOD FOR FAILURE DIAGNOSIS IN PETRI NET MODELS OF DISCRETE EVENT SYSTEMS. 13th International Workshop on Discrete Event Systems, junio 2016, p. 165-170. DOI: 10.1109/WODES.2016.7497843.
5. AL-AJELI, Ahmed; PARKER, David. FAULT DIAGNOSIS IN LABELLED PETRI NETS: A FOURIER–MOTZKIN BASED APPROACH. *Automatica*, octubre 2021, vol. 132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2021.109831>. ISSN: 0005-1098.
6. BASILE, Francesco; FERRERA, Luigi. RESIDUALS-BASED FAULT DIAGNOSIS OF INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS USING TIMED AND UNTIMED INTERPRETED PETRI NETS. *Control Engineering Practice*, diciembre 2022, vol. 129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2022.105361>. ISSN: 0967-0661.
7. BASILE, Francesco; DE TOMMASI, Gianmaria; STERLE, Claudio. SENSORS SELECTION FOR K-DIAGNOSABILITY OF PETRI NETS VIA INTEGER LINEAR PROGRAMMING. 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation, septiembre 2015, p. 168-175. DOI: 10.1109/MED.2015.7158746.
8. CABASINO, Maria; GIUA, Alessandro; SEATZU, Carla. FAULT DETECTION FOR DISCRETE EVENT SYSTEMS USING PETRI NETS WITH UNOBSERVABLE TRANSITIONS. *Automatica*, septiembre 2010, vol. 46, n° 9, p. 1531-1539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2010.06.013>. ISSN: 0005-1098.
9. CABASINO, Maria; GIUA, Alessandro; POCCI, Marco; SEATZU, Carla. DISCRETE EVENT DIAGNOSIS USING LABELED PETRI NETS. AN APPLICATION TO MANUFACTURING SYSTEMS. *Control Engineering Practice*, septiembre 2011, vol. 19, n° 9, p. 989-1001. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.12.010>. ISSN: 0967-0661.
10. CHANTHERY, Elodie; PENCOLE, Yannick. MONITORING AND ACTIVE DIAGNOSIS FOR DISCRETE-EVENT SYSTEMS. 7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, julio 2009, vol. 42 n° 8, p. 1545-1550. DOI: <https://doi.org/10.3182/20090630-4-ES-2003.00252>. ISSN: 1474-6670.

11. CHEN, Ziqiang; LIN, Feng; WANG, Caisheng; WANG, Yi; XU, Min. ACTIVE DIAGNOSABILITY OF DISCRETE EVENT SYSTEMS AND ITS APPLICATION TO BATTERY FAULT DIAGNOSIS. *Control Systems Technology*, noviembre 2014, vol. 22 n°5, p. 1892-1898. DOI: 10.1109/TCST.2013.2291069.
12. CONG, Xuya; PIA-FANTI, Maria; MANGINI, Agostino; Li, Zhiwu. CRITICAL OBSERVABILITY VERIFICATION AND ENFORCEMENT OF LABELED PETRI NETS BY USING BASIS MARKINGS. *IEEE Transactions on Automatic Control*, julio 2023, vol. 68, no. 12, p. 8158-8164. DOI: 10.1109/TAC.2023.3292747. ISSN: 0018-9286.
13. CONTANT, Oliver; LAFORTUNE Stéphane; Teneketzis Demosthenis. DIAGNOSIS OF INTERMITTENT FAULTS. *Discrete Event Dynamic Systems*, abril 2004, vol. 14, p.171-202. <https://doi.org/10.1023/B:DISC.0000018570.20941.d2>.
14. DANTZIG, George. FOURIER-MOTZKIN ELIMINATION AND ITS DUAL. *National Technical Information Service*, septiembre 1972, p. 288-297. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602056>.
15. DEBOUK, Rami; LAFORTUNE, Stéphane; TENEKETZIS Demosthenis. COORDINATED DECENTRALIZED PROTOCOLS FOR FAILURE DIAGNOSIS OF DISCRETE EVENT SYSTEMS. *Discrete Event Dynamic Systems*, enero 2000, vol. 10, p.33-86. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1008335115538>.
16. GAITAN, Vasile; ZAGAN, Ionel. MODBUS PROTOCOL PERFORMANCE ANALYSIS IN A VARIABLE CONFIGURATION OF THE PHYSICAL FIELD BUS ARCHITECTURE. *IEEE Access*, noviembre 2022, vol. 10, p. 123942-123955. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3224720. ISSN: 2169-3536.
17. GAONA, Anibal; CHÁVEZ, José; Vázquez, Carlos. RCPETRI: A MATLAB APP FOR THE SYNTHESIS OF PETRI NET REGULATION CONTROLLERS FOR INDUSTRIAL AUTOMATION. *26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, noviembre 2021, p. 01-07. DOI: 10.1109/ETFA45728.2021.9613441.
18. GUEVARA, Daniel; VÁZQUEZ, Carlos; RAMÍREZ, Antonio. REGULATION CONTROL OF DISCRETE EVENT SYSTEMS FOR INDUSTRIAL AUTOMATION. *Coloquio DESH*, octubre 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.14494.69441.
19. GUEVARA, Daniel; VÁZQUEZ, Carlos; RAMÍREZ, Antonio. AUTOMATIC SPECIFICATION GENERATION FOR TRACKING CONTROL IN INTERPRETED PETRI NETS. *7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies*, noviembre 2020, vol. 1, p. 341-346. DOI: 10.1109/CoDIT49905.2020.9263927. ISSN: 2576-3555.
20. HADJICOSTIS, Christoforos. CODING APPROACHES TO FAULT TOLERANCE IN DYNAMIC SYSTEMS. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, noviembre 2001, vol. 1. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0853-3>. ISSN: 0893-3405.
21. HADJICOSTIS, Christoforos. PROBABILISTIC FAULT DETECTION INFINITE-STATE MACHINES, *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, agosto 2002, vol.4, p. 3994-3999. DOI:10.1109/CDC.2002.1184991.

22. HASHTRUDI-ZAD, Shahin; KWONG, Raymond; WONHAM, Walter. FAULT DIAGNOSIS IN DISCRETE EVENT SYSTEMS: FRAMEWORK AND MODEL REDUCTION. *IEEE Transactions on Automatic Control*, diciembre 1998, vol.4, p. 3769-3774. DOI: 10.1109/CDC.1998.761808. ISSN: 0191-2216.
23. HERNANDEZ, Karen; MEDA-CAMPAÑA, Maria Elena; ARAMBULO-LIZARRAGA, Jesus. ENFORCING DIAGNOSABILITY IN INTERPRETED PETRI NETS. *IFAC-PapersOnLine*, enero 2015, vol. 48, n° 7, p. 58-63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.473>. ISSN: 2405-8963.
24. HERNANDEZ, Karen; MEDA-CAMPAÑA, Maria Elena; HARO, Bernardo. DETECCIÓN ACTIVA DE FALTAS EN SISTEMAS DE EVENTOS DISCRETOS. *Pistas Educativas*, 2018, vol. 39, n° 128, p. 730-748. ISSN: 2448-847X.
25. HEYNICKE, Ralf; KRUSH, Dmytro; CAMMIN, Christoph; SCHOLL, Gerd. IO-LINK WIRELESS ENHANCED FACTORY AUTOMATION COMMUNICATION FOR INDUSTRY 4.0 APPLICATIONS. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 2018, vol. 7, n° 1, p.131-142. DOI: 10.5194/jsss-7-131-2018.
26. HU, Yihui; MA, Ziyue; LI, Zhiwu. ACTIVE DIAGNOSIS OF PETRI NETS USING Q-DIAGNOSER. *IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering*, 2019, p. 203-208. DOI: 10.1109/COASE.2019.8842930. ISSN: 2161-8089.
27. HU, Yihui; MA, Ziyue; GIUA, Alessandro. DIAGNOSABILITY ENFORCEMENT IN LABELED PETRI NETS USING SUPERVISORY CONTROL. *Automatica*, 2021, vol. 131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2021.109776>. ISSN: 0005-1098.
28. HU, Yihui; HU, Shaopeng; LI, Xiaoyan; CAO, Shengli, DU, Huanchao; LI, Dan. SUPERVISOR SYNTHESIS FOR ASYNCHRONOUS DIAGNOSABILITY ENFORCEMENT IN LABELED PETRI NETS. *Information Sciences*, 2024, vol. 667. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.120907>. ISSN: 0020-0255.
29. HU, Shaopeng; LI, Zhiwu. A DIGITAL TWIN APPROACH FOR ENFORCING DIAGNOSABILITY IN PETRI NETS. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2024, vol. 21, n° 4, p. 6068-6080. DOI: 10.1109/TASE.2023.3321781. ISSN: 1545-5955.
30. HU, Shaopeng; LI, Zhiwu. OPTIMAL SENSOR SELECTION FOR DIAGNOSABILITY ENFORCEMENT IN LABELED PETRI NETS. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2024, vol. 54, n° 5, p. 2965-2977. DOI: 10.1109/TSMC.2024.3351740. ISSN: 2168-2216.
31. KANG, Tenglong; SEATZU, Carla; LI, Zhiwu, GIUA, Alessandro. FAULT DIAGNOSIS OF DISCRETE EVENT SYSTEMS UNDER ATTACK. *62nd IEEE Conference on Decision and Control*, 2023, p. 7923-7029. DOI: 10.1109/CDC49753.2023.10383814. ISSN: 0743-1546.
32. KOHLER, Andreas; ZHANG, Ping; FAULT DIAGNOSIS IN DISCRETE EVENT SYSTEMS MODELED BY SIGNAL INTERPRETED PETRI NETS. *IFAC-PapersOnLine*, 2023, vol. 56, n° 2, p.4576-4581. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.958>. ISSN: 2405-8963.
33. LI, Chengzong; CHEN, Yufeng; LI, Zhiwu. SUPERVISORY CONTROL OF DISCRETE EVENT SYSTEMS WITH DYNAMIC CONTROL SPECIFICATIONS BY PETRI NETS. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2024, vol. 32, no. 2, p. 518-533. DOI: 10.1109/TCST.2023.3325751. ISSN: 1063-6536.

34. LIN, Feng. DIAGNOSABILITY OF DISCRETE EVENT SYSTEMS AND ITS APPLICATIONS. *Discrete Event Dyn Syst*, 1994, vol. 4, p.197–212. <https://doi.org/10.1007/BF01441211>.
35. LIN, F; WONHAM, W. DECENTRALIZED SUPERVISORY CONTROL OF DISCRETE-EVENT SYSTEMS. *Information Sciences*, 1988, vol. 44, n° 3, p. 199-224. [https://doi.org/10.1016/0020-0255\(88\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0020-0255(88)90002-3). ISSN: 0020-0255
36. MOODY, Jhon; ANTSAKLIS, Panos. SUPERVISORY CONTROL OF DISCRETE EVENT SYSTEMS USING PETRI NETS. *The International Series on Discrete Event Dynamic Systems*, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5711-1>. ISSN: 1388-4328.
37. MOREIRA, Marcos; LESAGE, Jean-Jacquez. ENHANCED DISCRETE EVENT MODEL FOR SYSTEM IDENTIFICATION WITH THE AIM OF FAULT DETECTION. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51, n° 7, p. 160-166. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.295>. ISSN: 2405-8963.
38. MOREIRA, Marcos; LESAGE, Jean-Jacquez. FAULT DIAGNOSIS BASED ON IDENTIFIED DISCRETE-EVENT MODELS. *Control Engineering Practice*, 2019, vol. 91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.07.019>. ISSN: 0967-0661.
39. PAIVA, Pedro; FREITAS, Brian; CAVALHO, Lilian; BASILIO, Joao. 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, vol. 16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacsc.2021.100146>. ISSN: 2468-6018.
40. PRIETO, Josué; RUIZ, Elvia; VÁZQUEZ, Renato; Orozco, Jorge. ACTIVE DIAGNOSIS IN AUTOMATED MANUFACTURING SYSTEMS: AN INTERPRETED PETRI NET-BASED APPROACH. *Pistas Educativas*, 2023, vol. 45, n° 145, p. 7171-733. ISSN: 2448-847X.
41. RAMADGE, Peter; WONHAM, Murray. THE CONTROL OF DISCRETE EVENT SYSTEMS. *The control of discrete event systems*, in *Proceedings of the IEEE*, 1989, vol. 77, n° 1, p. 81-98. DOI: 10.1109/5.21072. ISSN: 0018-9219.
42. RAMÍREZ, Antonio; RUIZ, Elvia; LÓPEZ, Ernesto. ONLINE FAULT DIAGNOSIS OF DISCRETE EVENT SYSTEMS. A PETRI NET-BASED APPROACH. *IEEE transactions on automation science and engineering*, 2007, vol. 4, n° 1, p. 31-39. DOI: 10.1109/TASE.2006.872120. ISSN: 1545-5955.
43. RAMÍREZ, Antonio; RUIZ, Elvia; RIVERA, Israel; LÓPEZ, Ernesto. DIAGNOSABILITY OF DISCRETE EVENT SYSTEMS: A PETRI NET BASED APPROACH. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2004, vol. 1, p. 541-546. DOI: 10.1109/ROBOT.2004.1307205. ISSN: 1050-4729.
44. RAN, Ning; GIUA, Alessandro; SEATZU, Carla. ENFORCEMENT OF DIAGNOSABILITY IN LABELED PETRI NETS VIA OPTIMAL SENSOR SELECTION. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2019, vol. 64, no. 7, pp. 2997-3004. DOI: 10.1109/TAC.2018.2874020. ISSN: 0018-9286.
45. FACTORY IO. REAL GAMES. (2024). Software de Simulación industrial de Siemens. <https://realgames.co>
46. RODRÍGUEZ, Ricardo; MARRONE, Stefano; MARCOS, Ibai; PORZIO Giuseppe. MOSTO: A TOOLKIT TO FACILITATE SECURITY AUDITING OF ICS DEVICES USING MODBUS/TCP. *Computers & Security*, 2023, vol. 132, p. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103373>. ISSN: 0167-4048.

47. RUIZ, Elvia; OROZCO, Jorge; RAMÍREZ, Guillermo. FAULT DETECTION AND ISOLATION SIMULATOR: AN INTERPRETED PETRI NET APPROACH. IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing, 2014, p. 1-6. DOI: 10.1109/ROPEC.2014.7036282
48. SAMPATH, Meera; LAFORTUNE, Sthephane; TENEKETZIS, Demosthenis. ACTIVE DIAGNOSIS OF DISCRETE-EVENT SYSTEMS. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, vol. 43, no. 7, pp. 908-929. DOI: 10.1109/9.701089. ISSN: 0018-9286.
49. SEATZU, Carla. MODELING, ANALYSIS, AND CONTROL OF AUTOMATED MANUFACTURING SYSTEMS USING PETRI NETS. 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2019, p. 27-30. DOI: 10.1109/ETFA.2019.8869012. ISSN: 1946-0759.
50. TIAHJONO, Benny; ESPLUGUES, C., ARES, Enrique; PELAEZ, Gustavo. WHAT DOES INDUSTRY 4.0 MEAN TO SUPPLY CHAIN?. Procedia Manufacturing, enero 2017, vol. 13, n° 13, p. 1175-1182. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.191>. ISSN: 2351-9789.
51. WU, Yingquan; HADJICOSTIS, Christoforos. ALGEBRAIC APPROACHES FOR FAULT IDENTIFICATION IN DISCRETE-EVENT SYSTEMS. IEEE Transactions on Automatic Control, diciembre 2005, vol. 50, n° 12, p. 2048-2055. DOI: 10.1109/TAC.2005.860249. ISSN: 1558-2523.

Capítulo 8. Anexos

8.1 Laboratorio de pruebas

En las instalaciones del Instituto Tecnológico de Aguascalientes se asignó un espacio con computadoras, controladores lógicos programables y el software Factory IO (Real Games, 2024) para validar los resultados obtenidos en este trabajo desde la perspectiva digital, ver Figura 29.

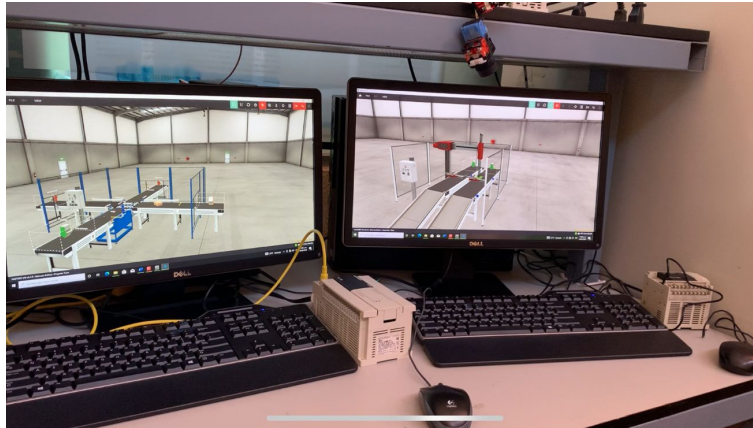


Figura 29 Laboratorio Digital para pruebas.

Se diseñó hardware para el monitoreo a distancia de las entradas de un PLC Mitsubishi de la serie FX con el fin de tener la información de los disparos de forma remota para los diagnosticadores evaluados. La propuesta no invasiva consiste en no hacer recableado de los dispositivos, ya que esta tarea es común en sistemas ya funcionales. La Figura 30 muestra el diseño del sistema embebido previo a su manufactura mientras que la Figura 31 muestra la instalación física en un PLC Mitsubishi. Estos sistemas embebidos fueron de gran utilidad para la validación de algunos esquemas presentados en el estado del arte, tal es el caso de los trabajos de Paiva (Paiva, 2021) y Al- Ajeli (Al-Ajeli, 2021). Así mismo fue un preámbulo para el sistema embebido presentado en este documento, ver Figura 24.

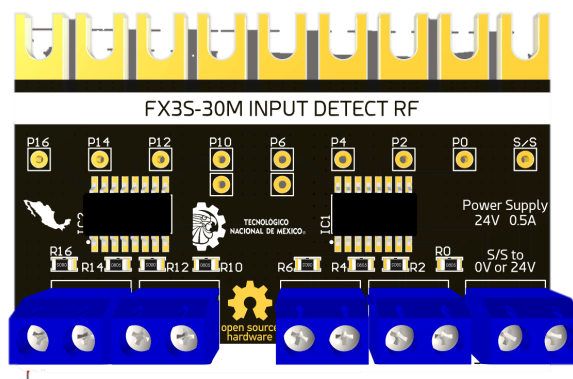


Figura 30 Sistema embebido no invasivo.

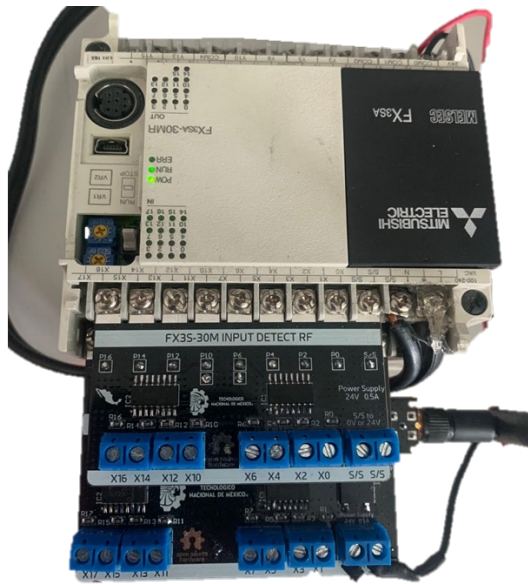


Figura 31 Sistema embebido y PLC Mitsubishi.

8.2 Códigos para pruebas de F-M

8.2.1 Programa de estación de transmisión de datos

La estación de transmisión de datos que pertenece a la parte del monitoreo de forma remota consta de un controlador, y un módulo de radiofrecuencia (NRF24L01). El programa se creó con el entorno de desarrollo del microcontrolador, que necesita librerías para tener conexión con el módulo de radiofrecuencia, mismo que lee la ocurrencia de las entradas del PLC y las envía a la estación inalámbrica de recepción representando 1s y 0s, donde se envía un 1 cuando la entrada se activa y un 0 en caso contrario.

```
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
```

```
const uint64_t my_radio_pipe = 0xE8E8F0F0E1LL;
```

```
RF24 radio(9, 10);
```

```
struct Data_to_be_sent {
    byte ch1;
    byte ch2;
    byte ch3;
    byte ch4;
    byte ch5;
```

```
byte ch6;
byte ch7;
byte ch8;
byte ch9;
byte ch10;
};

Data_to_be_sent sent_data;

void setup()
{
  radio.begin();
  radio.setAutoAck(false);
  radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
  radio.openWritingPipe(my_radio_pipe);

  sent_data.ch1 = 0;
  sent_data.ch2 = 0;
  sent_data.ch3 = 0;
  sent_data.ch4 = 0;
  sent_data.ch5 = 0;
  sent_data.ch6 = 0;
  sent_data.ch7 = 0;
  sent_data.ch8 = 0;
  sent_data.ch9 = 0;
  sent_data.ch10 = 0;

}

void loop()
{

  sent_data.ch1 = digitalRead(19); //lectura del X0
  sent_data.ch2 = digitalRead(1); //lectura del X1
  sent_data.ch3 = digitalRead(18); //lectura del X2
  sent_data.ch4 = digitalRead(0); //lectura del X3
  sent_data.ch5 = digitalRead(17); //lectura del X4
  sent_data.ch6 = digitalRead(2); //lectura del X5
  sent_data.ch7 = digitalRead(16); //lectura del X6
  sent_data.ch8 = digitalRead(3); //lectura del X7
  sent_data.ch9 = digitalRead(15); //lectura del X10
  sent_data.ch10 = digitalRead(4); //lectura del X11

  radio.write(&sent_data, sizeof(Data_to_be_sent));
}
```

8.2.2 *Programa de estación de recepción de datos*

La estación de recepción de datos al igual que la estación de transmisión de datos consta de un controlador, y un módulo de radiofrecuencia (NRF24L01).

```
#include <SPI.h>
#include <nRF24L01.h>
#include <RF24.h>
```

```
const uint64_t pipeIn = 0xE8E8F0F0E1LL;
RF24 radio(9, 10);
```

```
struct Received_data {
    byte ch1;
    byte ch2;
    byte ch3;
    byte ch4;
    byte ch5;
    byte ch6;
    byte ch7;
    byte ch8;
    byte ch9;
    byte ch10;
```

```
};
Received_data received_data;
int ch1_value = 0;
int ch2_value = 0;
int ch3_value = 0;
int ch4_value = 0;
int ch5_value = 0;
int ch6_value = 0;
int ch7_value = 0;
int ch8_value = 0;
int ch9_value = 0;
int ch10_value = 0;
```

```
void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    //We reset the received values
    received_data.ch1 = 0;
    received_data.ch2 = 0;
    received_data.ch3 = 0;
```

```
received_data.ch4 = 0;
received_data.ch5 = 0;
received_data.ch6 = 0;
received_data.ch7 = 0;
received_data.ch8 = 0;
received_data.ch9 = 0;
received_data.ch10 = 0;
```

```
//Once again, begin and radio configuration
radio.begin();
radio.setAutoAck(false);
radio.setDataRate(RF24_250KBPS);
radio.openReadingPipe(1,pipeIn);
```

```
//We start the radio communication
radio.startListening();
```

```
}
```

```
/*****
```

```
unsigned long last_Time = 0;
```

```
//We create the function that will read the data each certain time
```

```
void receive_the_data()
{
  while ( radio.available() ) {
    radio.read(&received_data, sizeof(Received_data));
    last_Time = millis(); //Here we receive the data
  }
}
```

```
void loop()
{
  //Receive the radio data
  receive_the_data();
```

```
ch1_value = received_data.ch1;
ch2_value = received_data.ch2;
ch3_value = received_data.ch3;
ch4_value = received_data.ch4;
ch5_value = received_data.ch5;
ch6_value = received_data.ch6;
ch7_value = received_data.ch7;
ch8_value = received_data.ch8;
```

```
ch9_value = received_data.ch9;  
ch10_value = received_data.ch10;  
Serial.println(received_data.ch1);  
}
```

8.3 Capacitaciones

Se tomaron dos capacitaciones técnicas relacionadas con SAM, la primera fue en el Instituto Tecnológico de Aguascalientes (ITA) en el sistema de manufactura perteneciente al Centro De Innovación Industrial para el Sector Aeroespacial del Bajío, ver Figura 32. La segunda capacitación fue en el Tecnológico de Monterrey Campus Guadalajara en colaboración con el Dr. Carlos Renato Vázquez Topete, coasesor de este trabajo.

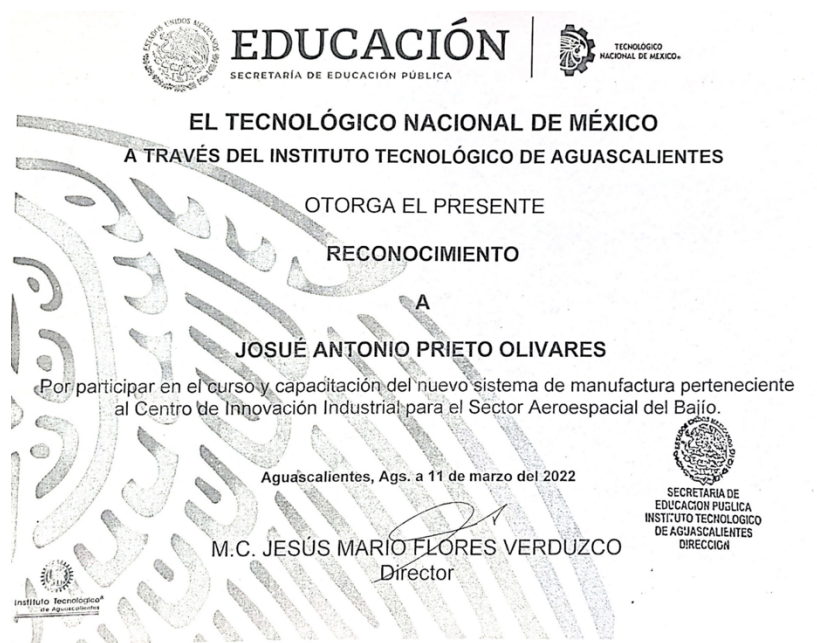


Figura 32 Constancia de participación SAM ITA.

8.4 Publicaciones y trabajos de colaboración

Se apoyó a la alumna de maestría Samantha Acosta Ruiz en las pruebas con el laboratorio digital (Acosta, 2023). La participación que se tuvo fue la adquisición de datos analógicos y digitales de una escena en Factory IO con el fin de diseñar una base de datos para entrenamiento de un algoritmo de inteligencia artificial. Como resultado, participó en la Semana Nacional de Ingeniería Electrónica SENIE 2022 con un artículo indexado en la revista Pistas Digitales, se adjunta la constancia de participación, ver Figura 33, y la portada de la revista, ver Figura 34. La contribución incluyó también el diseño de escenarios virtuales que simulan procesos industriales, permitiendo generar datos de entrenamiento confiables y reproducibles. Asimismo, se brindó orientación en la validación de las variables recopiladas y en la integración de la base de datos con las herramientas de aprendizaje automático. Esta colaboración promovió el desarrollo de competencias en sistemas ciberfísicos y en la

aplicación de modelos inteligentes a procesos automatizados, alineándose con los objetivos de formación avanzada del programa de posgrado.



Figura 33 Constancia de participación SENIE 2022.

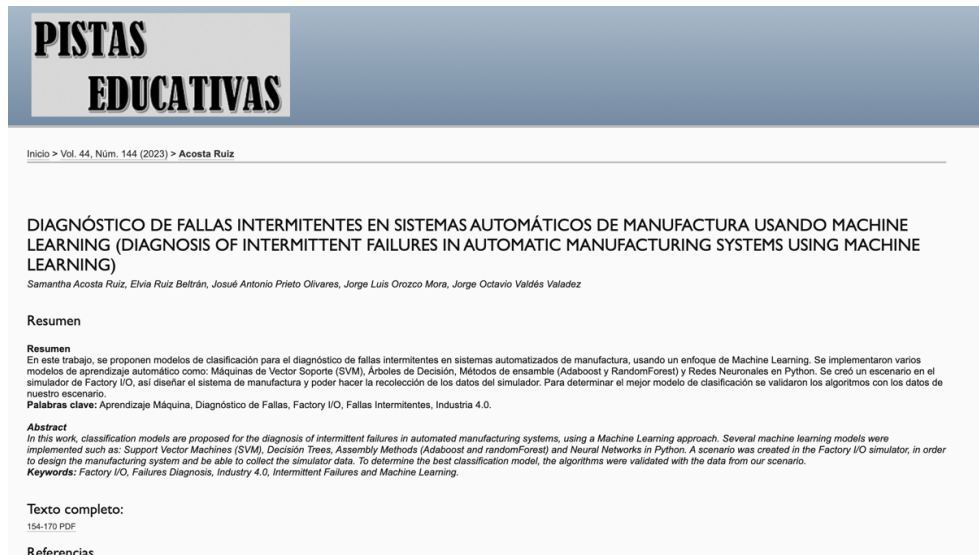


Figura 34 Portada de revista Pistad Educativas SENIE 2022.

Se realizó una ponencia de los avances del trabajo en el Congreso Internacional, la investigación en el posgrado que organiza la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA), el tema presentado fue el diagnóstico activo en celdas de manufactura. En la Figura 35 se muestra la constancia de participación.



Figura 35 Constancia de ponencia UAA.

Se participó como primer autor en el evento SENIE 2023 con los primeros resultados referentes al trabajo “Diagnóstico activo en sistemas automatizados de manufactura: enfoque basado en redes de Petri interpretadas” (Prieto, 2023). En este artículo se reportaron resultados referentes al algoritmo de búsqueda de restricción que impone la propiedad de la diagnosticabilidad, cabe destacar que, para esta etapa, aun no se encontraba un algoritmo que identificara dicha restricción. se adjunta la constancia de participación (ver Figura 36) y la portada de la revista Pistas Educativas donde fue publicado el trabajo antes mencionado, ver Figura 37



Figura 36 Constancia de participación SENIE 2023.

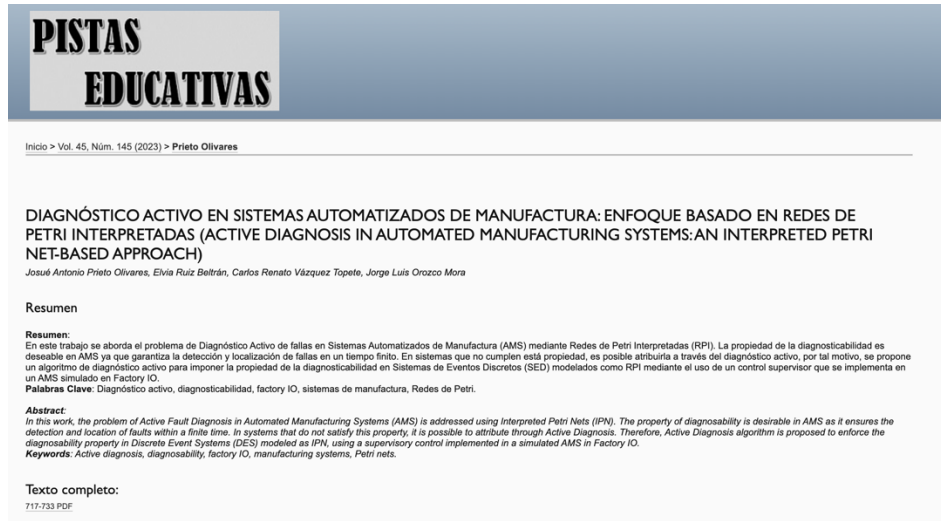


Figura 37 Portada de revista SENIE 2023.

Se impartió una conferencia con el tema “Diagnóstico de faltas en Sistemas de Manufactura Flexible” en el *Colloquium on Discrete Event And Hybrid Systems* organizado por el Cinvestav y el Tecnológico de Monterrey. En este congreso se abordó el tema de diagnóstico de faltas en sistemas de manufactura especialmente aquellos esquemas de diagnóstico que son de aplicación para un contexto real, resaltando el método de Basile (Basile, 2022) y Paiva (Paiva, 2021), ver Figura 38.



Figura 38 Constancia de participación coloquio.

En enero de 2025 se recibió respuesta por parte de la revista DYNA que el artículo que dio como resultado este trabajo ha sido aceptado. La revista DYNA es una revista científica sobre

ingeniería multidisciplinar, incluida en *Science Citation Index* y con Factor de impacto en JCR (Journal Citation Report) Q3. La revista DYNA está indexada y el estatus del artículo esta aceptado y sólo está en espera del editor para su publicación. Actualmente, ya se cuenta con un número DOI: <https://doi.org/10.52152/D11367>. En la Figura 39 se muestra el correo de aceptación del artículo titulado “*ACTIVE FAULT DIAGNOSIS IN AUTOMATED MANUFACTURING SYSTEMS: MODELED USING INTERPRETED PETRI NET*”.

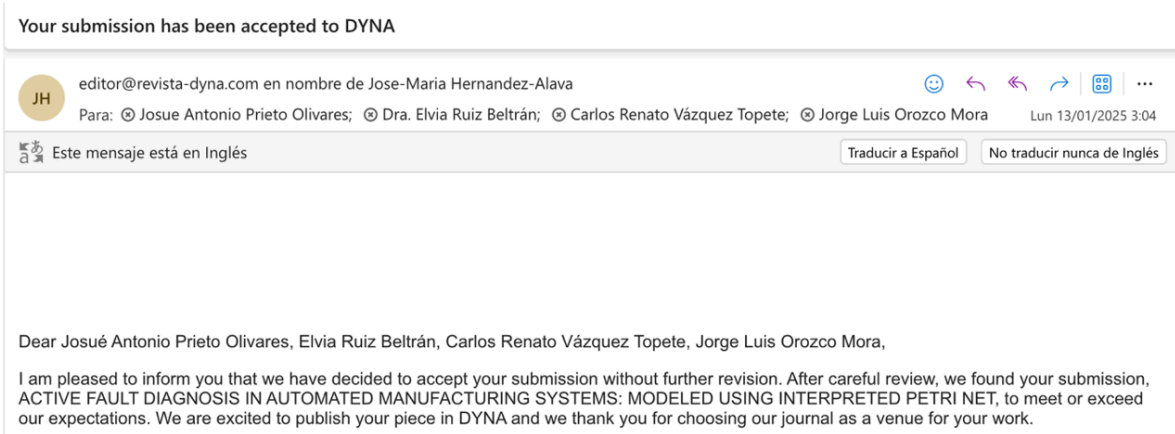


Figura 39 Correo de aceptación revista DYNA.