



POSGRADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN ÓPTICA A.C.

MONITOREO DE DESEMPEÑO Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS

PARA SISTEMAS CIBERFÍSICOS MEDIANTE REDES

COMPLEJAS Y AUTÓMATAS HÍBRIDOS

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTOR EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN
MECATRÓNICA Y DISEÑO MECÁNICO

PRESENTA:

M.C.I. Alejandro Velázquez Jiménez

DIRECTOR: Dr. Fernando Martell Chávez

AGUASCALIENTES, AGS.
MARZO 05, 2025





**POSGRADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA.
DOCTORADO.**

Aguascalientes, Ags., a 10 de enero de 2025

Referencia: Liberación de tesis por parte del Comité Tutorial

Dr. David Monzón Hernández

Coordinador de Posgrado – Sede CIO

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno **Alejandro Velázquez Jiménez**, una vez leída y revisada la Tesis titulada “**Monitoreo de Desempeño y Diagnóstico de Fallas para Sistemas Ciberfísicos mediante Redes Complejas y Autómatas Híbridos**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Doctor en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de Mecatrónica y Diseño Mecánico durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 10 días del mes de enero del año 2025.

Dr. Fernando Martell Chávez

Director de tesis

Dra. Irma Yolanda Sánchez Chávez

Asesora, integrante del Comité

Tutorial

Dr. Carlos Alberto Paredes Orta

Asesor, integrante del Comité

Tutorial



POSGRADO INTERINSTITUCIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA.

Autorización de Tesis por Jurado de examen

Aguascalientes, Ags., a 7 de febrero de 2025

Referencia: Liberación de tesis por parte del Jurado del Examen de Grado

Dr. David Monzón Hernández

Coordinador de Posgrado – Sede CIO

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno **Alejandro Velázquez Jiménez**, una vez leída y revisada su Tesis titulada “**Monitoreo de Desempeño y Diagnóstico de Fallas para Sistemas Ciberfísicos mediante Redes Complejas y Autómatas Híbridos**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de Doctor en Ciencia y Tecnología en la opción terminal de Mecatrónica y Diseño Mecánico durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmamos la presente a los 7 días del mes de febrero del año 2025.

Dr. Luis Manuel Valentín Coronado
Presidente

Dr. Juan Manuel López Téllez
Secretario

Dra. Elvia Ruiz Beltrán
Vocal

Dr. José Eder Guzmán Mendoza
Vocal

Dr. Fernando Martell Chávez
Vocal

Resumen

Los sistemas ciberfísicos (Cyber-Physical Systems CPS) termino acoplado a la industria 4.0, integran técnicas, métodos y tecnologías para el monitoreo y control de sistemas físicos comunicados con sistemas digitales. En aplicaciones de sistemas de manufactura a nivel industrial, los CPS proveen y realizan funciones que permitan lograr una mayor eficiencia. Las empresas productivas tienen la necesidad de desarrollar sistemas con un mayor grado de automatización e implementación de soluciones tecnológicas que les permitan mejorar su competitividad, los CPS les pueden ayudar para lograr este objetivo. En el presente trabajo se presenta un esquema para el diseño e implementación de sistemas ciberfísicos industriales, a nivel de control supervisor que incorpora funciones avanzadas de automatización como un monitoreo ampliado, optimización del control y autodiagnóstico del sistema. Se presentan dos casos de estudio, en el primer caso de estudio se diagnostican fallas múltiples concurrentes en un sistema CPS de almacén industrial combinando redes complejas y automatas híbridos. El segundo caso de estudio se propone un esquema de sistema ciberfísico en el que el sistema digital evalúa el tiempo de ciclo de un proceso de producción de rines. Las pruebas funcionales y los resultados obtenidos validan la aplicabilidad de los esquemas propuestos en el CPS implementado. Estos enfoques que consideran funciones avanzadas de automatización pueden incorporarse a diversos sistemas industriales de manufactura.

Palabras clave: Sistemas ciberfísicos; diagnóstico de fallas; sistemas dinámicos híbridos; redes complejas; autómatas de estados finitos; Indicador clave de rendimiento.

Abstract

Cyber-Physical Systems (CPS) are linked to Industry 4.0, integrating techniques, methods and technologies for the monitoring and control of physical systems communicated with digital systems. In industrial-level manufacturing system applications, CPS provide and perform functions that enable greater efficiency. Productive companies have the need to develop systems with a greater degree of automation and implementation of technological solutions that allow them to improve their competitiveness, and CPS can help them to achieve this goal. This paper presents a scheme for the design and implementation of industrial cyber-physical systems at the supervisory control level that incorporates advanced automation functions such as extended monitoring, control optimization and system self-diagnosis. Two case studies are presented. In the first case study multiple concurrent failures are diagnosed in a CPS system of industrial warehouse combining complex networks and hybrid automata. The second case study proposes a cyber-physical system structure in which the digital system evaluates the cycle time of a wheel production process. The functional tests and the results obtained validate the applicability of the schemes proposed in the implemented CPS. These approaches for consider advanced automation functions can be incorporated into various industrial manufacturing systems.

Keywords: cyber-physical systems; fault diagnosis; hybrid dynamical systems; complex networks; finite state automata; key performance indicator.

A mi padre y abuelo Q.E.P.D quienes fueron ejemplo de superación, perseverancia y gran inteligencia. A mi madre y abuelita que siempre me han apoyado y alentado a seguir adelante tomando decisiones de crecimiento. A todos los que hicieron posible este trabajo.

Agradecimientos

Al Dr. Fernando Martell Chávez y al comite de evaluacion Dra. Irma Yolanda Sánchez y Dr. Carlos Alberto Paredes Orta por su apoyo y el acompañamiento a lo largo de mi desarrollo académico, así mismo por aceptar dirigir y asesorar este modesto trabajo, por su orientación, paciencia y sus comentarios y revisiones como director y comité de evaluacion de tesis.

A los diferentes profesores que me impartieron clase y en especial al M.C. Juan Margarito Sarabia Torres, Dr. Isaías Moreno Cruz por su paciencia, apoyo y orientación en la implemntación y programación del presente proyecto.

Al Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. Aguascalientes por brindarme los medios para llevar a cabo mis estudios de doctorado.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo y las facilidades prestadas para la obtención de la beca económica con CVU Nro. 843477 para realizar mis estudios de doctorado.

A mis compañeros de maestría y doctorado por las incontables experiencias además de que aprendí lo que es trabajo en equipo.

Índice general

Lista de figuras	vi
Lista de tablas	ix
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Diagnóstico de fallas	1
1.1.2. Análisis de desempeño	2
1.2. Definición del problema	3
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. Hipótesis	5
2. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Sistemas Ciberfísicos	6
2.1.1. Arquitectura 5C	7
2.2. Autómatas Finitos	9
2.2.1. Características de los autómatas	9
2.2.2. Definición de autómata finito	10
2.3. Sistemas de Primer Orden	13
2.3.1. Filtrado y atenuación de señales	15
2.4. Sistemas de Dinámicas Híbridas	16
2.4.1. Autómata híbrido	16

ÍNDICE GENERAL

2.5. Teoría de Grafos	18
2.5.1. Redes complejas	19
2.5.2. Redes bipartitas	20
2.5.3. Matriz de adyacencia	21
2.6. Análisis del Estado del Arte	22
2.6.1. Diagnóstico de fallas	22
2.6.2. Análisis de desempeño	23
3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS	26
3.1. Introducción	26
3.2. Sistema de Contro del Almacén	27
3.2.1. Modelo del controlador virtual del almacén	28
3.3. Esquema propuesto de Sistema Ciberfísico	28
3.4. Implementación del Sistema Ciberfísico	35
3.5. Red Compleja de Almacén Automático	36
3.5.1. Construcción de matriz de adyacencia	37
3.6. Modelos de Datos y Ecuaciones	38
3.6.1. Modelo de datos digital	38
3.6.2. Modelo de datos analógico	39
3.7. Funcionamiento del Sistema	40
3.7.1. Funcionalidad del sistema físico	40
3.7.2. Funcionalidad del sistema virtual.	41
3.8. Evaluación y Diagnóstico de Fallas	43
3.9. Resultados y Discusión	44
4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO	49
4.1. Introducción	49
4.2. Esquema de CPS para Diagnóstico de Desempeño	49
4.3. Modelado y Control de Sistema de Manufactura de Rines con Máquina de Estados Finitos	50
4.3.1. Estación de procesamiento	52
4.3.2. Modelado de estacion de procesamiento con maquinas de estados finitos	54
4.3.3. Estación de clasificación	57

ÍNDICE GENERAL

4.3.4.	Modelado de estación de clasificación con máquinas de estados finitos	59
4.3.5.	Robot cartesiano	62
4.3.6.	Modelado de robot cartesiano con máquina de estados finitos	64
4.3.7.	Estación de almacenamiento	67
4.3.8.	Modelado de almacén con máquina de estados finitos . . .	71
4.4.	Modelación y computo del Desempeño	74
4.4.1.	Red compleja y desempeño total del proceso	75
4.4.2.	Análisis de pesos de red compleja	75
4.5.	Resultados del Monitoreo de Desempeño	77
4.5.1.	Discusión de resultados	78
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	80
5.1.	Conclusiones	80
5.1.1.	Diagnóstico de fallas	80
5.1.2.	Análisis de desempeño	81
5.1.3.	Conclusiones generales	81
5.2.	Recomendaciones y trabajo futuro	82
	Bibliografía	83
A.		89
A.1.	Matriz de Adyacencia	89
B.		90
B.1.	Implementación de algoritmo de diagnóstico de fallas de entradas y salidas digitales	90
B.2.	Implementación de algoritmo de diagnóstico de fallas de entradas y salidas analógicas	90

Lista de figuras

2.1. Arquitectura 5C	8
2.2. Bloque de funcionamiento de autómata finito	9
2.3. A) Representación de estado, B) Estado de inicio, C) Estado final.	11
2.4. Representación gráfica de autómata finito	12
2.5. Respuesta Dinamica de Sistema de primer orden [Figura tomada de (53)]	15
2.6. Ejemplo de autómata híbrido.	18
2.7. A) Los puentes de Königsberg. B)Asignación de nombre a las 4 áreas de tierra C)Red compleja obtenido de los puentes.	19
2.8. A) Red no dirigida. B) Red dirigida	20
2.9. Ejemplo Red bipartita.	21
2.10. Ejemplo de matriz de adyacencia A) Red no dirigida B) Red dirigida.	22
3.1. A) Sensores y actuadores en banda transportadora de descarga, B) Sensores y actuadores en banda transportadora de carga, C) Sensores y actuadores en base de elevador.	28
3.2. Esquema propuesto del sistema ciberfísico.	29
3.3. Autómata híbrido físico.	33
3.4. Autómata híbrido virtual.	34
3.5. Implementacion de sistema ciberfísico de almacén.	35
3.6. Red compleja del sistema físico.	36
3.7. Matriz de adyacencia.	38
3.8. Representación en bloques de ejecución del sistema.	40
3.9. Desarrollo del sistema ciberfísico.	46

LISTA DE FIGURAS

3.10. Diagnóstico de fallas.	46
3.11. Localización de fallas.	47
4.1. Sistema ciberfísico propuesto	50
4.2. A) Estacion de procesamiento, B) Estacion de clasificación, C) Robot cartesiano, D) Estacion de almacenamiento. Figura original (26)	51
4.3. Estacion de Procesamiento	52
4.4. Mesa de suministro	53
4.5. Bandas Transportadoras	53
4.6. Maquina herramienta	54
4.7. Mesa giratoria	54
4.8. Distribución de sensores y actuadores de estación de procesamiento	55
4.9. Estación de procesamiento FSM.	55
4.10. Estación de clasificación	57
4.11. Almacén y distribución de rines	58
4.12. Banda transportadora	58
4.13. Sistema de descarga	59
4.14. Mesas de descarga	59
4.15. Distribucion de sensores y actuadores de estación de clasificación .	60
4.16. Estación de clasificación FSM.	60
4.17. Robot cartesiano	62
4.18. Distribución de sensores de posición	63
4.19. Movimiento del robot en el eje Z	63
4.20. Distribución de sensores y actuadores de robot cartesiano	65
4.21. Robot cartesiano FSM	66
4.22. Estacion de Almacenamiento	67
4.23. Estaciones de carga y descarga	68
4.24. Movimiento desplazamiento horizontal	68
4.25. Movimiento desplazamiento vertical	69
4.26. Sensores mecánicos en plataforma	70
4.27. Sensores de movimiento vertical y horizontal.	71
4.28. Distribución de sensores en el almacén.	72

LISTA DE FIGURAS

4.29. Estación de almacenamiento FSM	73
4.30. Operación de un sistema industrial	74
4.31. Red compleja del proceso de manufactura.	76
4.32. A) Desempeño de estación de procesamiento, B) Desempeño de estacion de clasificacion, C) Registro de desempeño de estación de procesamiento, D) Registro de desempeño de estación de clasificación	78
4.33. A) Desempeño robot cartesiano, B) Desempeño almacén, C) Re- gistro de desempeño robot cartesiano, D) Registro de desempeño de almacén	79
4.34. Análisis de desempeño total del proceso	79
A.1. Matriz de adyacencia completa del sistema.	89
B.1. Funcionamiento algoritmo de entradas y salidas digitales.	91
B.2. Funcionamiento algoritmo de entradas y salidas análogicas.	91

Lista de tablas

2.1. Representación de autómata en tabla	12
3.1. Activación de estados y salidas.	29
3.2. Denominación de entradas y salidas	37
3.3. Resultados obtenidos de diagnóstico de fallas	48
4.1. Estados y transiciones de la estación de procesamiento.	56
4.2. Estados y transiciones de la estación de clasificación FSM.	61
4.3. Estados y transiciones de robot cartesiano FSM.	66
4.4. Estados y transiciones de la estación de almacenamiento FSM.	73
4.5. Matriz de adyacencia de subprocesos	76
4.6. Matriz de adyacencia de proceso total	76

1

Introducción

1.1. Antecedentes

1.1.1. Diagnóstico de fallas

El avance tecnológico de la industria ha provocado aumentos de la productividad con menos recursos humanos, como se ha observado en las últimas 3 revoluciones industriales. La Industria 4.0, el desarrollo industrial actual, se basa en la tecnología digital de la tercera revolución, pero avanza con la interconectividad del Internet de las cosas (IoT), los sistemas a tiempo real, la digitalización y la integración de sistemas ciberfísicos. Debido al aumento de la complejidad y el tamaño de los sistemas industriales, sus fallas repentinas causan importantes pérdidas económicas y humanas, lo que requiere el desarrollo e implementación de sistemas avanzados de detección y localización de fallas.

Debido a la cantidad de variables y complejidad en la dinámica de los sistemas industriales se han propuesto diversas metodologías para llevar a cabo la detección y localización de fallas, donde los sistemas han sido considerados como una entidad compleja (formalismo de la ciencia de las redes), como ejemplos de este tipo de sistemas se tienen: sistemas biológicos (el cerebro humano, la naturaleza), de información (redes físicas, redes sociales, etc) y de tecnología (infraestructuras como suministro de agua, transporte, estaciones de combustible, energía), entre otros (3). El análisis de fallas en este tipo de sistemas se ha abordado a través del estudio de la estructura y la dinámica de la red. En (38), el diagnóstico de fallas

1. INTRODUCCIÓN

en aristas sobre redes homogéneas de subsistemas LTI (linear time-invariant), se basa en el monitoreo y detección de cambios abruptos en la derivada de i -ésimo orden de la variable de estado del nodo de observación (usando señales de las derivadas de los sensores y actuadores). Así mismo, en (47), se plantea un modelo de propagación de fallas en cascada, en redes acopladas por una relación interdependiente de múltiple soporte-dependencia, el cual describe de una manera más fiel, la forma en que coexisten la estructura y la dinámica en los sistemas reales. En este sentido, (40; 41) presentan un estudio que evidencia el grado de tolerancia a una falla aleatoria y la extrema vulnerabilidad a una falla inducida que exhiben los sistemas de manufactura, a partir del análisis de la estructura de interrelación del modelo de Red Compleja (RC). De esto se concluye, que estudiar la forma en que coexiste e interactúa la estructura con la dinámica del modelo de RC de sistemas de tecnología ha de permitir comprender los fenómenos de propagación y vulnerabilidad a fallas que presentan los sistemas. Así mismo, nuevos esquemas de detección pueden ser propuestos, dada la existencia de más información para estructurar las formas de falla. Otro trabajo relacionado se propone en (54) donde se realiza el diagnóstico y localización de fallas en un motor de combustión interna usando redes complejas: conociendo la estructura de la red obtenida del motor se colocan observadores y se grafican obteniendo el comportamiento normal del motor, por lo que si ocurre una diferencia entre las señales observadas se evalúa el sistema mediante las señales observadas y se diagnostica una falla específica en el motor. Un problema existente en estos sistemas es que, debido a su complejidad en la ocurrencia de fallas, su diagnóstico y localización son muy complejos, lo que motiva este trabajo de investigación.

1.1.2. Análisis de desempeño

La Industria 4.0 ha permitido un importante desarrollo de tecnologías digitales de alta precisión para el modelado y simulación de sistemas físicos. En la última década, la información relacionada con esta tendencia ha ido aumentando tanto en calidad como en cantidad, lo que permite a los fabricantes de todo el mundo trabajar con productos virtuales y máquinas virtuales (13). Esta tendencia impacta en la industria de tal manera que los procesos se pueden llevar a

1. INTRODUCCIÓN

cabo con mayor eficiencia y calidad y menores tiempos y costos (18). Un ejemplo de este tipo de tecnología es el gemelo digital ó la versión virtual de un sistema físico o máquina (37). El gemelo digital puede representar una fábrica completa o solo una parte de ella. Esencialmente, el gemelo digital es un equivalente virtual dinámico de un sistema físico, es decir, una réplica de alta precisión de un sistema real. Para (18) y (37), el gemelo digital se considera una herramienta de monitorización evolucionada, porque ayuda a ejecutar simulaciones basadas en datos reales de los procesos, proporcionando capacidades avanzadas para prevenir fallos, e incluso para optimizar su funcionamiento.

Un aspecto relevante del gemelo digital es la interconexión con su contraparte física para la transferencia de información que permite al usuario interactuar en tiempo real con los sistemas, dando la ventaja de observar, monitorear y ajustar el desempeño de ambos sistemas (28). Las actuales tecnologías y técnicas de automatización pueden emplearse para la implementación de CPS y gemelos digitales. Los controladores lógicos programables (PLC) o los controladores programables (PC) son componentes esenciales de la automatización industrial; constituyen una plataforma versátil no sólo para la automatización general, sino también para el soporte de sistemas ciberfísicos durante el ciclo de vida del producto y la adaptación a nuevos productos (17). Los métodos de máquinas de estados finitos son relevantes para el control secuencial y el control híbrido de procesos por lotes, ya que el control continuo de ciertas variables de proceso con técnicas especializadas se puede asignar a uno o más estados dentro de una secuencia desde la entrada de materiales hasta la descarga del producto (11).

Uno de los posibles enfoques de la investigación en ingeniería consiste en explorar la combinación de herramientas matemáticas y computacionales, en este trabajo se busca combinar la teoría de redes complejas con la de autómatas híbridos para su posible aplicación en la implementación de sistemas ciberfísicos.

1.2. Definición del problema

En la denominada 3ra. revolución industrial se postuló el uso de una pirámide de automatización, la cual a niveles inferiores se usa comúnmente un controlador lógico programable (PLC), con el fin de tener una referencia estándar de

1. INTRODUCCIÓN

la estructura con la que sistemas automatizados podían ser implementados. La implementación de un controlador industrial tuvo dos objetivos: el primero fue reducir el tamaño de los tableros de control industriales y el segundo es la posibilidad de implementar un sistema de control óptimo reconfigurable, haciendo los sistemas más eficientes que los sistemas cableados. Los sistemas industriales han evolucionado; se puede observar en la denominada 4ta. revolución industrial, donde se sigue utilizando el PLC como herramienta de control industrial. Dichos sistemas se han vuelto más complejos y que pueden presentar fallas, paros y mantenimientos (correctivos o preventivos) fuera de tiempo, situaciones que provocan una disminución de la producción esperada ocasionando pérdidas económicas. Por esto surge la necesidad de diseñar e implementar esquemas de simulación en tiempo real coordinados con los sistemas físicos que resuelvan dos funciones relevantes de los sistemas ciberfísicos: 1) el diagnóstico y localización de fallas y 2) La estimación y evaluación del desempeño del sistema en tiempo real. Estas funciones son esenciales para mejorar el desempeño del sistema de manufactura.

1.3. Justificación

En el presente trabajo se modela un sistema ciberfísico de un proceso de producción de rines mediante la teoría de redes complejas y autómatas híbridos con el fin de detectar fallas múltiples y evaluar el desempeño de un sistema de producción.

La teoría de redes complejas tiene diferentes enfoques de aplicación como es el caso de diagnóstico de fallas como se observa en (9) y por otro lado el uso de autómatas finitos es una metodología de la 3er revolución industrial que se utiliza en la Industria 4.0 como se observa en (7)

El análisis de la red compleja permitiría estimar y evaluar el desempeño de cada una de las estaciones del proceso, y valorar como afecta una falla, paro o mantenimiento correctivo el desempeño de la línea de producción. La teoría de sistemas híbridos permitiría implementar el sistema de control del gemelo digital y que este se ejecute en paralelo con el control del sistema real, de esta manera se podrán implementar las funciones de diagnóstico y localización de fallas, así como

1. INTRODUCCIÓN

el cálculo del desempeño de las estaciones de trabajo para identificar aquellas estaciones en la cuales se haya degradado el desempeño.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema de monitoreo y control supervisor basado en autómatas híbridos y análisis en tiempo real con la teoría de redes complejas para el diagnóstico de fallas y evaluación del desempeño de sistemas ciberfísicos industriales.

1.4.2. Objetivos específicos

Objetivo 1. Diseñar esquema de monitoreo y control para evaluación de desempeño de un sistema ciberfísico.

Objetivo 2. Modelar un sistema de manufactura en base a la teoría de grafos que considere las estaciones como nodos y su dinámica basada en el producto entregado y el tiempo de ciclo de una línea de fabricación de rines.

Objetivo 3. Analizar la estructura y dinámica de la red compleja del sistema e identificar tipos de redes y herramientas útiles para el análisis en tiempo real.

Objetivo 4. Proponer y desarrollar técnicas para diagnosticar fallas y evaluar el desempeño de sistemas ciberfísicos industriales.

Objetivo 5. Implementar un sistema que permita diagnosticar fallas además de estimar y evaluar el desempeño del proceso.

1.5. Hipótesis

Un sistema ciberfísico de producción puede ser modelado y analizado con las teorías de redes complejas y sistemas híbridos, para detectar y localizar en tiempo real las fallas concurrentes del sistema, y para medir el desempeño de las diferentes estaciones que conforman el proceso de manufactura.

2

MARCO TEÓRICO

2.1. Sistemas Ciberfísicos

Un sistema ciberfísico (CPS) se refiere a un sistema con capacidades computacionales y físicas combinadas, ya que interactúa con los usuarios a través de nuevas modalidades. La capacidad de comunicarse y expandir las operaciones del mundo físico a través de la tecnología informática, la interacción y el control son aspectos de gran importancia en el desarrollo tecnológico. Los coches autónomos, los vehículos híbridos o totalmente eléctricos, el diseño y desarrollo de aeronaves y los sistemas de fabricación controlados a distancia representan retos y oportunidades de investigación.

En el área de control, se ha avanzado en la implementación de métodos y herramientas de ingeniería, como el control lineal, el control discreto, la optimización, la predicción, el filtrado, el dominio del tiempo y la frecuencia, y el análisis del espacio de estados.

En el ámbito de los sistemas informáticos, se ha avanzado en la seguridad de la información y la detección de fallos en los sistemas, la innovación en fiabilidad, el software integrado y las nuevas arquitecturas, los procedimientos de visualización y las técnicas de simulación en tiempo real, basadas en modelos y nuevos lenguajes de simulación.

El desarrollo de sistemas ciberfísicos tiene como objetivo integrar el comportamiento de un sistema físico en las áreas de computación e ingeniería (mecatrónica,

2. MARCO TEÓRICO

software, interacción humana, inteligencia artificial, así como ciencias químicas y de materiales y otras disciplinas de ingeniería) para desarrollar sistemas CPS (35).

2.1.1. Arquitectura 5C

En la arquitectura 5C (22), que se muestra en la Fig. 2.1, se observa una base de diseño para construir un CPS que se puede implementar para procesos industriales y conlleva 5 aspectos que se mencionan a continuación.

- **Conexión inteligente:** El paso inicial para crear una aplicación de sistema ciberfísico es obtener datos precisos y confiables de las máquinas y sus componentes. Los datos pueden ser capturados directamente por sensores o adquiridos desde controladores o sistemas de fabricación de la empresa. En este nivel, se deben considerar dos factores clave. En primer lugar, teniendo en cuenta los diferentes tipos de datos, es necesario un enfoque fluido e inalámbrico para gestionar el proceso de adquisición de datos y transferirlos al servidor central, junto con protocolos específicos. En segundo lugar, la elección de los sensores correctos (tipo y especificación) es el segundo factor crucial para el primer nivel.
- **Conversión:** Conversión de datos a información de los datos se deben derivar conocimientos significativos. En la actualidad, existen múltiples herramientas y métodos para convertir datos en información. Se han utilizado varios aspectos para crear algoritmos para pronósticos y aplicaciones de gestión de la salud. El segundo nivel de la arquitectura CPS introduce la autoconciencia de las máquinas mediante el cálculo del valor de salud, la vida útil restante estimada, etc.
- **Cyber o Digital:** En esta arquitectura, el nivel cibernético sirve como un centro de información central. Los datos se transmiten desde cada dispositivo conectado para crear la red de máquinas. Con una gran cantidad de información recopilada, se deben emplear análisis específicos para extraer más detalles que ofrezcan una mejor comprensión del estado de cada máquina dentro de la flota. Estos análisis dotan a las máquinas de la capacidad de autocomparación, lo que permite comparar y evaluar el rendimiento de una

2. MARCO TEÓRICO

máquina individual junto con la flota. Por el contrario, se pueden evaluar los paralelismos entre el rendimiento de la máquina y los activos pasados (datos históricos) para pronosticar las acciones futuras de la maquinaria.

- **Cognición:** La aplicación de CPS en este nivel produce una comprensión profunda del sistema monitoreado. Presentar de manera eficaz el conocimiento adquirido a los usuarios expertos ayuda a tomar las decisiones correctas. Para este nivel, los gráficos de información precisos son esenciales para comunicar completamente el conocimiento adquirido a los usuarios.
- **Configuración:** El nivel de configuración representa la retroalimentación del ciberespacio al espacio físico y funciona como control de supervisión para permitir que las máquinas se autoconfiguren y se autoadapten. Esta etapa funciona como un sistema de control de resiliencia (SCR) para implementar las medidas correctivas y preventivas que se han determinado a nivel cognitivo, sobre el sistema monitoreado, particularmente en este proyecto del Indicador de Desempeño de Tiempo (TPI) de la secuencia automatizada.

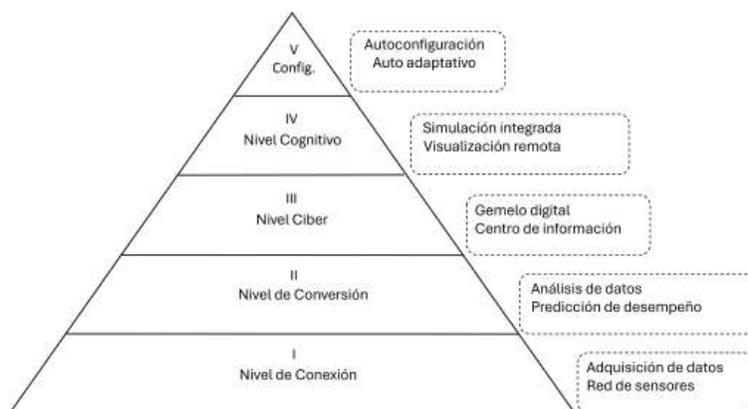


Figura 2.1: Arquitectura 5C

Según la arquitectura 5C una de las funciones avanzadas de los CPS es la de autodiagnóstico, en el caso de los sistemas de producción se utilizan diversos indicadores de desempeños como TPI o KPI para evaluar el desempeño de maquina individuales o líneas completas de manufactura. El TPI se calcula para supervisar el rendimiento de una máquina o proceso. Este TPI más adelante puede

2. MARCO TEÓRICO

ser parte de un KPI (Key performance Indicator) específico de todo el proceso (59). Mientras tanto, la arquitectura 5C muestra, a través de un flujo de trabajo secuencial, cómo construir un CPS desde la adquisición inicial de datos hasta el análisis y la creación de valor final. La respuesta dinámica deseada en las variables de proceso simuladas en los gemelos digitales debe ser sobre-amortiguadas, es decir, de bajo orden y sin sobretiro. La respuesta dinámica de los actuadores y procesos simulados debe ser considerada como una respuesta deseada (modelo de referencia) de los actuadores y procesos físicos.

2.2. Autómatas Finitos

Las Máquinas de Estados Finitos, Autómatas de Estados Finitos o simplemente Autómatas Finitos (AF) son modelos computacionales útiles para la automatización de procesos. Un autómata finito (FA) proporciona el modelo más simple de un dispositivo informático. Se llama finito porque tiene un número finito de estados. El estado del sistema memoriza la información relativa a la entrada anterior. Es necesario determinar el comportamiento futuro del sistema. Un autómata es un sistema donde los materiales, la energía o la información se transforman y transmiten para realizar alguna operación sin la participación directa de un humano. Cualquier máquina automatizada puede ser puesta como ejemplo de autómata. Un modelo de autómatas finitos se da en la Fig. 2.2

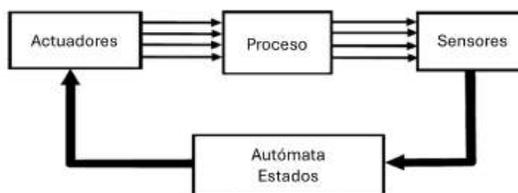


Figura 2.2: Bloque de funcionamiento de autómata finito

2.2.1. Características de los autómatas

- **Entrada:** La entrada se toma en cada pulso de reloj. Para cada instancia de tiempo $t_1, t_2, t_3 \dots t_m$, las entradas se toman como $I_1, I_2, I_3 \dots I_n$. Como

2. MARCO TEÓRICO

hay un número de líneas de entrada, se tomará un número n de entradas en cada instancia de tiempo. La entrada para cada línea de entrada es finita y se toma de un conjunto llamado conjunto finito de alfabetos de entrada Σ .

- **Salida:** La salida se genera en cada pulso de reloj. Para cada instancia de tiempo $t_1, t_2, t_3 \dots t_m$, las salidas se generan como $O_1, O_2, O_3 \dots O_m$. La salida generada a partir de cada línea de salida es finita y pertenece a un conjunto llamado conjunto alfabético de salida.
- **Estado:** En cualquier instancia discreta de tiempo, el autómata puede estar en uno de los estados $q_1, q_2, q_3 \dots q_n$. El estado pertenece a un conjunto llamado 'Estado' Q .
- **Transición de estado:** En cualquier momento dado, el autómata debe estar en uno de los estados que pertenecen al conjunto Q . Al obtener una entrada en un pulso de reloj, el autómata debe residir en un estado. El estado en el que reside el autómata al obtener esa entrada en particular está determinado por la transición de estado. La transición de estado es una función del estado presente y la entrada presente, que produce el siguiente estado. La función se representa como δ .
- **Relación de salida:** De forma similar a la transición de estado para estado, hay una relación para la salida. La salida depende del estado actual y de la entrada presente o del estado actual sólo en función del tipo de máquina.

2.2.2. Definición de autómata finito

Los autómatas finitos FA son los formatos de máquina de expresión regular, que es el formato de lenguaje de la gramática de tipo 3. Las gramáticas de tipo 3 son de la forma $\alpha \rightarrow c$, donde $\alpha \in N$. Sólo tienen un no terminal α en el lado izquierdo de la producción, el lado derecho de la producción debe contener una cadena formada de símbolos terminales y no terminales teniendo como máximo un no terminal que debe estar al extremo derecho de la cadena. Opcionalmente se puede invertir la definición diciendo que se debe contener un no terminal al extremo izquierdo de cada producción, esta variación en la definición invierte el

2. MARCO TEÓRICO

lenguaje generado por la gramática. A las gramáticas que tiene el no terminal en el extremo derecho de la producción se les llama lineales por la derecha, las que lo tienen en el extremo izquierdo se les llama lineales por la izquierda (20). El lenguaje producido por este tipo de gramáticas puede ser reconocido por un autómata finito (FA por sus siglas in inglés). Un FA se define como ??:

$$M = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F) \quad (2.1)$$

donde

Q : conjunto finito no vacío de estados

Σ : conjunto finito no vacío de símbolos de entrada

δ : Función de transición $Q \times \Sigma \rightarrow Q$

q_0 : estado inicial

F : conjunto no vacío de estados finales

Ejemplo de autómata finito

Los autómatas finitos pueden representarse de dos maneras: (I) gráfica y (II) tabular.

I. En la representación gráfica, un estado se representa como Fig. 2.3(A)

Un estado inicial se representa como Fig. 2.3(B)

Un estado final se representa como Fig. 2.3(C)

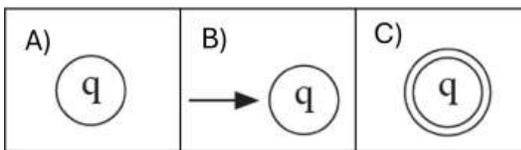


Figura 2.3: A) Representación de estado, B) Estado de inicio, C) Estado final.

Un FA se representa en formato gráfico en la Fig. 2.4

II. En el formato tabular, un estado se representa mediante el nombre del estado.

Para los autómatas finitos anteriores, el formato tabular es

2. MARCO TEÓRICO

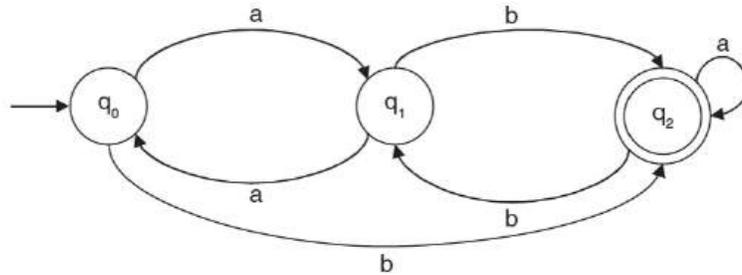


Figura 2.4: Representación gráfica de autómata finito

Estado presente	Siguiente estado a	Siguiente estado b
$\rightarrow q_0$	q_1	q_2
q_1	q_0	q_2
q_2	q_2	q_1

Tabla 2.1: Representación de autómata en tabla

De la representación I y II

$$Q : \{q_0, q_1, q_2\}$$

$$\Sigma : \{a, b\}$$

$$\delta : \delta(q_0, a) \rightarrow q_1$$

$$\delta(q_0, b) \rightarrow q_2$$

$$\delta(q_1, a) \rightarrow q_0$$

$$\delta(q_1, b) \rightarrow q_2$$

$$\delta(q_2, a) \rightarrow q_2$$

$$\delta(q_2, b) \rightarrow q_1$$

$$q_0 : \{q_0\}$$

$$F : \{q_2\}$$

2. MARCO TEÓRICO

2.3. Sistemas de Primer Orden

Un sistema se entiende como el conjunto de elementos que se interactúan entre sí, con el fin de lograr alguna tarea, las acciones de control pueden diferir dependiendo de la aplicación considerando variables digitales y analógicas. Para propósitos del presente proyecto se presenta el funcionamiento de un sistema de tipo lineal, señal que se considerará para modelar la dinámica del consumo de corriente de los actuadores activados del sistema industrial a analizar. El sistema lineal al recibir una entrada tiene una activación de tipo exponencial. Información tomada de (53)

En ingeniería, existen diferentes tipos de sistemas entre ellos: eléctricos, electrónicos, mecánicos y térmicos

Estos sistemas son generalmente representados por ecuaciones diferenciales, las cuales, dependiendo de los elementos que los conformen, serán ecuaciones de diferentes órdenes, donde el orden de una ecuación diferencial está dada por el orden de la derivada más alta.

Ahora bien, un sistema de primer orden es:

Un sistema que está representado por una ecuación diferencial, donde la diferencial más alta es de orden 1.

A partir de la ecuación que representa al sistema, se puede obtener la función de transferencia del mismo, de la cual también podemos definir el orden de un sistema de la siguiente forma:

El orden de un sistema se representa por medio del polinomio que se encuentra en el denominador de la ecuación que representa su función de transferencia, en el caso de los sistemas de primer orden, este polinomio es de orden 1.

Como es bien sabido, este polinomio define el número de polos con los que el sistema trabaja. Los sistemas de primer orden se pueden analizar a partir de la respuesta temporal a cierto tipo de entradas, tales como el escalón, la rampa y el impulso unitario.

La ecuación característica de los sistemas de primer orden se muestra en 2.2

$$a \frac{dy(t)}{dt} + by(t) = cx(t) \quad (2.2)$$

2. MARCO TEÓRICO

Donde a , b y c son los coeficientes del polinomio.

A la ecuación 2.2 se aplica la transformada de Laplace para simplificarla y así obtener la función de transferencia como se muestra en 2.3

$$\Delta = \frac{y(s)}{xs} \quad (2.3)$$

Al Aplicar la transformada de Laplace a 2.2, se obtiene 2.4

$$(as + b)y(s) = cx(s) \quad (2.4)$$

Despejando $y(s)$ de 2.4 y tal que $\frac{y(s)}{x(s)}$ se obtiene 2.5

$$\Delta = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{c}{as + b} \quad (2.5)$$

Dividiendo todos los elementos de 2.5 entre b , y se obtiene 2.6

$$\Delta = \frac{\frac{c}{b}}{\frac{a}{b}s + 1} \quad (2.6)$$

De 2.6 donde $\frac{c}{b} = K$ y $\frac{a}{b} = T$, una vez declaradas las constantes se puede determinar la función de transferencia 2.7.

$$\Delta = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (2.7)$$

De 2.7, K es la ganancia del sistema de primer orden y T constante del tiempo del sistema de primer orden.

La respuesta en el tiempo del sistema de primer orden, se puede observar en la Figura 2.5. Vemos que en la salida existe un retraso para llegar al valor deseado, en este caso tarda un tiempo $3T$ para alcanzar el 95 % del valor deseado.

2. MARCO TEÓRICO

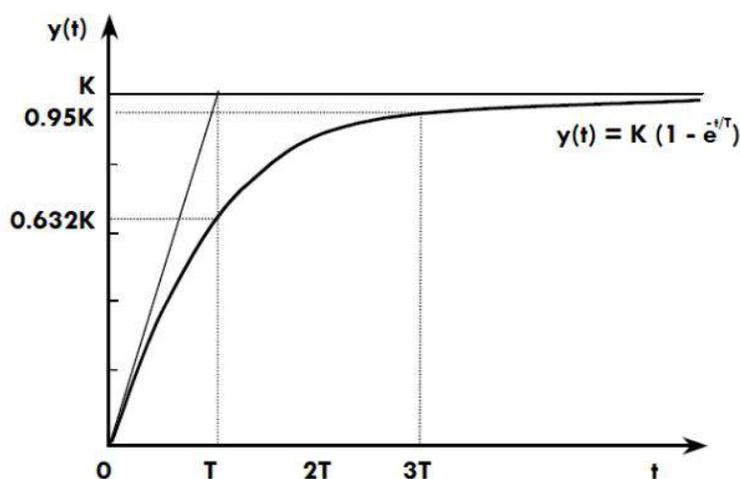


Figura 2.5: Respuesta Dinamica de Sistema de primer orden [Figura tomada de (53)]

2.3.1. Filtrado y atenuación de señales

El modelo de automata hibrido contenido en la siguiente seccion consta de diferentes variables entre las que se considera que para que cambie de un estado a otro se debe considerar la transicion y el consumo de corriente especificado para cada estado. La corriente se modela como una señal que se asemeje a una respuesta de primer orden Fig. 2.5, ademas se utiliza la aplicacion de un filtro de paso bajo de primer orden.

Un filtro paso bajo de primer orden corresponde a un filtro electrónico y se caracteriza por tener la capacidad de atenuar las frecuencias mas altas y dejar pasar solo las frecuencias mas bajas, lo cual es utilizado en una lectura de algún sensor que es muy ruidoso (variacion de frecuencia) es decir que los valores obtenidos del sensore son estables por ejemplo lecturas de vibración, aceleración o corriente como en el caso de este proyecto, en un ambiente con mucha armónica.

En esta aplicacion se utilizara un filtro pasa bajos, el cual se encarga de calcular el promedio de cada lectura entregando una salida con un grado menor de frecuencia en comparacion a la entrada con alta frecuencia.

La implementacion de este filtro se hace mediante el uso de 2.8.

2. MARCO TEÓRICO

$$y_n = \alpha * y_{n-1} + (1 - \alpha) * y_n \quad (2.8)$$

Donde:

y_n : Lectura de corriente que ya fue filtrado.

α : Es una constante con la cual determinamos el grado de filtrado, donde 1 es sin filtro y 0 es filtrado totalmente, dentro de este proyecto se utilizara 0.05.

y_{n-1} : Es la lectura de la corriente antes de ser filtrada.

Mediante 2.8 y considerando el consumo de corriente de sensores y actuadores es lineas o de respuesta exponencial, se utilizara para modelar la dinámica de cada una de las variables de estado continuas de los autómatas híbridos.

2.4. Sistemas de Dinámicas Híbridas

Los sistemas híbridos se caracterizan por una dinámica continua y discreta, ya que en estos sistemas se combinan la toma de decisiones lógicas y las acciones de control normativo con procesos físicos continuos. Los modelos matemáticos deben combinar la dinámica continua y discreta del sistema. Dichos modelos matemáticos consisten en ecuaciones diferenciales o en diferencia de dinámica continua y autómatas u otros modelos de eventos discretos para dinámica discreta. La combinación de técnicas de modelado es la base de la teoría de sistemas híbridos, que desempeña un papel importante en el diseño multidisciplinario de muchos sistemas ciberfísicos (24).

2.4.1. Autómata híbrido

Los autómatas híbridos proporcionan modelos formales para los sistemas dinámicos híbridos y pueden verse como una extensión de los autómatas finitos al agregar dinámica continua en cada uno de sus estados discretos (también llamados modos). Cada modo está asociado con restricciones dentro de las cuales evoluciona la dinámica continua. Los guarda entre modos se anotan con protecciones que especifican las condiciones para que se active la transición de modo; cada guarda también está asociado con un mapa de reinicio que indica cómo se actualizan las

2. MARCO TEÓRICO

variables continuas después de la transición discreta. Los autómatas híbridos se definen a continuación (25).

Un autómata híbrido H es una colección de :

$$H = (Q, X, f, Init, Inv, E, G, R) \quad (2.9)$$

Donde:

$Q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ es un conjunto finito de estados discretos;

$X \subseteq R^n$ representa el espacio de estado de las variables de estado continuas;

$f : Q \times X \rightarrow R^n$ asigna a cada estado discreto $q \in Q$ un campo vectorial analítico $f(q, \cdot)$;

$Init \subseteq Q \times X$ es el conjunto de estados iniciales;

$Inv : Q \rightarrow 2^X$ asigna a cada estado $q \in Q$ un conjunto $Inv(q) \subseteq X$ llamado conjunto invariante;

$E \subseteq Q \times Q$ es el conjunto de transiciones discretas;

$G : E \rightarrow 2^X$ asigna a cada transición discreta $(q, q') \in E$ un conjunto de guarda $G(q, q') \subset X$;

$R : E \times X \rightarrow 2^X$ es un mapa de reinicio.

Ejemplo Automata Híbrido

Se analiza un sistema de control de temperatura. El control contiene dos modos de operación para encender y apagar un termostato. La temperatura cumple diferentes dinámicas continuas dependiendo de si el termostato está encendido o apagado. El sistema está inicialmente apagado y la temperatura es inferior a 60° . El proceso de control de temperatura cumple con la siguiente característica: el termostato se enciende y permanece encendido, elevando la temperatura de la habitación con un valor límite de 70° . Una vez que la temperatura en la habitación alcanza los 70° , el termostato se apaga. Debido al tiempo de respuesta del sistema, el termostato se apaga antes de que la temperatura alcance los 71° . Cuando el termostato está apagado, la temperatura ambiente desciende debido

2. MARCO TEÓRICO

a las pérdidas de calor. Una vez que la temperatura desciende por debajo de los 70° , el termostato se encenderá; debido al tiempo de respuesta del sistema, el termostato se enciende antes de que la temperatura baje a 69° . El sistema de control de temperatura se puede modelar como un autómata híbrido con elementos en el modelo identificados de la siguiente manera (25):

$$Q = (ON, OFF);$$

$X = R$ es el estado de variable continua que denota la temperatura ambiente;

$$f(ON, x) = -x + 100 \text{ y } f(OFF, x) = -x;$$

$$Init = (OFF)x(x \leq 60);$$

$$Inv(ON) = (x \in R : x \leq 71) \text{ y } Inv(OFF) = (x \in R : x \geq 69);$$

$$E = ((ON, OFF), (OFF, ON));$$

$$G(ON, OFF) = x \in R : x \geq 70, \text{ y } G(OFF, ON) = x \in R : x \leq 70;$$

$$R((ON, OFF), x) = x \text{ y } R((OFF, ON), x) = x.$$

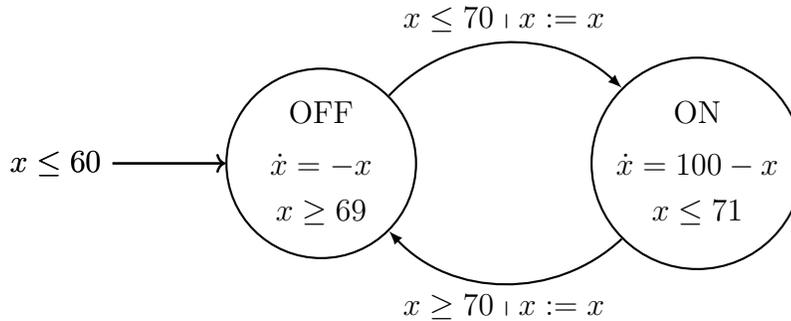


Figura 2.6: Ejemplo de autómata híbrido.

2.5. Teoría de Grafos

Teoría de grafos, la ciencia en la que se basan las redes complejas. La conceptualización de la teoría de grafos fue en 1735 en Königsberg, la capital de Prusia Oriental. Debido al río Pregel, se construyeron 7 puentes, lo que ayudó al

2. MARCO TEÓRICO

comercio de barcos a cruzar el río libremente. La construcción de estos puentes que interconectan varios lugares como se muestra en la Fig. 2.7 dio lugar a una pregunta: ¿Es posible cruzar los siete puentes y nunca cruzar el mismo dos veces? A pesar de muchos intentos, no fue posible encontrar la solución. El problema permaneció sin resolver hasta 1735, cuando Leonard Euler, un matemático nacido en Suiza, ofreció una prueba matemática rigurosa de que tal camino no existe (29; 31).

Euler representó cada una de las cuatro áreas de tierra separadas por el río con las números 1, 2, 3 y 4 Fig. 2.7. Luego conectó cada pedazo de tierra que tenía un puente entre ellos con líneas. Construyó así un grafo, cuyos nodos eran pedazos de tierra y los eslabones eran los puentes. Así que Euler hizo una simple observación: si hay un camino que cruza todos los puentes, pero nunca el mismo puente dos veces, entonces los nodos con un número impar de enlaces deben ser el punto inicial o final de este camino. De hecho, si llega a un nodo con un número impar de enlaces, es posible que no tenga ningún enlace sin usar para salir de él.

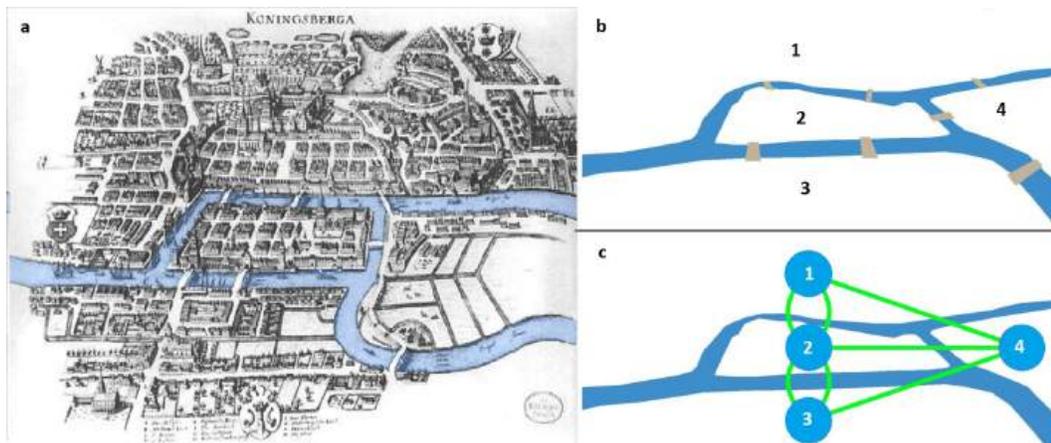


Figura 2.7: A) Los puentes de Königsberg. B)Asignación de nombre a las 4 áreas de tierra C)Red compleja obtenido de los puentes.

2.5.1. Redes complejas

Las redes complejas se conocen como conjuntos de nodos conectados que están interconectados. Los nodos de una red pueden llamarse vértices o elementos y se

2. MARCO TEÓRICO

representan con los símbolos v_1, v_2, \dots, v_N , donde N es el número total de nodos de la red. Si un nodo v_i está conectado a otro nodo v_j , esta conexión está representada por un par ordenado (v_i, v_j) . La definición matemática de una red (también llamada gráfico) es la siguiente:

Formalmente una red R consta de un conjunto de nodos $V = v_1, v_2, \dots, v_N$, y un conjunto de pares ordenados $E = (v_i, v_j) \subset V \times V$. Cada par ordenado (v_i, v_j) se denomina conexión dirigida desde el nodo v_i al nodo v_j .

Una red de tipo no dirigida consiste en que por cada par $(v_i, v_j) \in \varepsilon$ existe también el par $(v_j, v_i) \in \varepsilon$ (Figura 2.8A). Si no se cumple lo anterior, la red se llama dirigida (Figura 2.8B). Los nodos que están directamente conectados a un nodo v_i se denominan vecinos de v_i (2).

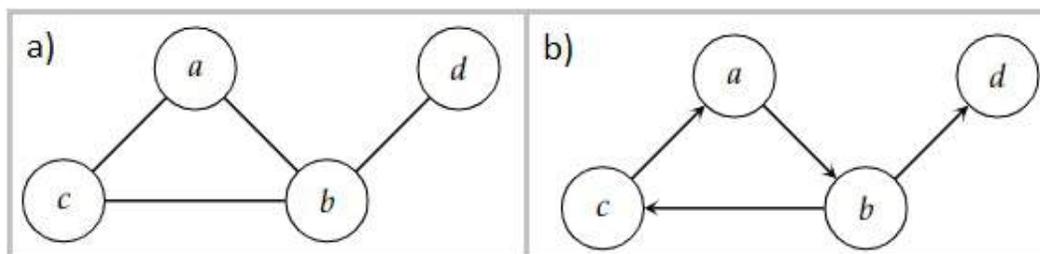


Figura 2.8: A) Red no dirigida. B) Red dirigida

2.5.2. Redes bipartitas

Un gráfico bipartito (o bigraph) es una red cuyos nodos se pueden dividir en dos conjuntos disjuntos U y V de modo que cada enlace conecta un nodo U a un nodo V . En otras palabras, si coloreamos los nodos U en verde y los nodos V en púrpura, entonces cada enlace debe conectar nodos de diferentes colores.

Podemos generar dos proyecciones para cada red bipartita. La primera proyección conecta dos nodos U por un enlace si están vinculados al mismo nodo V en la representación bipartita. La segunda proyección conecta los nodos V por un enlace si se conectan al mismo nodo U , observe en la Figura 2.9 (8).

2. MARCO TEÓRICO

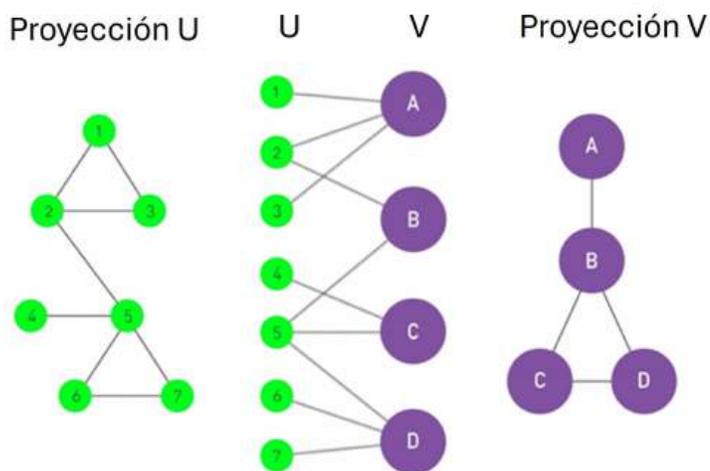


Figura 2.9: Ejemplo Red bipartita.

2.5.3. Matriz de adyacencia

Una descripción completa de una red requiere que se realice un seguimiento de sus enlaces tal como se observa en la Matriz 2.5.3. La forma más sencilla de lograr esto es proporcionar una lista completa de los enlaces. Por ejemplo, la red de la Figura 2.10 se describe de manera única al enumerar sus cuatro enlaces: (1, 2), (1, 3), (2, 3), (2, 4). Para fines matemáticos, a menudo representamos una red a través de su matriz de adyacencia. La matriz de adyacencia de una red dirigida de N nodos tiene N filas y N columnas, siendo sus elementos:

$A_{ij} = 1$ si hay un enlace que apunta del nodo j al nodo i .

$A_{ij} = 0$ si los nodos i y j no están conectados entre sí.

La matriz de adyacencia de una red no dirigida tiene dos entradas para cada enlace, p . El enlace (1, 2) se representa como $A_{1,2} = 1$ y $A_{2,1} = 1$. Por lo tanto, la matriz de adyacencia de una red no dirigida es simétrica, $A_{ij} = A_{ji}$, ver Figura 2.10(A).

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix}$$

2. MARCO TEÓRICO

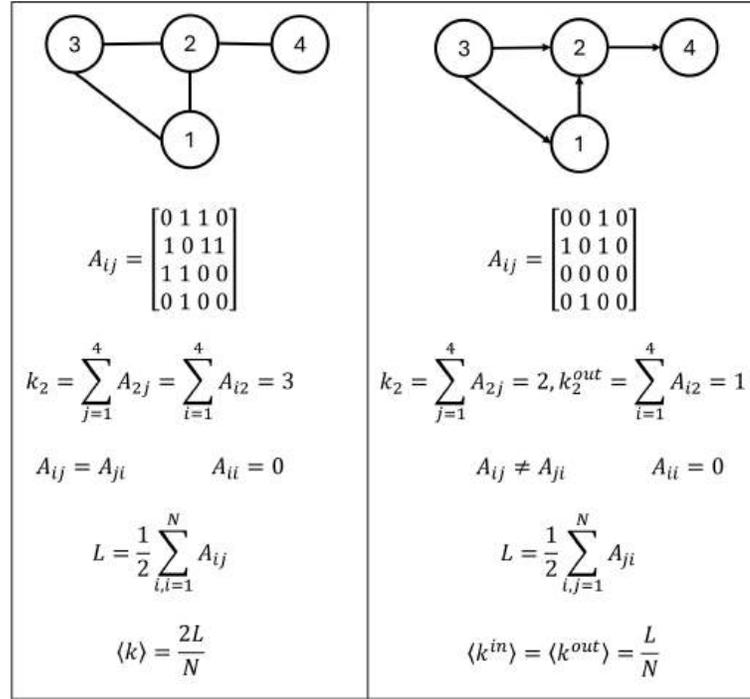


Figura 2.10: Ejemplo de matriz de adyacencia A) Red no dirigida B) Red dirigida.

2.6. Análisis del Estado del Arte

2.6.1. Diagnóstico de fallas

Los sistemas ciberfísicos están integrados por dos subsistemas: un sistema físico compuesto por sensores, actuadores, Controladores Lógicos Programables (PLC) y, en algunos casos, una Interfaz hombre-máquina (HMI) (21; 34; 52), y un sistema digital que se considera parte de los sistemas que desarrollan diferentes tareas como el monitoreo, optimización y diagnóstico del sistema físico (16; 55; 56). El sistema digital del proyecto consta de un controlador de supervisión, un componente de diagnóstico de fallas y un gemelo digital. Además, se necesita un protocolo de comunicación para enviar/recibir información en ambos subsistemas. En los sistemas ciberfísicos se utiliza una herramienta matemática llamada autómatas híbridos que brinda la posibilidad de modelar variables digitales y analógicas y permite el uso de retardos de tiempo que son importantes para que el sistema

2. MARCO TEÓRICO

se comunique con su gemelo digital (6; 23; 48). Los sistemas ciberfísicos (CPS) deben estar en comunicación en tiempo real para poder verificar la información sobre el proceso.

Entre las diferentes posibilidades para el funcionamiento del gemelo digital dentro de un CPS, que es un enfoque ampliamente aceptado, el gemelo digital proporciona un medio para la puesta en marcha remota y simulada de los sistemas de fabricación, lo que permite la rápida reconfiguración del sistema de fabricación automatizado. Por el contrario, el enfoque CPS presentado está orientado a la detección de fallas, lo que requiere que el gemelo digital se ejecute en paralelo con los sistemas físicos. La ejecución y comparación en tiempo de ejecución puede permitir la detección de errores múltiples y simultáneos. En la aplicación de la Industria 4.0 existen posibilidades de proponer, diseñar e implementar nuevos conceptos que puedan mejorar los sistemas productivos, lo cual es de interés tanto para la academia como para la industria.

Encontramos en (39), (14) y (49) que la combinación de autómatas híbridos y teoría de redes complejas se ha aplicado para el análisis de sistemas, pero no para diagnosticar fallas de sistemas. Una red compleja puede reproducir la evolución de un sistema en red si el sistema está controlado por un autómata híbrido que cambia de un estado a otro (4). El sistema de control híbrido activa o desactiva los actuadores en respuesta a los valores del sensor. Las matrices de adyacencia se construyen para el análisis de redes complejas, que colocan correspondencias a los nodos conectados (12; 36; 57). A partir de la lectura de sensores y la activación y desactivación de actuadores del sistema físico, la información se guarda en la matriz de adyacencia utilizando pesos arbitrarios, correspondientes al espacio asignado por cada sensor o actuador (32).

2.6.2. Análisis de desempeño

CPS utiliza las propiedades lógicas y discretas de las computadoras para controlar y monitorear las propiedades continuas y dinámicas de los sistemas físicos (19). Además, los CPS son sistemas inteligentes que pueden evolucionar por sí mismos, como es propio de los sistemas de fabricación flexibles y reconfigurables (27; 44). Los sistemas de producción evolutivos requieren diferentes estrategias

2. MARCO TEÓRICO

para mejorar con el tiempo (42). Se han propuesto arquitecturas específicas y esquemas de simulación de gemelos digitales para predecir el rendimiento de los sistemas de control de fabricación distribuida (43). La coherencia entre las entidades físicas y digitales es importante para predecir el resultado de las simulaciones que conducen a la fabricación virtual. Los dominios físicos y virtuales se abordan de manera diferente (30). El diseño de producto basado en big data enfatiza principalmente el análisis de datos físicos en lugar de los modelos virtuales (51), en cambio, los gemelos digitales permiten la convergencia entre los espacios físicos y virtuales del producto. Los estudios muestran cómo construir un gemelo digital para el monitoreo de control integrado utilizando dispositivos de borde, análisis de datos y visualización 3D realista (10). El emparejamiento del mundo virtual y físico permite el análisis de datos y el monitoreo de los sistemas para evitar problemas antes de que ocurran.

La combinación de autómatas híbridos y redes complejas se ha aplicado para el modelado y análisis de sistemas (15; 50). La técnica de autómatas de estado finito utilizada en los sistemas de control híbridos activa o desactiva los actuadores en respuesta a los valores del sensor. Las máquinas de estado finito (FSM) se utilizan para controlar no solo las estaciones de trabajo independientes compuestas por máquinas o procesos, sino también para realizar el control de supervisión y coordinar las diferentes estaciones de trabajo en celdas de fabricación o líneas de proceso (46). Una red compleja puede reproducir la evolución de un sistema controlado por un autómata híbrido (5). Los sistemas ciberfísicos son sistemas distribuidos que se pueden modelar con redes complejas utilizando matrices de adyacencia que especifican correspondencias a los nodos conectados utilizando pesos arbitrarios (33; 58).

Las operaciones del proceso se supervisan a través de la definición de un indicador clave de resultados (KRI). Los KRI se toman directamente de máquinas y sensores y dan un conjunto de resultados que son medibles. Un ejemplo es el tiempo de ciclo en una línea de producción, donde se realiza un cálculo entre la hora de inicio y la hora de finalización de un producto. Esa diferencia dará el tiempo del ciclo de producción de una pieza o producto (45). Los indicadores clave de desempeño (KPI) son críticos y vitales para monitorear el rendimiento del

2. MARCO TEÓRICO

sistema de producción, pueden requerir cálculos antes de mostrar información significativa o pueden obtenerse mediante enfoques de aprendizaje profundo para la estimación del siguiente valor de KPI (1). El KRI y el KPI son información crítica en entornos ciberfísicos. Esta investigación se centra en proponer redes complejas como modelos informáticos para integrar tanto KRI como KPI para monitorizar los factores de éxito de los sistemas de producción ciberfísicos (CPPS).

3

DIAGNÓSTICO DE FALLAS

3.1. Introducción

En este capítulo, se propone un enfoque funcional y práctico de un sistema ciberfísico para diagnosticar múltiples fallas concurrentes en un sistema automático de almacenamiento y recuperación. El gemelo virtual (DT por sus siglas en inglés) comprende un autómata híbrido y una simulación numérica del sistema físico. Los sensores, actuadores y unidades de control, como dispositivos conectados, se modelan como redes complejas para aprovechar algunos conceptos y herramientas de análisis derivados de la teoría de redes complejas. El objetivo del enfoque de sistema ciberfísico propuesto es monitorear y diagnosticar fallas en los sensores y actuadores y en la ejecución del control lógico secuencial. El gemelo digital está integrado en el controlador de supervisión y se ejecuta simultáneamente con el proceso físico.

Los algoritmos computacionales implementados en el DT consisten en detectar fallas de manera oportuna y así reducir los retrasos en los procesos productivos de fabricación, y mejorar la productividad.

La mayoría de los enfoques propuestos para el diagnóstico de fallas utilizando DT y CPS están más orientados a la puesta en servicio de sistemas de fabricación con fines de reconfiguración y optimización. El enfoque propuesto difiere del encontrado en la literatura, ya que se requiere que el DT funcione en paralelo para poder realizar un diagnóstico de falla en línea. En esta sección se presen-

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

ta una conceptualización básica de un sistema ciberfísico que incorpora una red compleja.

3.2. Sistema de Contro del Almacén

El funcionamiento de un almacén automático se modela como un autómata híbrido. Los estados del sistema físico se dividen en dos modos de funcionamiento: carga y llenado del almacén y descarga y vaciado del almacén. Además, la variable que se medirá es la corriente consumida por los actuadores activados en cada estado. El modo de carga del elevador tiene la siguiente programación, el estado q_{P0} activa las luces indicadoras de los pulsadores y la columna luminosa, el estado q_{P1} activa dos motores de cinta que transportan el producto para su almacenaje, el estado q_{P2} activa el movimiento de las horquillas hacia la izquierda, el estado q_{P3} activa el movimiento de las horquillas hacia arriba, el estado q_{P4} activa el movimiento de las horquillas retrayéndose hacia la izquierda, estado q_{P5} activa un elevador que lleva el paquete a una posición específica, estado q_{P6} activa el movimiento de las horquillas hacia la derecha, estado q_{P7} activa el movimiento de las horquillas replegándose desde arriba, el estado q_{P8} activa el movimiento de retracción de las horquillas hacia la derecha, el estado q_{P9} es el ascensor enviado a su posición inicial, el estado q_{P10} es el ascensor en la posición inicial, y el estado q_{P11} es el tiempo de retardo para el sistema de la Figura 3.1B,C. Se puede observar la localización de hardware del sistema.

El modo de descarga cuenta con los siguientes elementos, tal y como se muestra en la Figure 3.1A,C. Estado q_{P12} se activan los indicadores luminosos de los pulsadores y la columna de luces, estado q_{P13} se activa el elevador que va a la posición de descarga, estado q_{P14} se activa el movimiento de las horquillas hacia la derecha, estado q_{P15} se activa el movimiento de las horquillas hacia arriba, estado q_{P16} se activa el movimiento de las horquillas hacia el retractor derecho, estado q_{P17} se envía el elevador a su posición inicial, estado q_{P18} se activa el movimiento de las horquillas hacia la derecha, estado q_{P19} se activa el movimiento de las horquillas retrayéndose hacia abajo, estado q_{P20} se activa el movimiento de las horquillas retrayéndose hacia la derecha, y estado q_{P21} se envía el ascensor a casa, así como se activan las cintas transportadoras que retiran el objeto del almacén.

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

La Figura 3.3 muestra el autómata y la Tabla 3.1 muestra los estados y salidas activados en cada uno.

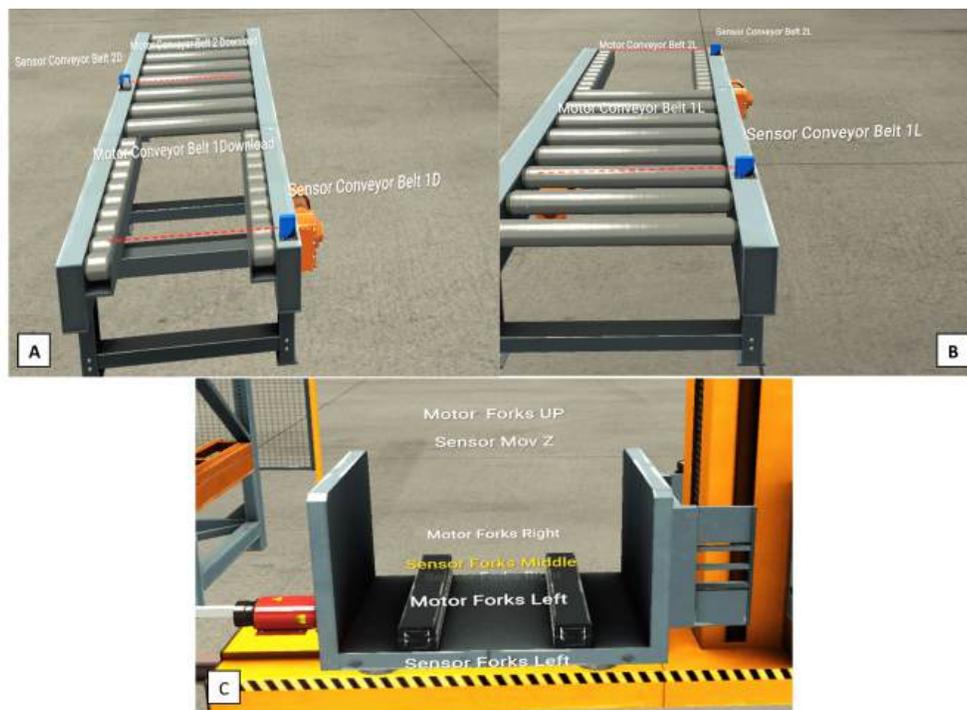


Figura 3.1: A) Sensores y actuadores en banda transportadora de descarga, B) Sensores y actuadores en banda transportadora de carga, C) Sensores y actuadores en base de elevador.

3.2.1. Modelo del controlador virtual del almacén

Los sistemas ciber-físicos se caracterizan por disponer de una base de conocimiento en un entorno virtual, por lo que para verificar que el sistema funciona de manera óptima, se modela el proceso de almacenamiento mediante la teoría de automata con variables virtuales, tal y como se muestra en la Figura 3.4.

3.3. Esquema propuesto de Sistema Ciberfísico

El sistema ciberfísico aquí propuesto está compuesto por una estructura de comunicación entre dos sistemas, el físico y el digital. El sistema físico comprende

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

Tabla 3.1: Activación de estados y salidas.

Estado	Salida	Estado	Salida	Estado	Salida	Estado	Salida
q_{P0}	Led	q_{P5}	Motores Elevador	q_{P10}	Leds	q_{P15}	Motores Elevador
q_{P1}	Motores de Bandas	q_{P6}	Horquillas Derecha	q_{P11}	Motores Elevador	q_{P16}	Motor Horquillas
q_{P2}	Horquillas Izquierda	q_{P7}	Horquillas Arriba	q_{P12}	Horquillas	q_{P17}	Motor Horquillas
q_{P3}	Horquillas Arriba	q_{P8}	Horquillas Izquierda	q_{P13}	Horquillas	q_{P18}	Motor Horquillas
q_{P4}	Horquillas Derecha	q_{P9}	Motores elevador	q_{P14}	Horquillas	q_{P19}	Motores Bandas

un controlador lógico programable (PLC) y una interfaz hombre-máquina (HMI) interconectada al controlador supervisor a través del PLC. El sistema digital comprende un control de supervisión y un gemelo digital integrado en el sistema digital. El esquema CPS completo propuesto se muestra en el diagrama de la Figura 3.2. Esta comparación en tiempo real le posibilitará el diagnóstico y localización de fallas..

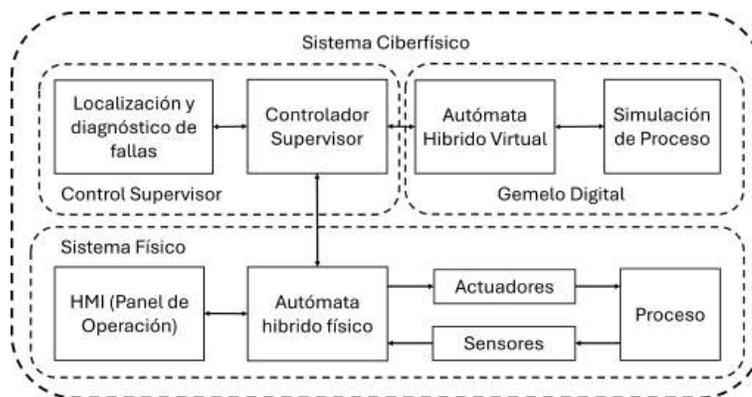


Figura 3.2: Esquema propuesto del sistema ciberfísico.

En el sistema ciberfísico propuesto Ecuacion 3.1 existen dos autómatas: H_P ,

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

que es el autómata híbrido físico, y H_V , es decir, el autómata virtual híbrido, que se ejecuta en un sistema virtual. T_S es el tiempo de sincronización y Adj_M es la Matriz de Adyacencia.

$$CPS = \{H_P, H_V, T_S, Adj_M\} \quad (3.1)$$

Los autómatas híbridos H_F y H_V comparten los mismos conjuntos de estados, funciones y variables; sin embargo, las variables H_V son del sistema virtual y las variables H_P del sistema físico. La representación gráfica de los autómatas se presenta en las Figuras 3.3 y 3.4.

Q = Denota el conjunto de estados correspondiente al estado

$$Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8, q_9, q_{10}, q_{11}, q_{12}, q_{13}, q_{14}, q_{15}, q_{16}, q_{17}, q_{18}, q_{19}, q_{20}, q_{21}\}$$

$dx = R$ representa el rango de consumo de corriente de acuerdo con las salidas activadas. El modelo de consumo de corriente empleado se basa en la implementación de un modelo de sistema de primer orden, que incorpora un parámetro α . A cada actuador se le asigna un valor único de consumo de corriente observado, tal y como se define para cada estado. El cálculo de la corriente consumida, denotada x , se logra a través de la medición de la corriente consumida por los actuadores y_n , multiplicada por $(1 - \alpha)$, combinada con la evolución dinámica de la corriente y_{n-1} escalada por α Ecuación 3.2..

$$y_n = \alpha * y_{n-1} + (1 - \alpha) * y_n \quad (3.2)$$

$$Init = \{q_0\}x\{1\} \text{ or } \{q_{10}\}x\{1\}$$

f = denota un valor de la variable de corriente por cada estado

$$f(q_0, x_1) = 10 \text{ and } f(q_1, x_2) = 10 \text{ and } f(q_2, x_3, x_4, x_5) = 5, 5, 10 \text{ and}$$

$$f(q_3, x_6, x_7) = 2, 10 \text{ and } f(q_4, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}) = 2, 2, 10, 10 \text{ and } f(q_5, x_{12}, x_{13}) = 2, 10, \text{ and}$$

$$f(q_6, x_{14}, x_{15}) = 2, 10, \text{ and } f(q_7, x_{16}, x_{17}, x_{18}) = 2, 2, 10 \text{ and } f(q_8, x_{19}, x_{20}) = 2, 10, \text{ and}$$

$$f(q_9, x_{21}) = 10 \text{ and } f(q_{10}, x_{22}) = 10 \text{ and } (q_{11}, x_{23}) = 10, \text{ and } f(q_{12}, x_{24}) = 10 \text{ and}$$

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

$$f(q13, x25) = 10, \text{ and } f(q14, x26) = 2, \text{ and } f(q15, x27, X28) = 2, 10, \text{ and}$$

$$f(q16, x29, x30) = 2, 10, \text{ and } f(q17, x31, x32) = 2, 10 \text{ and}$$

$$f(q18, x33, x34, x35, x36, x37) = 5, 5, 2, 2, 10 \text{ and } f(q19, x38, x39, x40) = 5, 5, 10 \text{ and}$$

$$f(q20, x41, x42, x43) = 5, 5, 10 \text{ and } f(q21, x44, x45, x46) = 5, 5, 10$$

Inv: Define el valor de la variable analógica para que cambie de estado del automata fisico

$$Inv(q0) = \{x \in R : x \geq 10\} \text{ and } Inv(q1) = \{x \in R : x \geq 10\} \text{ and}$$

$$Inv(q2) = \{x \in R : x \geq 20\} \text{ and } Inv(q3) = \{x \in R : x \geq 12\} \text{ and}$$

$$Inv(q4) = \{x \in R : x \geq 24\} \text{ and } Inv(q5) = \{x \in R : x \geq 12\} \text{ and}$$

$$Inv(q6) = \{x \in R : x \geq 12\} \text{ and } Inv(q7) = \{x \in R : x \geq 14\} \text{ and}$$

$$Inv(q8) = \{x \in R : x \geq 12\} \text{ and } Inv(q9) = \{x \in R : x \geq 10\} \text{ and}$$

$$Inv(q10) = \{x \in R : x \geq 10\} \text{ and } Inv(q11) = \{x \in R : x \geq 10\} \text{ and}$$

$$Inv(q12) = \{x \in R : x \geq 10\} \text{ and } Inv(q13) = \{x \in R : x \geq 10\} \text{ and}$$

$$Inv(q14) = \{x \in R : x \geq 2\} \text{ and } Inv(q15) = \{x \in R : x \geq 12\} \text{ and}$$

$$Inv(q16) = \{x \in R : x \geq 12\} \text{ and } Inv(q17) = \{x \in R : x \geq 12\} \text{ and}$$

$$Inv(q18) = \{x \in R : x \geq 24\} \text{ and } Inv(q19) = \{x \in R : x \geq 20\}$$

$$Inv(q20) = \{x \in R : x \geq 20\} \text{ and } Inv(q21) = \{x \in R : x \geq 20\}$$

E: Conjunto de variables discretas

$$E1 = \{(q0, q12)(q0, q1), (q1, q2)(q2, q3)(q3, q4)(q4, q5)$$

$$(q5, q6)(q6, q7)(q7, q8)(q8, q9)(q9, q10)(q10, q11)\}$$

$$E2 = \{(q12, q0)(q12, q13), (q13, q14)(q14, q15)(q15, q16)(q16, q17)$$

$$(q17, q18)(q18, q19)(q19, q20)(q20, q21)(q21, q12)\}$$

G= Define las gurad del automata

$$G(q0, q1) = \{x \in R : x1 \geq 9,8\} \text{ and } G(q1, q2) = \{x \in R : x2 \geq 9,8\} \text{ and}$$

$$G(q2, q3) = \{x \in R : x3 \geq 19,8\} \text{ and } G(q3, q4) = \{x \in R : x4 \geq 11,8\} \text{ and}$$

$$G(q4, q5) = \{x \in R : x5 \leq 23,8\} \text{ and } G(q5, q6) = \{x \in R : x6 \leq 11,8\} \text{ and}$$

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

$$G(q6, q7) = \{x \in R : x7 \leq 11,8\} \text{ and } G(q7, q8) = \{x \in R : x8 \geq 13,8\} \text{ and}$$

$$G(q8, q9) = \{x \in R : x9 \geq 11,8\} \text{ and } G(q9, q10) = \{x \in R : x1 \geq 9,8\} \text{ and}$$

$$G(q10, q11) = \{x \in R : x1 \geq 9,8\} \text{ and } G(q11, q0) = \{x \in R : x1 \geq 9,8\}$$

$$G(q0, q12) = \{x \in R : x1 \geq 9,8\}$$

$$G(q12, q13) = \{x \in R : x2 \geq 9,8\} \text{ and } G(q13, q14) = \{x \in R : x3 \geq 9,8\} \text{ and}$$

$$G(q14, q15) = \{x \in R : x4 \geq 1,8\} \text{ and } G(q15, q16) = \{x \in R : x5 \geq 11,8\} \text{ and}$$

$$G(q16, q17) = \{x \in R : x6 \geq 11,8\} \text{ and } G(q17, q18) = \{x \in R : x7 \geq 11,8\} \text{ and}$$

$$G(q18, q19) = \{x \in R : x8 \geq 23,8\} \text{ and } G(q19, q20) = \{x \in R : x9 \geq 19,8\}$$

$$G(q20, q21) = \{x \in R : x8 \geq 19,8\} \text{ and } G(q21, q12) = \{x \in R : x9 \geq 19,8\}$$

$$G(q12, q0) = \{x \in R : x8 \geq 9,8\}$$

R= Mapa de reset

$$R((q0, q1), x) = \{x\} \text{ and } R((q1, q2), x) = \{x\} \text{ and } R((q2, q3), x) = \{x\} \text{ and}$$

$$R((q3, q4), x) = \{x\} \text{ and } R((q4, q5), x) = \{x\} \text{ and } R((q5, q6), x) = \{x\} \text{ and}$$

$$R((q6, q7), x) = \{x\} \text{ and } R((q7, q8), x) = \{x\} \text{ and } R((q8, q9), x) = \{x\} \text{ and}$$

$$R((q9, q0), x) = \{x\} \text{ and } R((q10, q11), x) = \{x\} \text{ and } R((q11, q12), x) = \{x\} \text{ and}$$

$$R((q12, q13), x) = \{x\} \text{ and } R((q13, q14), x) = \{x\} \text{ and } R((q14, q15), x) = \{x\} \text{ and}$$

$$R((q15, q16), x) = \{x\} \text{ and } R((q16, q17), x) = \{x\} \text{ and } R((q17, q18), x) = \{x\} \text{ and}$$

$$R((q18, q19), x) = \{x\} \text{ and } R((q19, q10), x) = \{x\}$$

La matriz de adyacencia $Adj_{MInputs}$ se presenta como un conjunto ya que se considera unicamente los lugares donde el PLC recibe información de las entradas del sistema.

$$Adj_{MInputs} = \{V_{I1}, V_{I2}, V_{I3}, V_{I4}, V_{I5}, V_{I6}, V_{I7}, V_{I8}, V_{I9},$$

$$V_{I10}, V_{I11}, V_{I12}, V_{I13}, V_{I14}, V_{I15}, V_{I16}, V_{I17}\}$$

La matriz de adyacencia $Adj_{MOutputs}$ se presenta como un conjunto ya que se considera unicamente los lugares donde el PLC realiza activación de actuadores del sistema.

$$Adj_{MOutputs} = \{V_{O1}, V_{O2}, V_{O3}, V_{O4}, V_{O5}, V_{O6}, V_{O7}, V_{O8}, V_{O9},$$

$$V_{O10}, V_{O11}, V_{O12}, V_{O13}, V_{O14}, V_{O15}, V_{O16}, V_{O17}\}$$

T_S = El tiempo de sincronización dependerá del control supervisor. Para el sistema propuesto, se considera un retardo de tiempo de 100 ms para cada cambio de estado para comparar los vectores de entrada y salida.

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

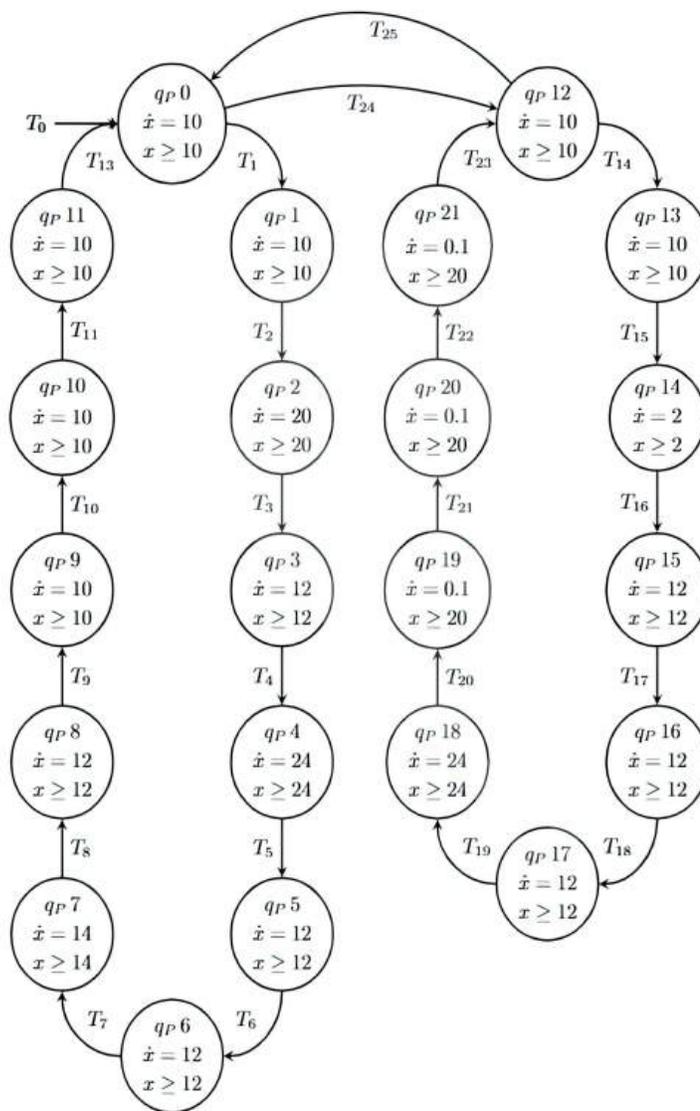


Figura 3.3: Autómata híbrido físico.

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

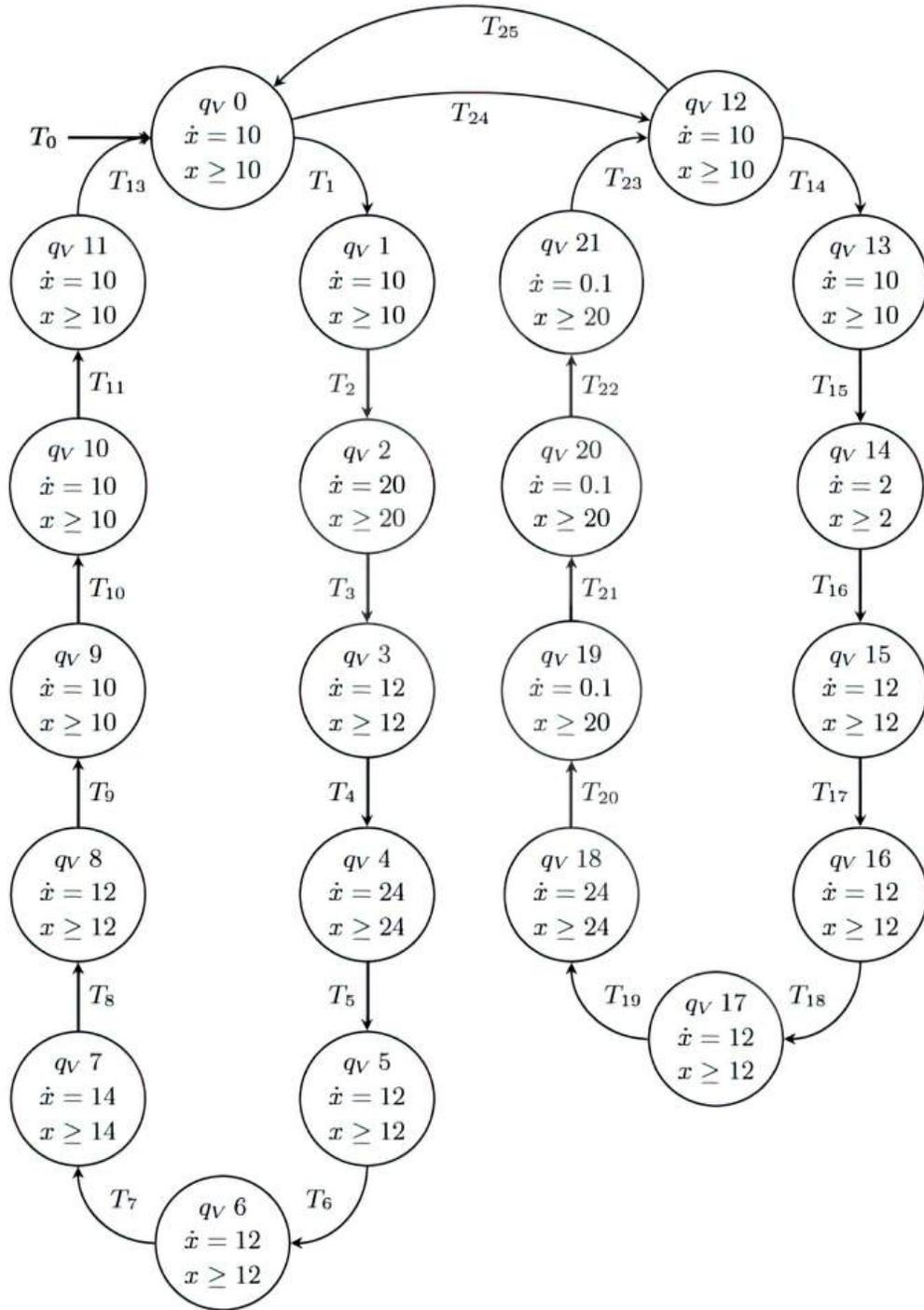


Figura 3.4: Autómata híbrido virtual.

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

3.4. Implementación del Sistema Ciberfísico

Dentro de la industria, el diseño de sistemas basado en ingeniería se ha caracterizado por separar el sistema de control de las características de construcción del hardware y software. Una vez completado el control del sistema, se suele realizar una simulación completa para verificar el funcionamiento óptimo y corregir la incertidumbre en el modelo, así como perturbaciones externas no consideradas en el modelo.

Una característica importante de los sistemas industriales es su creciente complejidad debido al uso de tecnologías avanzadas para instrumentación, comunicación y procesamiento de información multinivel, lo que plantea un desafío importante para diseñar y construir sistemas de fabricación industrial de futura generación.

En el diseño y construcción de sistemas ciberfísicos se necesita una nueva metodología que conduzca a una integración confiable y óptima de los elementos del sistema que fueron diseñados de forma independiente.

El sistema propuesto se puede implementar para pruebas con un controlador lógico programable (PLC) y una interfaz hombre-máquina (HMI). Para simular el proceso se utiliza un entorno gráfico que reproduce el funcionamiento del sistema de almacenamiento automático, Figura 3.5. El sistema digital se implementa sobre un soft plc codesys que incorpora el gemelo digital y las funciones de diagnóstico en línea basadas en la red compleja.

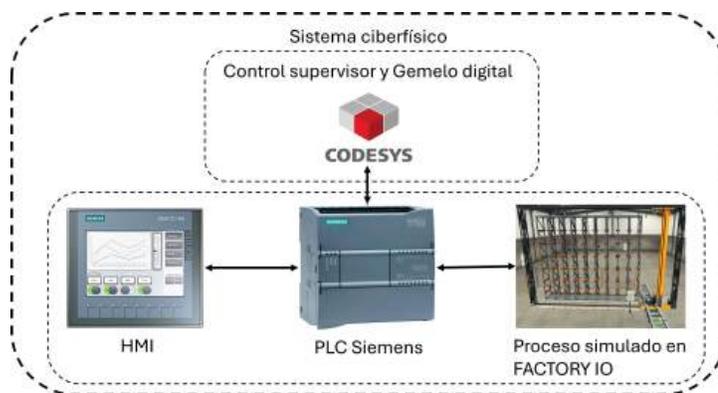


Figura 3.5: Implementacion de sistema ciberfísico de almacén.

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

3.5. Red Compleja de Almacén Automático

Se presenta una red compleja de un modelo de almacén automático. Los elementos del sistema de almacenamiento que se consideran para realizar la construcción de la red compleja son transductores y actuadores como pulsadores, contactores, motores y PLCs, y se consideran como nodos (Figura 3.6). Los enlaces se interpretan como las relaciones entre los elementos y representan la conexión eléctrica entre los nodos de la red (Tabla 3.2 muestra las asignaciones de los puertos de entrada y salida).

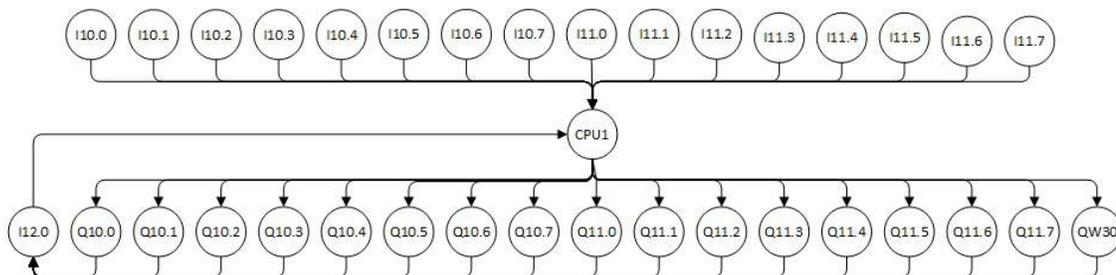


Figura 3.6: Red compleja del sistema físico.

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

Tabla 3.2: Denominación de entradas y salidas

Entrada	Nombre	Salida	Nombre	Entrada	Nombre	Salida	Nombre
I10.0	Boton Arranque L	Q10.0	Arranque (Indicador)	I11.0	Sensor mov X	Q11.0	Cuchillas derecha
I10.1	Boton paro L	Q10.1	Arranque L (Indicador)	I11.1	Sensor mov Z	Q11.1	S. Horquillas izquierda
I10.2	Boton reset L	Q10.2	Indicador paro L (Light)	I11.2	Paro de Emergencia	Q11.2	Horquillas arriba
I10.3	Sensor banda transportadora 1L	Q10.3	Indicador Paro	I11.3	Boton paro D	Q11.3	Indicador Arranque D
I10.4	Sensor banda transportadora 2L	Q10.4	Indicador reset L	I11.4	Boton de Paro D	Q11.4	Indicador stop D
I10.5	Sensor horquillas derecha	Q10.5	Indicador Reset	I11.5	Boton Reset D	Q11.5	Indicador reset D (Light)
I10.6	Sensor horquilla en medio	Q10.6	Banda transportadora 1L	I11.6	Sensor banda transportadora 1D	Q11.6	Banda transportadora 1D
I10.7	Sensor horquilla izquierda	Q10.7	Banda transportadora 2L	I11.7	Sensor banda transportadora 2D	Q11.7	Banda transportadora 2D
				I12.0	Sensor corriente	QW30	Posición objetivo

3.5.1. Construcción de matriz de adyacencia

La red construida a partir del sistema físico (Figura 3.6) se caracteriza porque es dirigida y se puede construir la matriz de adyacencia. En esta matriz Figura 3.6, se coloca un número “1” para cada nodo que tiene un enlace dirigido a otro nodo. Debido a que hay nodos que no están conectados entre sí, solo se muestran las filas de la matriz de adyacencia que tienen información sobre las conexiones; la interpretación de nodo/fila “I2.0” es que para cada salida activada (amarillo sin procesar), la corriente consumida se medirá y se basará en el valor actual, y el estado de los autómatas híbridos crea una equivalencia de las salidas activadas y se envía al pcl/fila (azul) en la Figura 3.7.

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

	Inputs														Output																				
	I0.0	I0.1	I0.2	I0.3	I0.4	I0.5	I0.6	I0.7	I1.0	I1.2	I1.3	I1.4	I1.5	I1.6	I1.7	I2.0	PLC	Q0.0	Q0.1	Q0.2	Q0.3	Q0.4	Q0.5	Q0.6	Q0.7	Q1.0	Q1.1	Q1.2	Q1.3	Q1.4	Q1.5	Q1.6	Q1.7	QW30	
I2.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
PLC	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 3.7: Matriz de adyacencia.

A partir de la matriz de adyacencia (ver matriz completa en el Apéndice A), se observa que, debido a que la red es del tipo dirigido, solo cambiarán las filas de I2.0 y PLC, siempre que se disponga de información para determinar el funcionamiento óptimo del sistema.

3.6. Modelos de Datos y Ecuaciones

3.6.1. Modelo de datos digital

El modelo del sistema se basa en la monitorización y comparación de los datos obtenidos del comportamiento del sistema físico y los datos obtenidos del comportamiento ideal del sistema virtual. La matriz de adyacencia se compone de filas de datos que representan información de activación/desactivación de los sensores y actuadores; por lo tanto, la misma información se puede representar con un conjunto de vectores. Para las entradas físicas, se define una matriz de entradas binarias o digitales físicas ED_{SF_k} , donde cada lugar representa el valor de Entradas físicas Ef_k con las correspondientes direcciones físicas del PLC. El entorno virtual simula el comportamiento del sistema físico, y hay una matriz correspondiente ED_{SV_k} del binario virtual con entradas para sensores simulados EV_k , como se muestra a continuación:

$$ED_{Ef_k} = [Ef_{I0,0}, Ef_{I0,1}, Ef_{I0,2}, Ef_{I0,3}, Ef_{I0,4}, Ef_{I0,5}, Ef_{I0,6}, Ef_{I0,7}, Ef_{I1,0}, Ef_{I1,1}, Ef_{I1,2}, Ef_{I1,3}, Ef_{I1,4}, Ef_{I1,5}, Ef_{I1,6}, Ef_{I1,7}] \quad (3.3)$$

$$ED_{EV_k} = [Ev_{I0,0}, Ev_{I0,1}, Ev_{I0,2}, Ev_{I0,3}, Ev_{I0,4}, Ev_{I0,5}, Ev_{I0,6}, Ev_{I0,7}, Ev_{I1,0}, Ev_{I1,1}, Ev_{I1,2}, Ev_{I1,3}, Ev_{I1,4}, Ev_{I1,5}, Ev_{I1,6}, Ev_{I1,7}] \quad (3.4)$$

Como se observa en la matriz de adyacencia (Apéndice A)), solo una columna (azul fuerte) proporciona información sobre los actuadores que se han activado mostrando un valor de "1" cuando el controlador los ha activado. El algoritmo

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

contiene la información de las salidas activadas por medio de una disposición de filas (fila gris). Esta disposición de los elementos de salida se puede representar como un vector. Para la salida física, se define una matriz de salidas binarias físicas SD_{SF_k} , donde cada lugar representa el valor de diferentes salidas Sf con las correspondientes direcciones físicas del PLC. Para el sistema virtual, hay una matriz correspondiente SD_{SV_k} de salidas binarias virtuales para salidas simuladas Sv , como se indica a continuación:

$$SD_{Sf_k} = [Sf_{Q0,0}, Sf_{Q0,1}, Sf_{Q0,2}, Sf_{Q0,3}, Sf_{Q0,4}, Sf_{Q0,5}, Sf_{Q0,6}, Sf_{Q0,7}, Sf_{Q1,0}, Sf_{Q1,1}, Sf_{Q1,2}, Sf_{Q1,3}, Sf_{Q1,4}, Sf_{Q1,5}, Sf_{Q1,6}, Sf_{Q1,7}, Sf_{Qw0}] \quad (3.5)$$

$$SD_{Sv_k} = [Sv_{Q0,0}, Sv_{Q0,1}, Sv_{Q0,2}, Sv_{Q0,3}, Sv_{Q0,4}, Sv_{Q0,5}, Sv_{Q0,6}, Sv_{Q0,7}, Sv_{Q1,0}, Sv_{Q1,1}, Sv_{Q1,2}, Sv_{Q1,3}, Sv_{Q1,4}, Sv_{Q1,5}, Sv_{Q1,6}, Sv_{Q1,7}, Sv_{Qw0}] \quad (3.6)$$

3.6.2. Modelo de datos analógico

El modelo también tiene en cuenta vectores para almacenar datos de entradas y salidas analógicas conectadas a sensores y actuadores físicos. Se muestra el valor de la corriente consumida por cada sensor o actuador. Por lo tanto, los vectores EA_{SF_k} y EA_{SV_k} representan los valores de las entradas físicas analógicas EA_f y las entradas virtuales analógicas EA_V , de la siguiente manera:

$$EA_{SF_k} = [EA_{fI0,0}, EA_{fI0,1}, EA_{fI0,2}, EA_{fI0,3}, EA_{fI0,4}, EA_{fI0,5}, EA_{fI0,6}, EA_{fI0,7}, EA_{fI2,0}, EA_{fI1,0}, EA_{fI1,0}, EA_{fI1,0}, EA_{fI1,0}, EA_{fI1,0}, EA_{fI1,0}, EA_{fI1,0}, EA_{fI1,0}, EA_{fI2,0}] \quad (3.7)$$

$$EA_{SV_k} = [EA_{vI0,0}, EA_{vI0,1}, EA_{vI0,2}, EA_{vI0,3}, EA_{vI0,4}, EA_{vI0,5}, EA_{vI0,6}, EA_{vI0,7}, EA_{vI2,0}, EA_{vI1,0}, EA_{vI1,0}, EA_{vI1,0}, EA_{vI1,0}, EA_{vI1,0}, EA_{vI1,0}, EA_{vI1,0}, EA_{vI1,0}, EA_{vI2,0}] \quad (3.8)$$

La función del sensor I2.0 es proporcionar una medida de la corriente consumida por todos los actuadores activados.

Los SA_{FS_k} y SA_{VS_k} representan los vectores de las salidas físicas analógicas SA_F y las salidas virtuales analógicas SA_V , como se indica a continuación:

$$SA_{SF_k} = [SA_{fQ0,0}, SA_{fQ0,1}, SA_{fQ0,2}, SA_{fQ0,3}, SA_{fQ0,4}, SA_{fQ0,5}, SA_{fQ0,6}, SA_{fQ0,7}, SA_{fQ1,0}, SA_{fQ1,1}, SA_{fQ1,2}, SA_{fQ1,3}, SA_{fQ1,4}, SA_{fQ1,5}, SA_{fQ1,6}, SA_{fQ1,7}, SA_{fQw30}] \quad (3.9)$$

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

$$S_{ASV_k} = [SA_{vQ0,0}, SA_{vQ0,1}, SA_{vQ0,2}, SA_{vQ0,3}, SA_{vQ0,4}, SA_{vQ0,5}, SA_{vQ0,6}, SA_{vQ0,7}, \\ SA_{vQ1,0}, SA_{vQ1,1}, SA_{vQ1,2}, SA_{vQ1,3}, SA_{vQ1,4}, SA_{vQ1,5}, SA_{vQ1,6}, SA_{vQ1,7}, \\ SA_{vQW30}] \quad (3.10)$$

3.7. Funcionamiento del Sistema

En el sistema ciberfísico, el controlador de supervisión propuesto tomará decisiones basadas en la comparación del funcionamiento de los sistemas físicos y virtuales (Fig. 3.8).

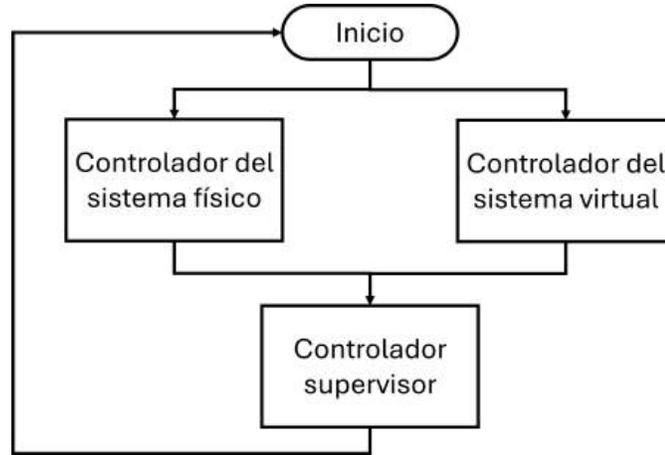


Figura 3.8: Representación en bloques de ejecución del sistema.

3.7.1. Funcionalidad del sistema físico

En esta sección se describe el algoritmo computacional que controla el funcionamiento del sistema físico (Figura 3.8(Controlador del sistema físico) con sus variables digitales, ED_{SF_k} y SD_{SF_k} , y las variables analógicas, EA_{SF_k} y SA_{SF_k} .

La operación de Algoritmo 1, para el sistema físico, asigna valores a los vectores de entrada digital y analógica (ecuaciones (3.9) y (3.13)) así como a los vectores de salida (ecuaciones (3.11) y (3.14)). Si se produce un cambio de estado St_{SF_k} en el sistema físico, las entradas y salidas se miden y se asignan en consecuencia a los vectores de entrada-salida digital y de entrada-salida analógica. Dentro del análisis digital, la diferencia entre el estado actual y el estado anterior

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

se calcula con la Ecuación (3.9) para las entradas digitales EDd_{SF_k} y la Ecuación (3.11) para las salidas digitales SDd_{SF_k} . Las diferencias de entrada y salida se almacenan en sus respectivas ecuaciones de memoria, EDm_{SF_k} (Ecuación (3.10)) o SDm_{SF_k} (Ecuación (3.12)). En cuanto al análisis analógico, consiste en filtrar $(1 - \alpha)$ las corrientes de entrada y salida y almacenar sus valores en una memoria de entrada analógica, EAm_{SF_k} , dada por (Ecuación (3.13)), y una memoria de salida analógica, SAm_{SF_k} , de acuerdo con (Ecuación (3.14)), respectivamente.

Algorithm 1 Desarrollo del sistema físico digital y analógico:

Data: $ED_{SF_k}, SD_{SF_k}, EA_{SF_k}, SA_{SF_k}$

Result: $EDm_{SF_k}, SDm_{SF_k}, EAm_{SF_k}, SAm_{SF_k}$

if

$$(St_{SF_k} \neq St_{SF_{k-1}})$$

then

(Sistema físico digital):

$$EDd_{SF_k} = |ED_{SF_k} - ED_{SF_{k-1}}| \quad (3.11)$$

$$EDm_{SF_k} = EDm_{SF_{k-1}} + EDd_{SF_k} \quad (3.12)$$

$$SDd_{SF_k} = |SD_{SF_k} - SD_{SF_{k-1}}| \quad (3.13)$$

$$SDm_{SF_k} = SDm_{SF_{k-1}} + SDd_{SF_k} \quad (3.14)$$

(Sistema físico analógico):

$$EAm_{SF_k} = \alpha EAm_{SF_{k-1}} - (1 - \alpha) EA_{SF_k} \quad (3.15)$$

$$SAm_{SF_k} = \alpha SAm_{SF_{k-1}} - (1 - \alpha) SA_{SF_k} \quad (3.16)$$

end

3.7.2. Funcionalidad del sistema virtual.

En esta sección se explica, con un algoritmo matemático, el funcionamiento del sistema virtual, con sus variables digitales ED_{SV_k} y SD_{SV_k} , y las variables

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

analógicas EA_{SV_k} y SA_{SV_k} que representan la función (Figura 3.8 Controlador del sistema virtual) de la siguiente manera:

El algoritmo 2, para el sistema virtual, es similar al algoritmo del sistema físico, excepto que, en este caso, se realiza la simulación numérica ideal del sistema, lo que ayudará a corroborar el funcionamiento óptimo del sistema físico. Los valores se asignan a los vectores de la entrada virtual digital y la salida virtual digital ED_{SV_k} y SD_{SV_k} . A su vez, a los vectores de entrada virtual y salida virtual analógica se les asigna EA_{SV_k} y SA_{SV_k} . A diferencia del Algoritmo 1, se espera que la señal que se activó en el sistema físico inicie el modelo virtual ideal, por ST_{SF_k} , para replicar el evento en el sistema virtual, basado en el autómata híbrido virtual (Figura 3.4). Se suman los valores digitales y analógicos virtuales de las entradas y salidas. Se realiza un análisis del estado virtual anterior y del estado virtual digital actual con la Ecuación (3.15) para EDd_{SV_k} y la Ecuación (3.17) para SDd_{SV_k} . Estas diferencias de entrada y salida se asignan a $EDmSV_k$ por (3.16) y $SDmSV_k$ por (3.18), respectivamente. La simulación ideal análoga produce los vectores de entrada y salida EAm_{SV_k} y SAm_{SV_k} , que se filtran por α y $(1 - \alpha)$ para producir valores medios almacenados en (3.19) y (3.20), respectivamente, para el análisis del controlador supervisor.

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

Algorithm 2 Desarrollo del sistema virtual digital y analogico:

Data: $DI_{VS_k}, DO_{VS_k}, AI_{VS_k}, AO_{VS_k}$

Result: $DI_{mVS_k}, DO_{mVS_k}, AI_{mVS_k}, AO_{mVS_k}$

if

$$(St_{VS_k} \neq St_{VS_{k-1}})$$

then

(Sistema Virtual Digital):

$$EDd_{SV_k} = |ED_{SV_k} - ED_{SV_{k-1}}| \quad (3.17)$$

$$EDm_{SV_k} = EDm_{SV_{k-1}} + EDd_{SV_k} \quad (3.18)$$

$$SDd_{SV_k} = |SD_{SV_k} - SD_{SV_{k-1}}| \quad (3.19)$$

$$SDm_{SV_k} = SDm_{SV_{k-1}} + SDd_{SV_k} \quad (3.20)$$

(Sistema Virtual Analogico):

$$EAm_{SV_k} = \alpha EAm_{SV_{k-1}} - (1 - \alpha) EA_{SV_k} \quad (3.21)$$

$$SAm_{SV_k} = \alpha SAm_{SV_{k-1}} - (1 - \alpha) SA_{SV_k} \quad (3.22)$$

end

3.8. Evaluación y Diagnóstico de Fallas

Para diagnosticar fallas, los vectores físicos de la memoria de entrada y salida y los vectores virtuales de entrada y salida se comparan continuamente (Figura 3.8(Controlador supervisor)), pero con un tiempo de sincronización, considerando el cambio de estado tanto en el autómata físico como en el autómata virtual, y se implementa Algoritmo 3.

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

Algorithm 3 Desarrollo del control supervisor

Data: $EDm_{SF_k}, EAm_{SF_k}, EDm_{SV_k}, EAm_{SV_k}, SDm_{SF_k}, SAm_{SF_k}, SDm_{SV_k}, EAm_{SF_k}$

Result: $ED_{SF_{Diagnosis}}, SD_{SF_{Diagnosis}}$

```
while ( $St_{SF_k} \& St_{SV_k}$ ) = TRUE do
  if ( $EDm_{SF_k} \neq EDm_{SV_k}$ ) or ( $EAm_{SF_k} \neq EAm_{SV_k}$ ) then
     $ED_{SF_{DF}}$  ;                               /* DF:Diagnóstico de falla en entrada digital */
     $EAS_{F_{DF}}$  ;                               /* DF:Diagnóstico de falla en entrada analógica */
    Stop the System
  else
    if ( $EDm_{SF_k} = EDm_{SV_k}$ ) & ( $EAm_{SF_k} = EAm_{SV_k}$ ) then
       $ED_{SF_{WC}}$  ;                               /* WC:Entrada digital sin falla */
       $EAS_{F_{WC}}$  ;                               /* WC:Entrada analógica sin falla */
      Delay
    end
  end
  if  $SDm_{SF_k} \neq SDm_{SV_k}$  or ( $SAm_{SF_k} \neq SAm_{SV_k}$ ) then
     $SD_{SF_{Diagnosis}}$  ;                          /* DF:Diagnóstico de falla en salida digital */
     $SAS_{F_{Diagnosis}}$  ;                          /* DF:Diagnóstico de falla de salida analógica */
    Stop the System
  else
    if  $SDm_{SF_k} = SDm_{SV_k}$  & ( $EAm_{SF_k} = EAm_{SV_k}$ ) then
       $SD_{SF_{WC}}$  ;                               /* WC:Salida Digital Funcionando */
       $SAS_{F_{WC}}$  ;                               /* WC:Salida Analogica Funcionando */
      Delay
    end
  end
end
```

3.9. Resultados y Discusión

El enfoque presentado de un sistema ciberfísico a nivel de control de supervisión está destinado a la supervisión y el diagnóstico de fallos de hardware y software en un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación, como se muestra en la Figura 3.5. El sistema virtual se implementa mediante una simulación numérica en tiempo real para modelar el comportamiento del sistema

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

físico. Los autómatas híbridos se utilizan para diseñar las funciones de control del controlador físico y para facilitar la implementación del controlador virtual. Los sensores y actuadores se definieron como nodos de red complejos, y su activación asíncrona se definió como eventos que afectan a los pesos de los enlaces.

Se coordinaron la compleja red y los autómatas híbridos tanto para el gemelo digital como para el sistema físico. Cada vez que el controlador físico activa un actuador o lee un sensor, los vectores de datos guardan la información y se comparan con los vectores de datos correspondientes en el controlador virtual. Para detectar fallas en los componentes de hardware, se comparan matrices de adyacencia, y para detectar fallos en la ejecución de la lógica secuencial, se comparan los estados actuales. La simulación e implementación del sistema presenta un problema de sincronización entre los sistemas físicos y virtuales. Este problema se resolvió teniendo en cuenta el tiempo de retraso entre la transferencia de datos y el cambio en el estado físico y el estado virtual.

La Figura 3.8 muestra la ejecución del sistema físico y el sistema virtual. La ejecución del sistema ciberfísico contempla que tanto el sistema físico como el virtual se ejecuten en paralelo es decir que los autómatas híbridos virtuales y físicos cambian al mismo tiempo con un tiempo específico de sincronización. En la Figura 3.9, se pueden observar la ejecución de los autómatas (virtual y físico) así como la activación de entradas y salidas digitales entre 0 y 1. Los algoritmos 1 y 2 respectivamente almacenan los valores de datos del controlador físico y el controlador virtual, mientras que el algoritmo del control supervisor, tiene la configuración para detectar discrepancias de los valores de datos del controlador físico con respecto a los valores de datos del sistema virtual. De esta manera, es posible detectar fallas en sensores, actuadores y en la ejecución de la lógica de control.

Para corroborar el funcionamiento del algoritmo, se examinó la información almacenada presentada en la Figure 3.9. En el caso de que no haya fallas, los vectores de datos son idénticos, y en el caso de que los datos no sean iguales, existen fallas. La Figura 3.10 muestra la diferencia en los vectores de datos con rectángulos rojos para indicar fallas y los rectángulos verdes para indicar que los elementos funcionan correctamente.

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

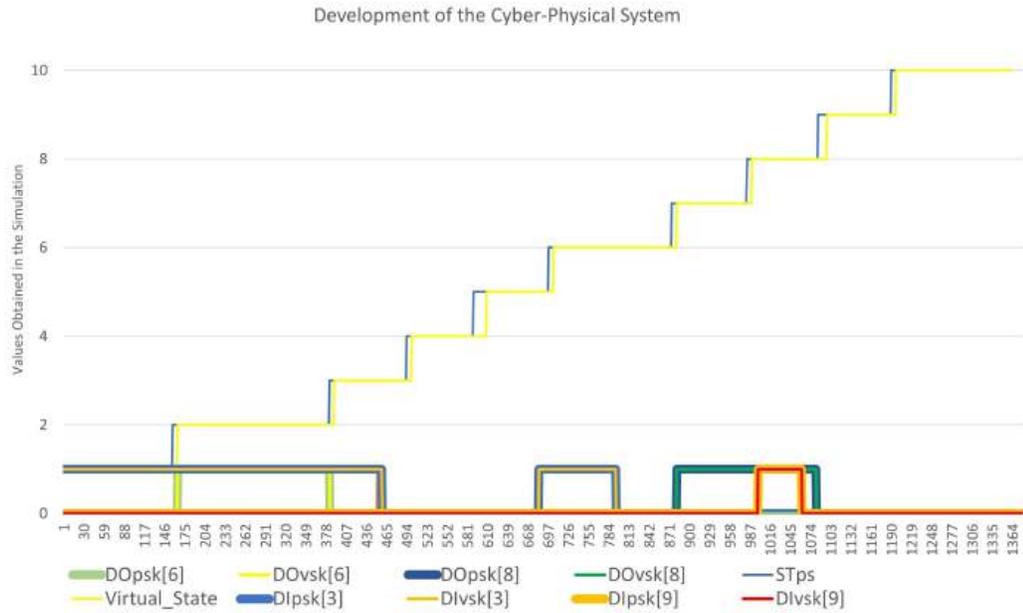


Figura 3.9: Desarrollo del sistema ciberfísico.

DÓmpsk1		DÓmvsk1		DÍmpsk1		DÍmvsk1	
DÓmpsk1[0]	0	DÓmvsk1[0]	0	DÍmpsk1[0]	1	DÍmvsk1[0]	1
DÓmpsk1[1]	0	DÓmvsk1[1]	0	DÍmpsk1[1]	2	DÍmvsk1[1]	2
DÓmpsk1[2]	0	DÓmvsk1[2]	0	DÍmpsk1[2]	0	DÍmvsk1[2]	1
DÓmpsk1[3]	0	DÓmvsk1[3]	0	DÍmpsk1[3]	0	DÍmvsk1[3]	2
DÓmpsk1[4]	0	DÓmvsk1[4]	0	DÍmpsk1[4]	0	DÍmvsk1[4]	1
DÓmpsk1[5]	0	DÓmvsk1[5]	0	DÍmpsk1[5]	0	DÍmvsk1[5]	1
DÓmpsk1[6]	0	DÓmvsk1[6]	1	DÍmpsk1[6]	0	DÍmvsk1[6]	1
DÓmpsk1[7]	0	DÓmvsk1[7]	1	DÍmpsk1[7]	0	DÍmvsk1[7]	1
DÓmpsk1[8]	0	DÓmvsk1[8]	0	DÍmpsk1[8]	0	DÍmvsk1[8]	1
DÓmpsk1[9]	0	DÓmvsk1[9]	1	DÍmpsk1[9]	0	DÍmvsk1[9]	1
DÓmpsk1[10]	0	DÓmvsk1[10]	1	DÍmpsk1[10]	0	DÍmvsk1[10]	1
DÓmpsk1[11]	0	DÓmvsk1[11]	0	DÍmpsk1[11]	0	DÍmvsk1[11]	1
DÓmpsk1[12]	0	DÓmvsk1[12]	0	DÍmpsk1[12]	1	DÍmvsk1[12]	1
DÓmpsk1[13]	0	DÓmvsk1[13]	0	DÍmpsk1[13]	0	DÍmvsk1[13]	1
DÓmpsk1[14]	0	DÓmvsk1[14]	0	DÍmpsk1[14]	0	DÍmvsk1[14]	1
DÓmpsk1[15]	0	DÓmvsk1[15]	0	DÍmpsk1[15]	0	DÍmvsk1[15]	1
DÓmpsk1[16]	1	DÓmvsk1[16]	1	DÍmpsk1[16]	0	DÍmvsk1[16]	1

Figura 3.10: Diagnóstico de fallas.

Por último de los datos obtenidos de la simulación mostrados en la Figura 3.9 , se diseñó un Human Machine Interface (HMI) con el fin de mostrar la localización de múltiples fallas al operador como se observa en la Figura 3.11 se muestra un panel de operador con indicadores para mostrar los elementos que presentan una falla.

Con el fin de evaluar la eficiencia del sistema, se evaluaron cuatro casos diferentes (fila representa el número de simulaciones) de diagnóstico de fallas en

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

diferentes etapas del proceso, y las pruebas se realizaron tanto en la configuración de carga como de descarga del almacén. Se observa que el sistema es capaz de diagnosticar y localizar las fallas inducidas en las entradas y salidas seleccionadas en la Tabla 3.3; en la tercera columna, se selecciona un número específico de fallas inducidas, y se observa que el sistema en la octava columna puede diagnosticar y localizar satisfactoriamente todas las fallas inducidas.

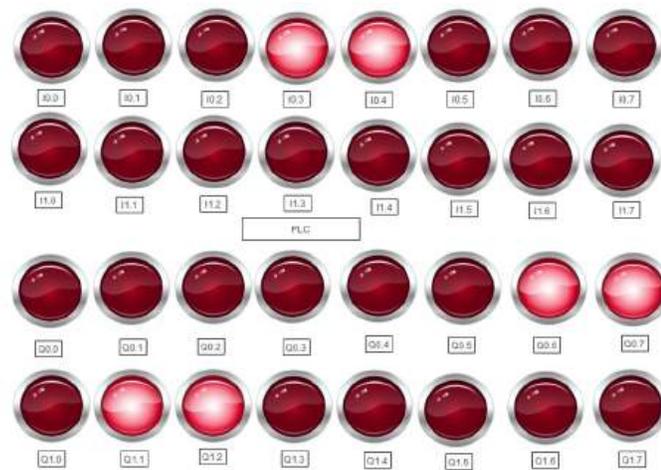


Figura 3.11: Localización de fallas.

El enfoque propuesto para un sistema ciberfísico básico se compone de un gemelo virtual que simula el proceso del sistema físico. El gemelo virtual ejecutado simultáneamente con el funcionamiento de los sistemas físicos permite una comparación en tiempo real. Cuando el comportamiento de ambos no coincide, se diagnostica un fallo. El enfoque presentado puede extenderse a diversos sistemas de manufactura.

3. DIAGNÓSTICO DE FALLAS

Tabla 3.3: Resultados obtenidos de diagnóstico de fallas

No. Simulación	Estado	Falla Inducida Entrada/Salida	Entrada Vector Físico	Entrada Vector Virtual	Salida Vector físico	Salida Vector Virtual	Detección de Falla
1	$qp3$	I10.4, Q11.4	I10.4 = 0	I10.4 = 1	Q11.4=0	Q11.4=1	I10.4, Q11.4— Correct
2	$qp9$	I10.5, Q11.0	I10.5 = 0	I10.5 = 1	Q11.0=0	Q11.0=1	I10.5, Q11.0— Correct
3	$qp14$	I11.0, I11.1, Q11.4	I11.0 = 0, I11.1 = 0	I11.0 = 1, I11.1 = 1	Q11.4=0	Q11.4=1	I11.0, I11.1, Q11.4— Correct
4	$qp19$	I10.5, Q11.6, Q11.7	I10.5 = 0	I10.5 = 1	Q11.6 = 0, Q11.7 = 0	Q11.6 = 1, Q11.7 = 1	I10.5, Q11.6, Q11.7— Correct

4

ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

4.1. Introducción

En este capítulo se propone el diseño e implementación de un sistema ciberfísico controlado mediante el uso de autómatas de estados finitos (FSA) o máquinas de estados finitos (FSM), y se implementa un modelo digital capaz de monitorear los tiempos de los subprocesos y el tiempo total del proceso. Se modelan los sistemas de control de cuatro estaciones de una planta de manufactura de rines, utilizando Autómatas de Estados Finitos lo cual posibilita su programación estructurada en los PLC de cada estación. Se propone implementar funciones que permitan el diagnóstico de desempeño agregando el cálculo en tiempo real de indicadores de desempeño de los subprocesos y los procesos. Como en el capítulo anterior se recurre a la teoría de redes complejas para configurar un modelo de datos que permitan almacenar y coordinar la información de los tiempos y ciclos de ejecución de las estaciones.

4.2. Esquema de CPS para Diagnóstico de Desempeño

En el sistema ciberfísico propuesto, presentado en la Figura 4.1, el componente físico está conformado por un PLC donde se programará la secuencia del proceso presentado en el caso de estudio, así mismo el sistema puede tener una

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

interfaz hombre-máquina (HMI), la cual será omitida para este proceso. El sistema digital consta de tres elementos principales. El gemelo digital se encargará de la estimación del tiempo ideal que debe tomar el proceso físico, y de la sincronización con el sistema físico a través de la comunicación Modbus TCP/IP. El módulo indicador de desempeño evaluará principalmente las características temporales que existen en el proceso físico y el tiempo obtenido por el gemelo digital con la información del módulo del sistema físico, y envía esta información al controlador virtual (CV).

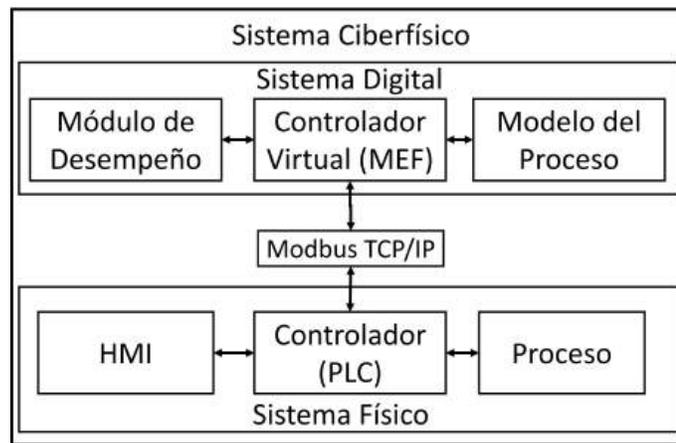


Figura 4.1: Sistema ciberfísico propuesto

4.3. Modelado y Control de Sistema de Manufactura de Rines con Máquina de Estados Finitos

En la presente sección se muestra el funcionamiento y modelado de un sistema de manufactura de rines con máquinas de estados finitos, conformado por cuatro estaciones como se observa en la Figura 4.2 utilizado en (26).

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

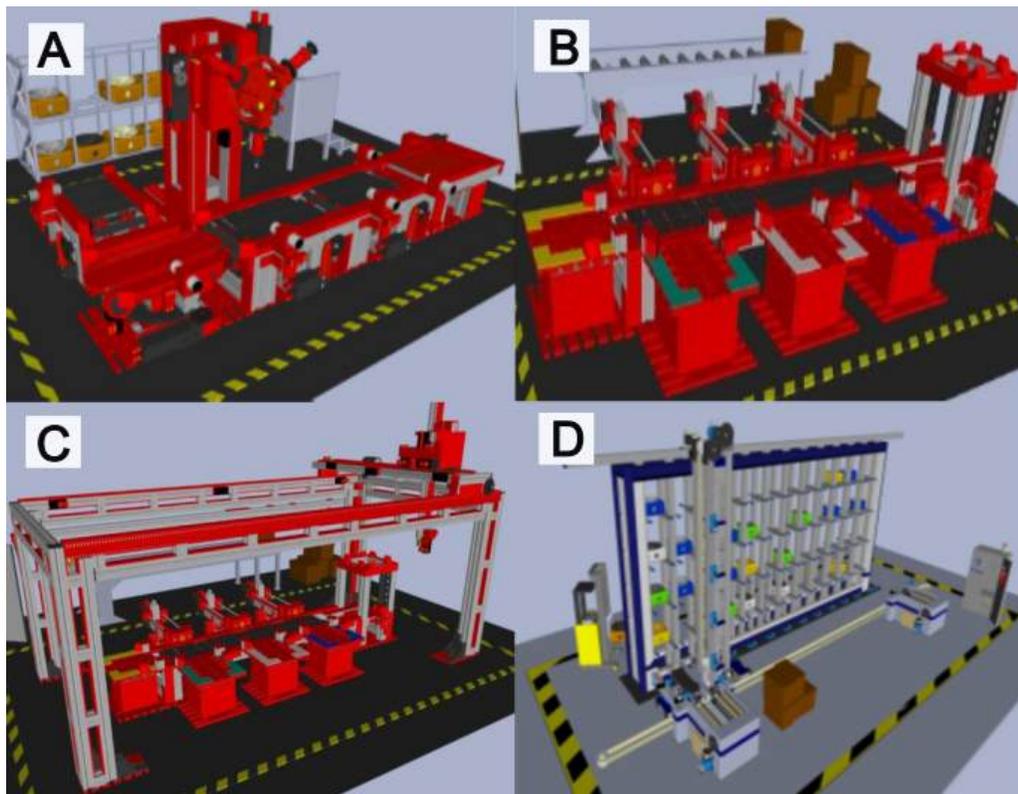


Figura 4.2: A) Estacion de procesamiento, B) Estacion de clasificación, C) Robot cartesiano, D) Estacion de almacenamiento. Figura original (26)

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

4.3.1. Estación de procesamiento

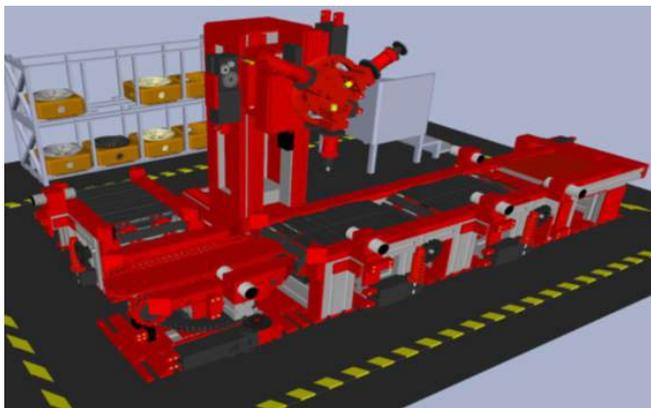


Figura 4.3: Estacion de Procesamiento

En Figura 4.3 se muestra la estación de procesamiento y consta de una máquina herramienta en forma de torreta con tres cabezales, tres bandas transportadoras bidireccionales, una plataforma giratoria con cadena transportadora bidireccional y una mesa de suministros. Cada una de las cintas transportadoras y la plataforma giratoria tienen un sensor de proximidad inductivo para detectar la presencia de piezas de trabajo.

La mesa de suministro Figura 4.4 permite la colocación de una pieza de trabajo, detectado a través de un sensor mecánico (I13.6). Además, la mesa tiene una varilla integrada que puede moverse hacia adelante (Q11.1) para empujar una pieza hacia la banda transportadora o hacia atrás (Q11.0) para volver a la posición inicial. El movimiento de la varilla de empuje está restringido por dos interruptores mecánicos de final de carrera (I11.0, I11.1) para indicar los bordes del mecanismo. Además, para detectar que la pieza de trabajo ha sido empujada con éxito a la primera cinta transportadora, la mesa tiene un sensor de barrera de luz (I11.2).

El sistema cuenta con tres bandas transportadoras Figura 4.5 para completar el transporte de la pieza de trabajo a través de la línea de procesamiento. Las bandas avanzan bidireccionalmente, permitiendo que la pieza se mueva hacia adelante (Q11.2, Q11.4) o hacia atrás (Q11.3, Q11.5, Q13.0) si es necesario. En

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

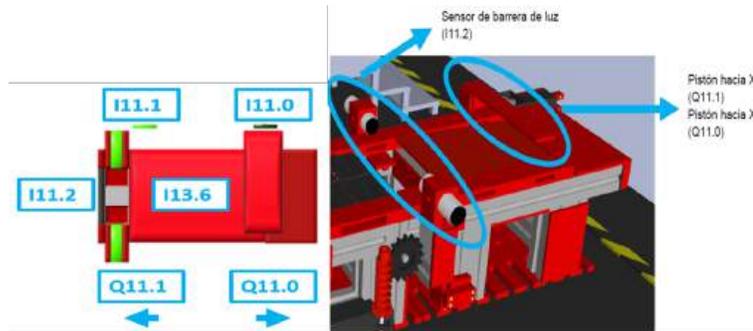


Figura 4.4: Mesa de suministro

medio de cada cinta transportadora hay un sensor de proximidad inductivo (I11.3, I10.0, I11.7) para indicar que la pieza está presente.

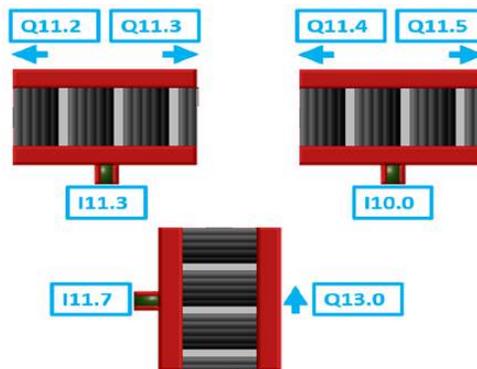


Figura 4.5: Bandas Transportadoras

La máquina herramienta Figura 4.6 simula un proceso de maquinado. La selección de la herramienta de perforación es mediante la activación un motor unidireccional (Q13.1) y la señal de un interruptor mecánico (I10.3) el cual indica que una herramienta se encuentra alineada verticalmente. El movimiento vertical de la herramienta hacia abajo es mediante la activación de (Q11.7) y limitado mediante un interruptor mecánico (I10.2). El movimiento vertical hacia arriba es mediante la activación de (Q11.6) y limitado mediante un interruptor mecánico (I11.5). La activación de la herramienta de perforación es mediante (Q13.2).

El motor bidireccional acciona la cadena de la mesa giratoria (Q13.5, Q13.6) Figura 4.7. En medio de la plataforma giratoria un sensor de proximidad inductivo

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

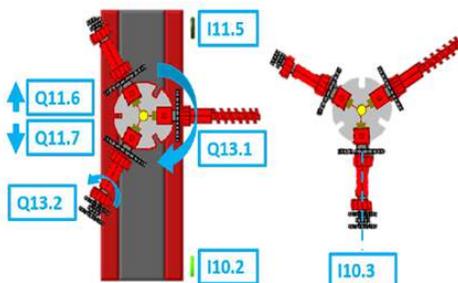


Figura 4.6: Máquina herramienta

(I10.4) detecta cuando la pieza está presente. La rotación de la mesa en sentido de las manecillas del reloj es realizado mediante (Q13.4) y restringida por un interruptor de límite mecánico (I11.6), y la activación de la rotación de la mesa en sentido contrario a las manecillas del reloj es realizado mediante (Q13.3) y restringida por un interruptor de límite mecánico (I11.5).

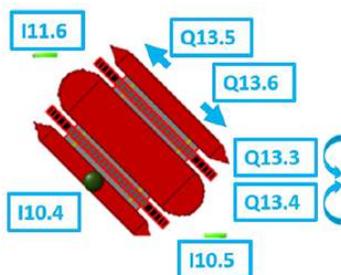


Figura 4.7: Mesa giratoria

4.3.2. Modelado de estación de procesamiento con máquinas de estados finitos

El funcionamiento de la estación de procesamiento que se muestra en la Figura 4.8, contiene un eje que ayuda a introducir las piezas dentro de la máquina activando el motor 1 en dos direcciones: *O1L* (Salida 1 Izquierda) y *O1R* (Salida 1 Derecha). una vez que se ingresa el producto, hay dos bandas transportadoras con un motor individual cada una *O2L* y *O3L* Salida 2 y 3 Izquierda y *O2R* y *O3R* Salida 2 y 3 Derecha, una vez que el producto se coloca debajo del taladro *O7U* Salida 7 Arriba y *O7D* Salida 7 Abajo, *O8* Giro de la herramienta de corte y

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

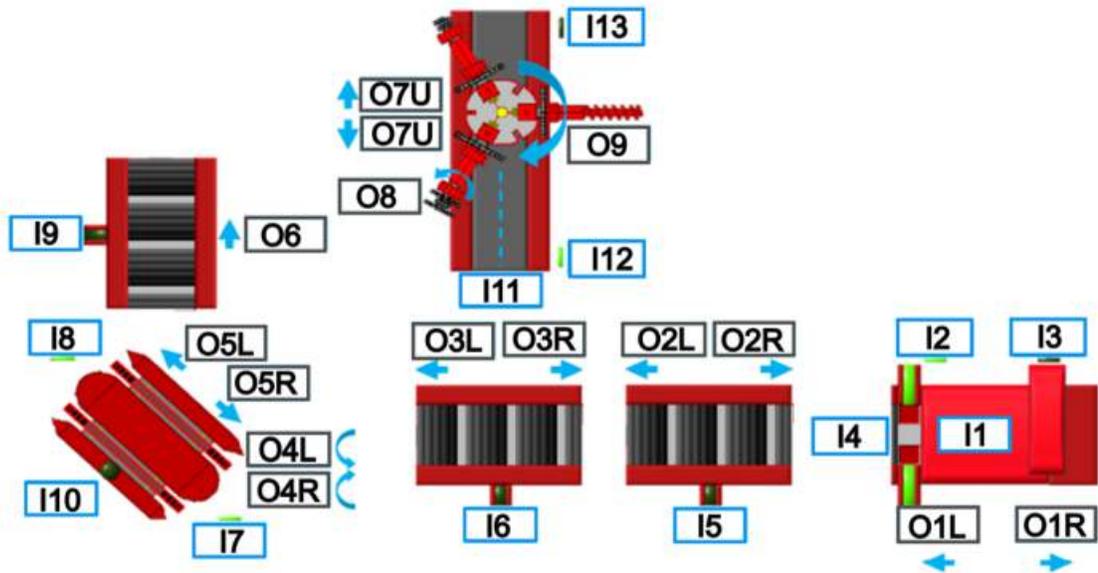


Figura 4.8: Distribución de sensores y actuadores de estación de procesamiento

09 Cambio de pieza de corte realizan su secuencia de perforación. Al final de la secuencia de perforación, el producto es dirigido fuera de la máquina por las siguientes dos bandas transportadoras donde *O4L* Rotación de la mesa a la izquierda y *O4R* Rotación de la mesa a la derecha ayudan a que la cinta giratoria se coloque paralela a la cinta donde se realizó el procesamiento y mueva el producto con *O5L* Salida 5 Izquierda y *O5R* Salida 5 Derecha para girar e iniciar la última ruta del producto con *O4* Salida 4. El sistema se retroalimenta con el $I = Inputs$ en cada cinta y taladro. El funcionamiento de la estación de procesamiento se describe en la Figura 4.9 y en la Tabla 4.1.

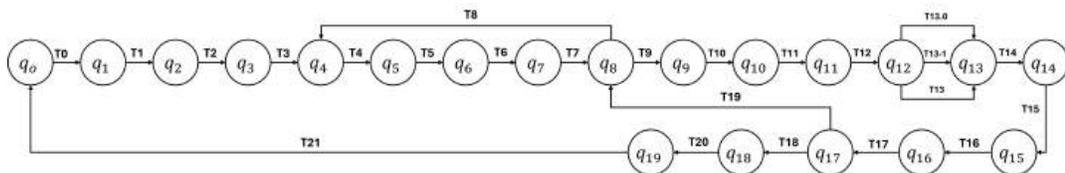


Figura 4.9: Estación de procesamiento FSM.

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

Tabla 4.1: Estados y transiciones de la estación de procesamiento.

Estado Actual	Transicion	Estado siguiente	Estado Actual	Transicion	Estado siguiente
q_0	$T_0 = (Start)$	q_0	q_{10}	$T_{11} = I_{13}$	$q_{11} = O7D \& O8'' 1''$
q_1	$T_1 = (I_1 \& \bar{I}_3)$	$q_2 = O1L'' 1''$	q_{11}	$T_{12} = I_{12}$	$q_{12} = O7D'' 0''$
q_2	$T_2 = (I_4 \& \bar{I}_2)$	$q_3 = O1L'' 0''$	q_{12}	$T_{13} = Del = 5, 3, 1 \& C = 1, 2, 3$	$q_{13} = O8'' 0'' \& O7D'' 1'' =$
q_3	$T_3 = (\bar{I}_4 \& \bar{I}_5)$	$q_4 = O2L'' 1''$	q_{13}	$T_{13} = I_{13}$	$q_{14} = O7D'' 0''$
q_4	$T_4 = I_5$	$q_5 = O2L'' 0''$	q_{14}	$T_{15} = \bar{I}_7$	$q_{15} = O4L'' 1''$
q_5	$T_5 = (\bar{I}_6 \& I_5)$	$q_6 = O2L \& O3L'' 1''$	q_{15}	$T_{16} = I_7$	$q_{16} = O4L'' 0''$
q_6	$T_6 = I_6$	$q_7 = O2L \& O3L'' 0''$	q_{16}	$T_{17} = \bar{I}_{13} \& I_6$	$q_{17} = O3L \& O5L'' 1''$
q_7	$T_7 = \bar{I}_5$	$q_8 = O1R'' 1''$	q_{17}	$T_{18} = I_{10}$	$q_{18} = O3L \& O5L'' 0'' \& O4R'' 1'' =$
q_8	$T_8 = I_3$	$q_8 = O1R'' 0''$	q_{17}	$I_{10} \& C = 1, 2, 3$	q_8
q_8	$T_9 = I_6 \& Del = 1s$	$q_9 = O9'' 1''$	q_{18}	$T_{20} = \bar{I}_8$	$q_{19} = O5L \& O6'' 1'' \& O4R'' 0'' =$
q_9	$T_{10} = I_{11}$	$q_{10} = O9'' 0''$	q_{19}	$T_{21} = \bar{I}_9 \& Del = 2s$	$q_0 = O5L \& O6'' 0''$

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

4.3.3. Estación de clasificación

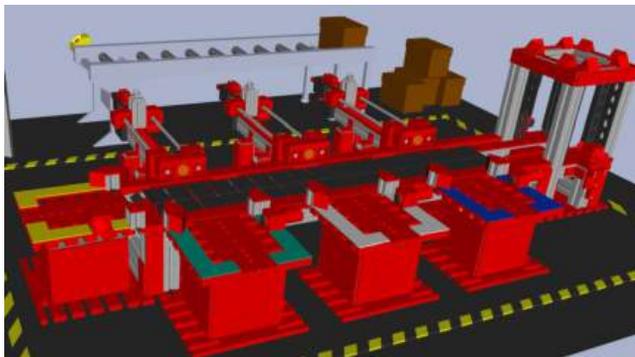


Figura 4.10: Estación de clasificación

El modelo de Línea de Clasificación, como se observa en la Figura 4.10, está integrado por una torre de almacenamiento que tiene una cadena transportadora que, a su vez, se comunica con una banda transportadora, ambas operadas eléctricamente por un sistema de engranajes. La línea tiene tres pistones electro-mecánicos y cuatro mesas de descarga, cada una con un sensor de reflexión de luz para identificar que la pieza ha llegado a su destino.

El registro o almacenamiento de piezas de trabajo Figura 4.11 tiene un sensor de barrera de luz integrado (I10.5) que permite detectar si se encuentra alguna pieza en el almacén. También tiene una cadena transportadora que se activa mediante un motor unidireccional (Q11.0) y es monitoreada por un interruptor de activación magnética (I13.6) que detecta un imán acoplado a la cadena, esto para poder controlar su movimiento y así extraer solo una pieza a la vez.

Adicionalmente, a la salida de la torre de almacenamiento se encuentran colocados los sensores de identificación de piezas (I10.3, I10.4), los cuales son dos interruptores de activación magnética y donde, en función de la ubicación de los pequeños imanes colocados en la parte inferior de las piezas, se puede identificar el código correspondiente a cada una de ellas. Cada pieza tiene un número diferente de imanes. Rin Azul 1 imán, rin blanco 2 imanes, rin verde 3 imanes, rin amarillo 4 imanes.

La Banda transportadora Figura 4.12 consiste en una banda hecha con eslabones y acoplada a un motor unidireccional para controlar su movimiento. Los

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

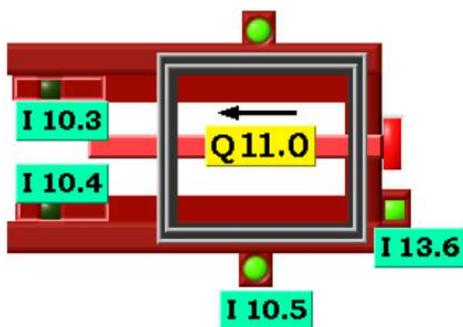


Figura 4.11: Almacén y distribución de rines

eslabones tienen una superficie rugosa, lo que genera más estabilidad cuando las piezas se mueven y, a su vez, evita que las piezas salgan de la cinta transportadora. El actuador responsable del movimiento de la banda es un motor unidireccional, cuya salida es Q11.1.

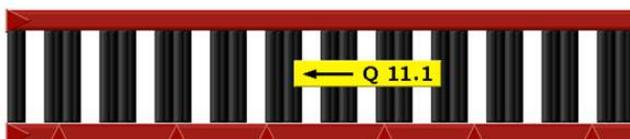


Figura 4.12: Banda transportadora

El mecanismo de descarga Figura 4.13 está integrado por un pistón eléctrico que cuenta con un sensor de proximidad inductivo en su parte frontal, el cual detecta si hay alguna pieza frente al pistón. Según la programación, una vez que se detecta una pieza delante del pistón, el motor bidireccional puede activarse, lo que corresponde a dos señales de salida del PLC que controlan el apagado y encendido de dos relevadores, responsables de la dirección del actuador. Ambas señales deben programarse de tal manera que no se envíen al mismo tiempo, ya que esto causaría un error en la programación y, por lo tanto, un accidente con el equipo. Otros componentes integrados al mecanismo de descarga son dos interruptores mecánicos, que definen el final de la carrera del pistón en ambas direcciones. La operación descrita anteriormente es la misma para los tres pistones del modelo.

Las estaciones de descarga son cuatro mesas Figura 4.14 donde se clasifican las piezas. En cada estación hay un sensor de reflexión de luz que detecta la presencia

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

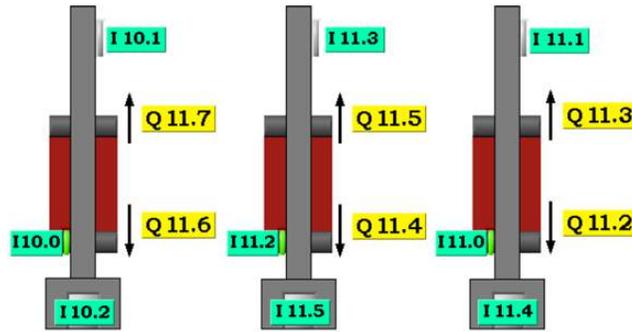


Figura 4.13: Sistema de descarga

de una pieza en la mesa correspondiente. Existe la opción de que aparezcan piezas en las mesas en el modelo 3D, de modo que el sensor en las mesas se active.

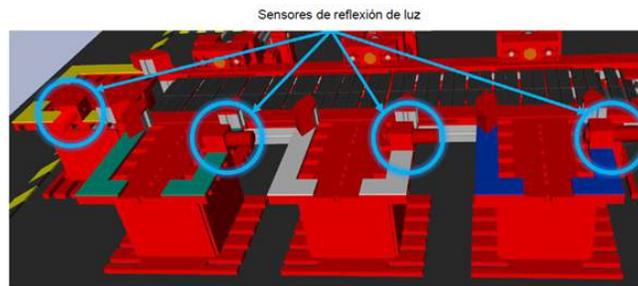


Figura 4.14: Mesas de descarga

4.3.4. Modelado de estación de clasificación con máquinas de estados finitos

El propósito de la estación de clasificación que se muestra en la Figura 4.15(B), es mover los rines previamente procesados a su lugar correspondiente para pasar a la siguiente etapa del proceso. Para lograr la clasificación de los productos en función de su color, el sistema activa la cadena $O1$. Una vez que se detecta el color del proceso, se enciende la cinta transportadora $O2$, que gira solo en una dirección. La señal de correa $O2$ se detendrá solo para las ruedas azules, blancas y verdes frente al actuador lineal correspondiente en las posiciones detectadas por las entradas $I5$, $I6$ y $I7$, respectivamente. Los actuadores lineales se activarán con $O3D$, $O4D$ y $O5D$, según sea necesario, para moverse hacia abajo y empujar

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

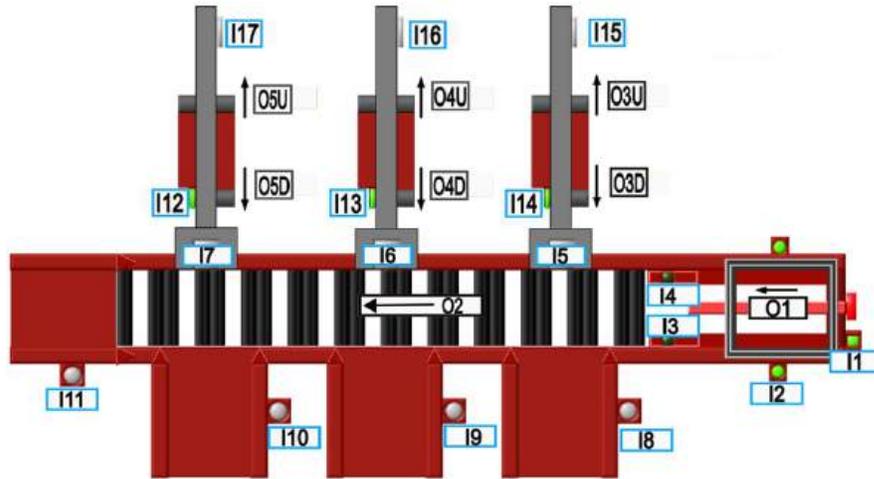


Figura 4.15: Distribucion de sensores y actuadores de estación de clasificación

los productos a las posiciones detectadas por I_{10} , I_{9} y I_{8} para cada tipo de rueda. Después de colocar los productos, los actuadores lineales correspondientes se mueven hacia arriba con señales O_{3U} , O_{4U} y O_{5U} , finalizando la secuencia de clasificación de ruedas azules, blancas y verdes. El funcionamiento de la máquina de procesamiento se representa en la Figura 4.16 y se describe en Tabla 4.2.

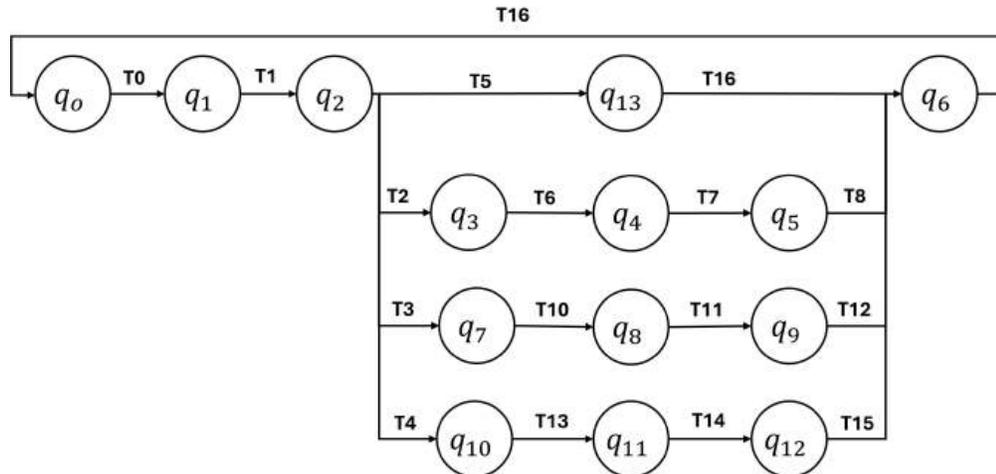


Figura 4.16: Estación de clasificación FSM.

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

Tabla 4.2: Estados y transiciones de la estación de clasificación FSM.

Estado Actual	Transicion	Estado siguiente	Estado actual	Transicion	Estado siguiente
q_0	$T0 = (Start)$	q_1	q_6	$T9 = Del = 0,5s$	q_0
q_1	$T1 = I2$	$q_2 = O1''1''$	q_7	$T10 = I6$	$q_8 = O2''0'' \& O4D''1''$
q_2	$T2 = I4 = 0 \& I3 = 1$	$q_3 = O2''1''$	q_8	$T11 = \bar{I}13$	$q_9 = O4D''0'' \& O4U''1''$
q_2	$T3 = I4 = 1 \& I3 = 1$	$q_7 = O2''1''$	q_9	$T12 = I16$	$q_6 = O4U''0''$
q_2	$T4 = I4 = 1 \& I3 = 2$	$q_{10} = O2''1''$	q_{10}	$T13 = I7$	$q_{11} = O2''0'' \& O5D''1''$
q_2	$T5 = I4 = 2 \& I3 = 2$	$q_{13} = O2''1''$	q_{11}	$T14 = \bar{I}12$	$q_{12} = O5D''0'' \& O5U''1''$
q_3	$T6 = I5$	$q_4 = O2''0'' \& O3D''1''$	q_{12}	$T15 = I17$	$q_6 = O5U''0''$
q_4	$T7 = \bar{I}14$	$q_5 = O3D''0'' \& O3U''1''$	q_{13}	$T16 = I11 \& Del = 1s$	$q_6 = O2''0''$
q_5	$T8 = I15$	$q_6 = O3U''0''$			

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

4.3.5. Robot cartesiano

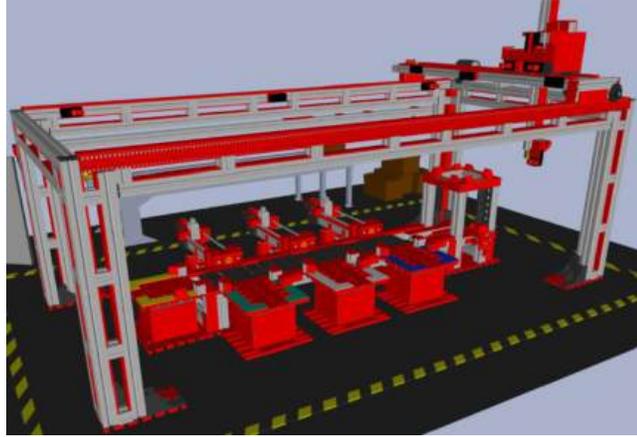


Figura 4.17: Robot cartesiano

El modelo del robot cartesiano Figura 4.17 simula un robot de manejo estacionario con un espacio de trabajo ortogonal utilizado para transportar piezas de trabajo desde unidades de procesamiento o clasificación a una estación de carga, tal y como se usa en fábricas automatizadas a gran escala. El modelo consta del robot de coordenadas cartesianas que puede realizar movimientos en tres direcciones lineales (X , Y , Z) y una pinza electromagnética (apta para moverse en la dirección Z), un conjunto de piezas y una estación de descarga. Las posiciones finales de las diversas partes móviles se reconocen mediante interruptores de posición final.

El movimiento del robot en las direcciones X e Y Figura 4.18(A) se realiza mediante dos motores bidireccionales y está limitado por dos interruptores mecánicos en posición final de cada dirección. Los movimientos deben estar restringidos mediante la programación utilizando esos sensores, de lo contrario el robot en el modelo nunca se detendría y saldría del rango de trabajo. Para localizar el robot y conocer la posición a la que debe llegar, se necesita un sistema de coordenadas, que viene dado por las señales generadas por los encoders Figura 4.18(B).

El movimiento en la dirección Z Figura 4.19 se realiza mediante un motor bidireccional controlado por dos señales digitales. A diferencia de los movimientos en la dirección X e Y , el motor en el eje Z no tiene un encoder, sino dos sensores

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

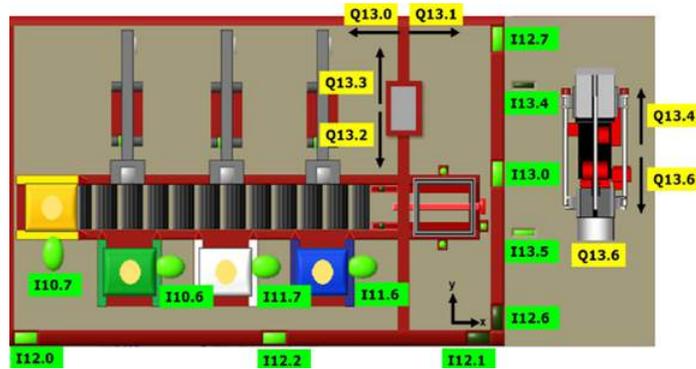


Figura 4.18: Distribución de sensores de posición

mecánicos de posición. El electroimán debe descender solo cuando el robot se encuentra por encima de la coordenada exacta donde se ubica la pieza (para obtener el mejor resultado posible es recomendable tomar la coordenada del centro de la pieza), ya que de lo contrario el robot bajará, pero no tomará la pieza al activar el imán. Una vez que el robot está totalmente abajo, el imán debe activarse para unir la pieza al robot, después debe ir hacia arriba y, una vez que esté en la posición superior, el robot debe comenzar a moverse para llevar la pieza hacia la torre de almacenamiento.

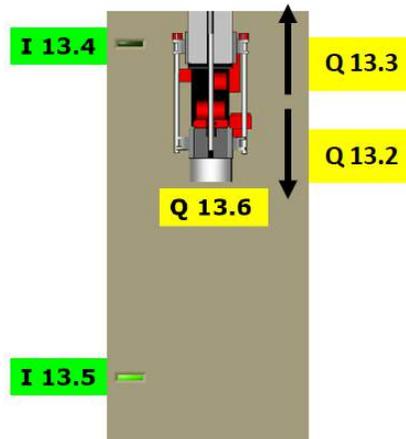


Figura 4.19: Movimiento del robot en el eje Z

El robot cartesiano que se muestra en la Figura 4.2(C) consiste en retirar las piezas de trabajo de las mesas mediante el electroimán para luego trasladarlas y disponerlas en la estación de descarga (torre de almacenamiento). Al inicio de la

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

ejecución, el brazo robótico se traslada a un punto de referencia sobre el plano horizontal para establecer la distancia de los puntos de interés en los ejes X e Y a partir de un punto de referencia fijo. El recorrido de referencia se realiza con el electroimán en su posición superior y llevando el brazo robótico a la posición de referencia, después de esto, el robot está listo para recoger piezas.

Siempre que haya una pieza en cualquier mesa, el brazo robótico se mueve en la dirección X y Y hasta que haya alcanzado la posición exacta sobre la pieza, luego se mueve en la dirección Z negativa hasta que hace contacto con la pieza. Después, el electroimán se activa y la pieza se sujeta al brazo robótico. Posteriormente el brazo se mueve en la dirección Z positiva hasta que alcanza de nuevo su posición superior. Después de esto, ejecuta un movimiento en la dirección X y Y hasta que alcanza la posición por encima de la estación de descarga o torre de almacenamiento. Una vez que se llega a esa posición y para evitar alguna colisión, no se debe bajar el brazo robótico, la pieza simplemente se deja caer desactivando el electroimán. Es de suma importancia que la posición de la pieza por encima de la torre de almacenamiento sea exacta, ya que, en caso contrario, la pieza puede atorarse y no entrar en el almacén. Cuando esto ocurre, la pieza que se estaba trasladando se pierde y el proceso debe hacerse de nuevo. La tolerancia de la pieza con el espacio de la torre de almacenamiento es de 2 milímetros por cada uno de los lados y esto equivale a solo la mitad del pulso del encoder de cuadratura. Por lo que para lograr la precisión necesaria se deben validar las 4 transiciones de los dos canales del encoder de cuadratura. Adicionalmente hay que tomar en cuenta que el brazo robótico tiene cierta inercia y que al irse desplazando después de activar el paro del motor, este se desplazara en la dirección del movimiento alrededor de 4 milímetros que corresponde al ancho de un pulso.

4.3.6. Modelado de robot cartesiano con máquina de estados finitos

El robot cartesiano que se muestra en la Figura 4.20, es una máquina montada en la parte superior de la máquina clasificadora. El robot tiene dos motores bidireccionales para el movimiento en el eje X operados con señales *O2L* para el movimiento a la izquierda y *O2R* para el movimiento a la derecha con los sensores

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

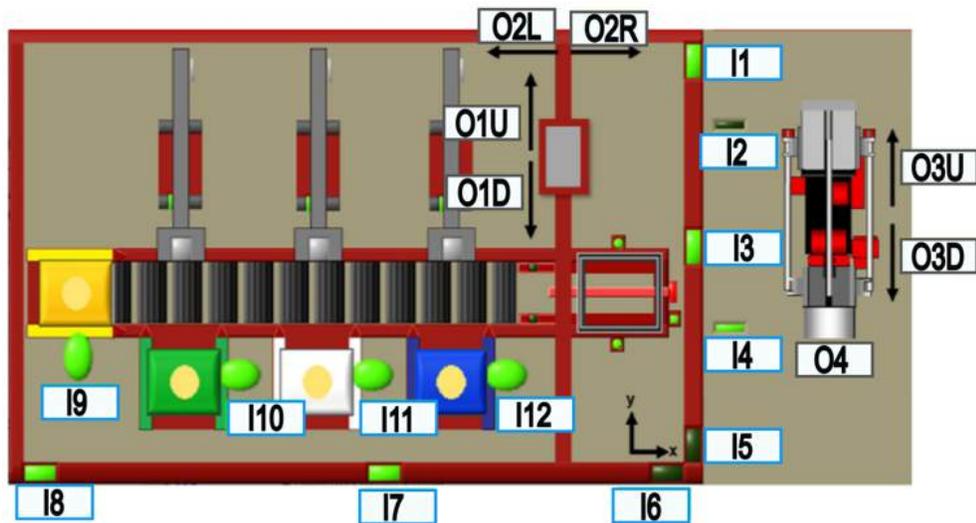


Figura 4.20: Distribución de sensores y actuadores de robot cartesiano

I6, I7, I8 para detectar la posición del robot. El desplazamiento en el eje vertical se realiza con *O1U* para subir y *O1D* para bajar, y los sensores *I1, I3* y *I5* se utilizan para detectar la posición del robot en los puntos superior, medio e inferior. El robot también cuenta con un actuador que puede bajar y subir con *O3D* y *O3U*, y tiene sensores para detectar que el actuador está en la posición inferior *I4* y en la posición superior *I2*. La tarea del robot es tomar la rueda que han sido clasificadas por colores. Los sensores *I9, I10, I11* e *I12* detectan la posición de una rueda. El robot cartesiano se desplaza sobre los ejes X e Y para colocarse delante de la rueda y llevarlo a la siguiente estación. Una vez que el robot está cerca del producto, el actuador se activa hacia abajo y hacia arriba con salidas *O3D* y *O3U*, se activa un electroimán con *O4* para recoger el producto, el robot se mueve en los ejes X e Y para colocar el producto y volver a su posición inicial. El funcionamiento de la máquina de procesamiento se representa en la Figura 4.21 y se describe en la Tabla 4.3.

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

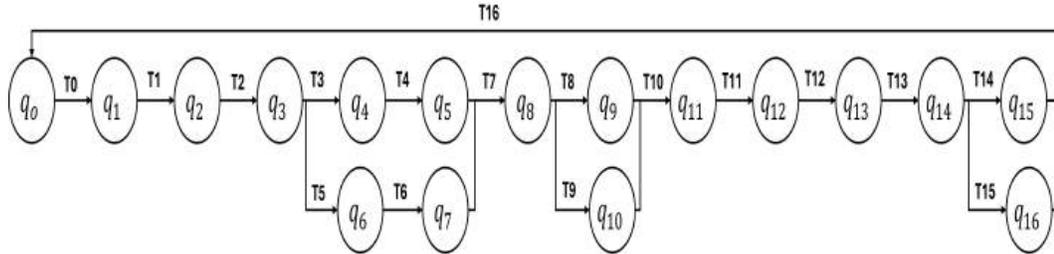


Figura 4.21: Robot cartesiano FSM

Tabla 4.3: Estados y transiciones de robot cartesiano FSM.

Estado actual	Transicion	Estado siguiente	Estado Actual	Transicion	Estado siguiente
q_0	$T_0 = (Start)$	q_1	q_8	$T_9 = C_Y = N_{pulsos}$	$q_{10} = O2L^0 0^0$
q_1	$T_1 = \overline{I_2}$	$q_2 = O3U^0 1^0$	$q_9 \& q_{10}$	$T_{10} = C_Y \& C_X$	$q_{11} = O3D^0 1^0$
q_1	$T_1 = \overline{I_2}$	$q_2 = O3U^0 1^0$	$q_9 \& q_{10}$	$T_{10} = C_Y \& C_X$	$q_{11} = O3D^0 1^0$
q_2	$T_2 = I_2$	$q_3 = O3U^0 0^0$	q_{11}	$T_{11} = I_4$	$q_{12} = O3D^0 0^0 \& O4^0 1^0$
q_3	$T_3 = \overline{I_6}$	$q_4 = O2R^0 1^0$	q_{12}	$T_{12} = I_4$	$q_{13} = O3U^0 1^0$
q_4	$T_4 = I_6$	$q_5 = O2R^0 0^0$	q_{13}	$T_{13} = I_2$	$q_{14} = O2R^0 1^0 \& O1U^0 1^0$
q_3	$T_5 = \overline{I_5}$	$q_6 = O1D^0 1^0$	q_{14}	$T_{14} = C_X = N_{pulsos}$	$q_{15} = O2R^0 0^0$
q_6	$T_6 = I_5$	$q_7 = O1D^0 0^0$	q_{14}	$T_{15} = C_Y = N_{pulsos}$	$q_{16} = O1U^0 0^0$
$q_5 \& q_7$	$T_7 = I_3 O R I_2$	$q_8 = O2L \& O1D^0 1^0$	$q_{15} \& q_{16}$	$T_{16} = C_Y \& C_X$	$q_0 = All^0 0^0$
q_8	$T_8 = C_X = N_{pulsos}$	$q_9 = O2L^0 0^0$			

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

4.3.7. Estación de almacenamiento

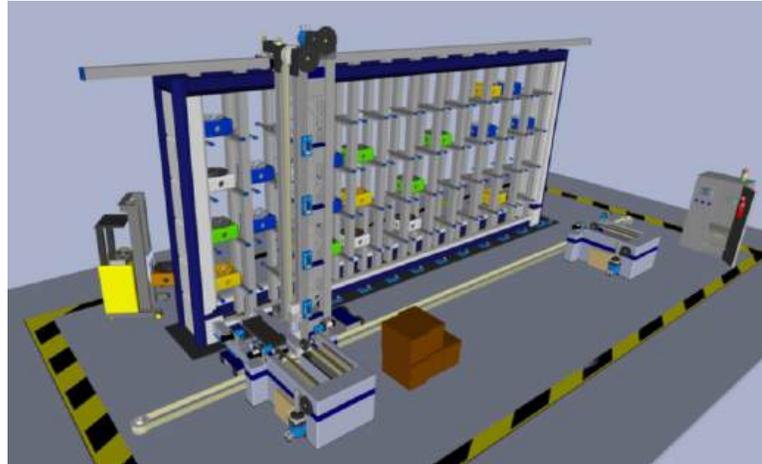


Figura 4.22: Estacion de Almacenamiento

El modelo del Almacén Industrial Figura 4.22 simula un sistema de clasificación y almacenamiento vertical que funciona automáticamente, el cual es utilizado por muchas industrias. El modelo consta de un estante que se divide en 12 columnas y 4 niveles para almacenar las piezas, dos estaciones de carga/descarga y un elevador industrial. Cabe recalcar que, además de moverse en la dirección Z, el elevador industrial puede desplazarse en la dirección X para ubicarse en cada columna, además de contar con una plataforma con la capacidad de moverse en dirección Y, esto para la carga y descarga de las piezas.

La estación de carga Figura 4.23 consiste en una pequeña cadena que jala las piezas de las estaciones de procesamiento (otro proceso) hacia el almacén industrial. En la máquina de realidad virtual, una nueva pieza va siendo colocada aquí (cuando el usuario da clic en la estación en la ventana de la interfaz de operación una nueva pieza aparece) y se detecta por un sensor de barrera de luz (I3.0) para ser tomada. La estación de descarga es exactamente lo mismo, haciendo uso de su sensor para dejar las piezas del almacén (I3.1). En la máquina de realidad virtual las plataformas no cuentan con actuadores.

El elevador industrial es el principal elemento activo del modelo, ya que se encarga de tomar las piezas y colocarlas en otro lugar. El elevador tiene una plataforma deslizable que se desplaza hacia atrás y adelante en la dirección Y.

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

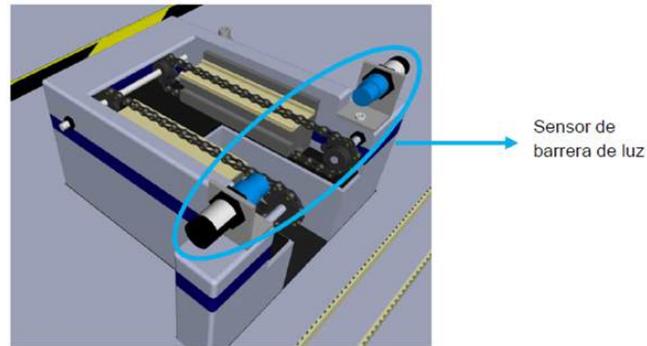


Figura 4.23: Estaciones de carga y descarga

Además, contiene un sensor de reflexión de luz que indica si una pieza se encuentra presente o no en ella (I2.7). El elevador industrial funciona con tres actuadores:

- Motor bidireccional en el eje X Figura 4.24. Este motor es usado para mover el elevador de forma lateral a lo largo del eje X. Dependiendo de su dirección, ésta será controlada por una salida diferente del controlador (Q0.0 para la dirección positiva y Q0.1 para la negativa). Cuando el elevador se esté moviendo a lo largo del eje, está se detendrá enfrente de alguna de las doce columnas del almacén, sin embargo, a velocidad normal la inercia la moverá fuera de lugar. Para solucionar este problema, el controlador debe activar el modo de velocidad reducida cuando se encuentre por alcanzar su destino, esto se logra activando un relevador (Q0.2).

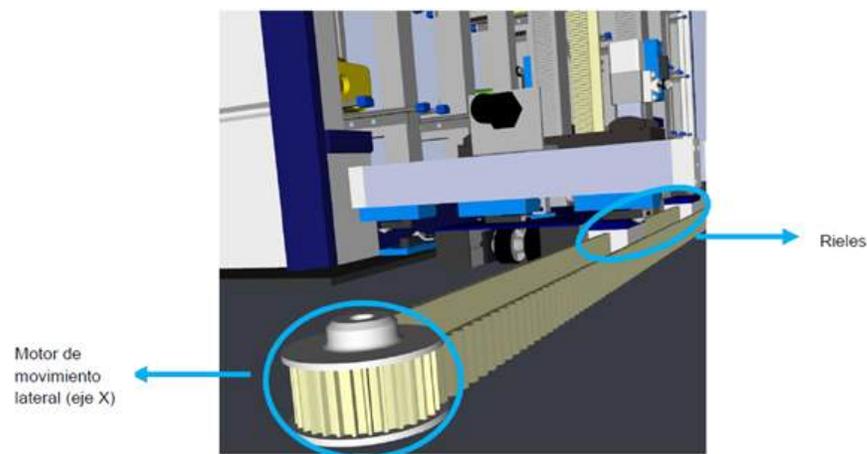


Figura 4.24: Movimiento desplazamiento horizontal

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

Motor bidireccional en el eje Z Figura 4.25. Este motor bidireccional es usado para mover la posición del elevador verticalmente, usando la salida Q0.5 para moverse en la dirección positiva, y Q0.6 para moverse en la posición negativa. Para tomar una pieza, el elevador tiene que hacer uso de la plataforma para levantarla, y para ponerla de vuelta en su lugar tiene que bajarla, lo que significa que para cada nivel el actuador puede detenerse en dos posiciones: arriba (posición “superior”) o abajo (posición “inferior”) del nivel deseado.

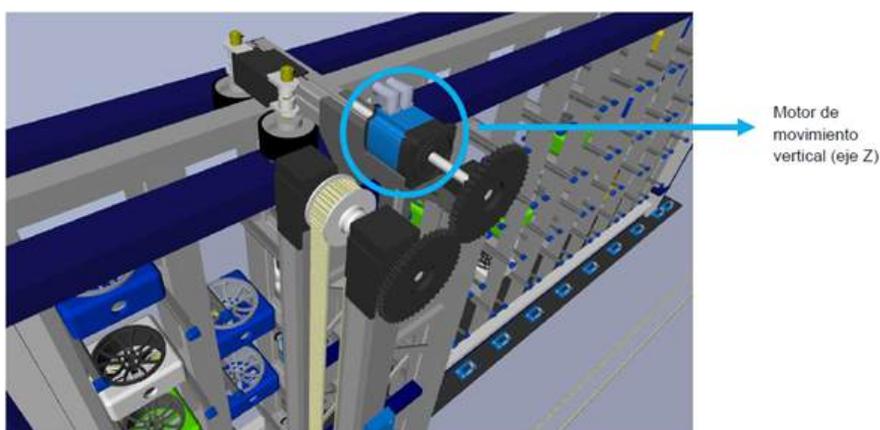


Figura 4.25: Movimiento desplazamiento vertical

Motor bidireccional en el eje Y. Como su nombre lo menciona, este motor es usado para mover la plataforma del elevador a lo largo del eje Y, por lo tanto, su tarea es llevar la plataforma a la posición necesaria para recoger las piezas y colocarlas. Para mover la plataforma en la dirección positiva se usa la salida Q0.4 y para moverla al lado opuesto la salida Q0.3 debe ser activada.

La plataforma cuenta con tres sensores mecánicos en la parte de abajo que indican la posición en la que se encuentra: al frente (I1.4), en medio (I1.5) y atrás (I1.6). Estos sensores trabajan con una lógica invertida, por lo que cuando la plataforma se encuentra en esa posición la salida del sensor se encuentra desactivada Figura 4.26.

El almacén está compuesto por 48 espacios de almacenamiento distribuidos en 4 filas y 12 columnas Figura 4.27. Estos espacios no cuentan con sensores para detectar si una pieza está presente o no, por lo que es importante incluir un registro de las piezas cargadas y descargadas en la programación de automatización

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

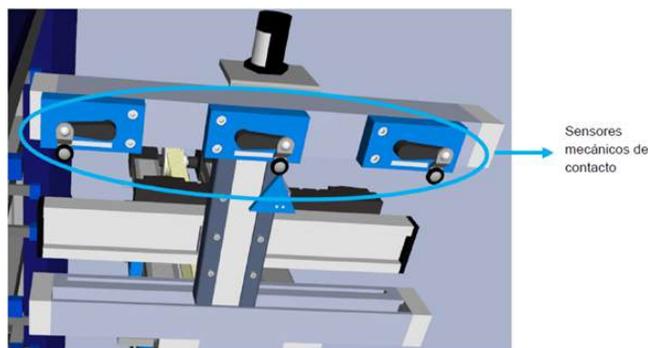


Figura 4.26: Sensores mecánicos en plataforma

y control. Como se mencionó antes, el almacén cuenta con 12 sensores que dan información acerca de la posición del elevador en la dirección X (I0.0 – I1.3). Estos son interruptores mecánicos con lógica negada y se muestran en la imagen de entradas y salidas del modelo, además de que se especifican en la tabla al final de este documento.

Los sensores en el elevador en el eje Z indican si la plataforma ha alcanzado una posición por arriba o por debajo del espacio de almacenamiento. Estos también son interruptores mecánicos (I1.7 – I2.6) y se muestran de igual manera en la imagen de entradas y salidas y en la tabla al final del documento. Es importante recordar que para tomar una pieza del almacén se requiere colocar el elevador en la posición “inferior” para que al momento de subir el elevador a la posición “superior” la plataforma tome la pieza. Y de manera inversa, para dejar la pieza en el almacén, el elevador tiene que encontrarse en la posición “superior” para que al bajar el elevador a la posición “inferior”, la pieza quede en la posición deseada.

Finalmente, la estación de almacenamiento de Figura 4.2(D) consiste en almacenar y retirar piezas de trabajo del almacén industrial. El proceso comienza cuando una pieza se encuentra en la estación de carga, lo cual es detectado por un sensor de reflexión de luz. En ese caso, el elevador industrial se mueve a la estación y toma la pieza. Después de esto, el elevador lleva la pieza al lugar de almacenamiento previsto moviéndose en dirección X y Z al mismo tiempo. La ocupación de un lugar de almacenamiento es reconocida por el software. Con el fin de permitir un movimiento rápido al lugar de almacenamiento y además

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

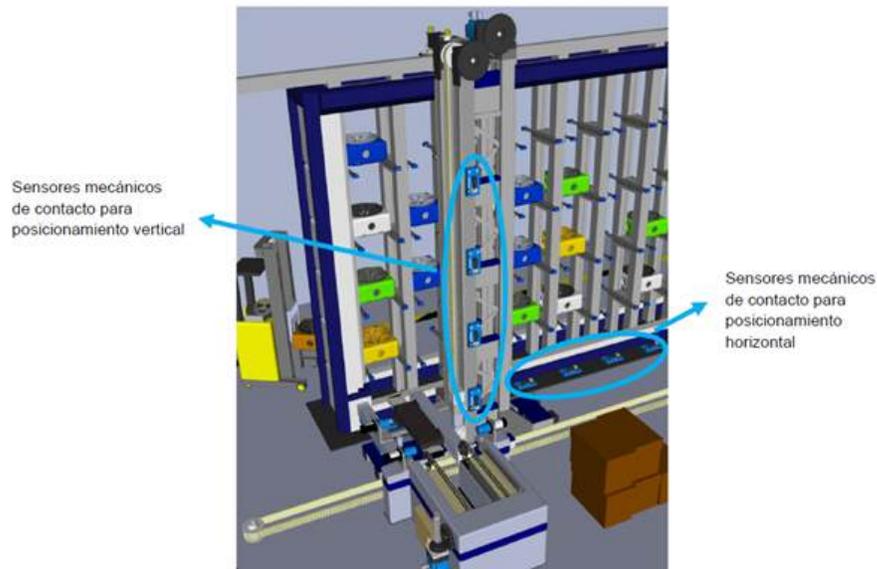


Figura 4.27: Sensores de movimiento vertical y horizontal.

un movimiento seguro al colocar la pieza, se debe validar la posición horizontal del elevador industrial mediante los interruptores mecánicos de manera que se reduzca la velocidad del elevador antes de alcanzar la posición deseada. Cuando las piezas son tomadas para llevarlas a la estación de descarga el movimiento se produce de la misma manera, en orden cronológico inverso a la secuencia de carga. Es importante recalcar que la plataforma debe de estar en la posición media (posición por default) para que el elevador pueda moverse en hacia arriba/abajo o hacia la izquierda/derecha para evitar cualquier colisión.

4.3.8. Modelado de almacén con máquina de estados finitos

La estación de almacenamiento que se muestra en la Figura 4.28, tiene tres motores bidireccionales: el motor del eje X operado con señales de salida $O1L$ y $O1R$ para moverse a la izquierda y a la derecha, respectivamente; el motor del eje Z con señales de comando $O2U$ y $O2D$ para moverse hacia arriba y hacia abajo, y el motor para el eje Y que mueve una plataforma dentro y fuera de la estructura de almacenamiento, como lo indican las señales $O3R$ y $O3L$ (dirección

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

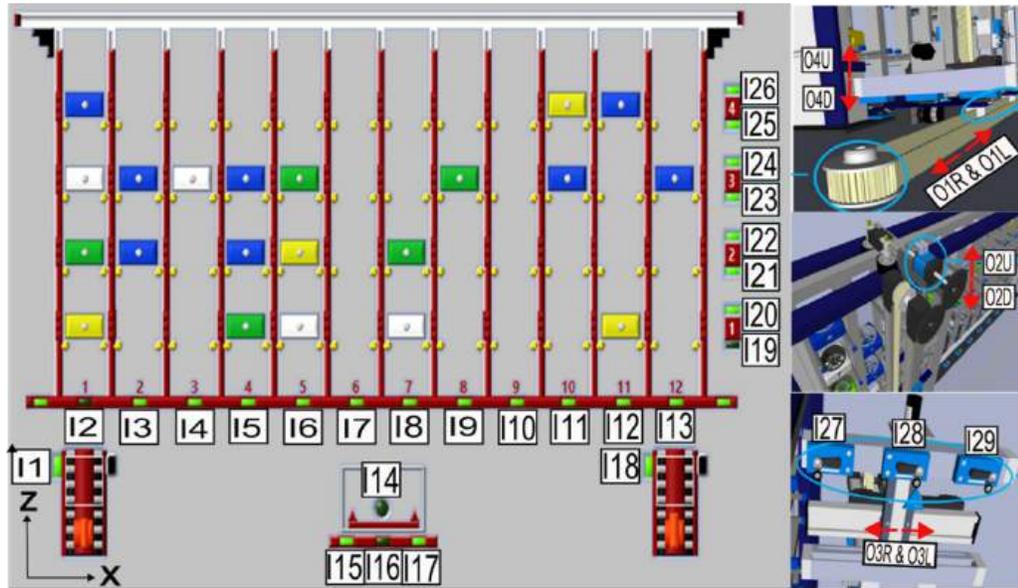


Figura 4.28: Distribución de sensores en el almacén.

izquierda para introducir y dirección derecha para extraer una pieza). El ascensor tiene dos configuraciones: carga y descarga. La configuración de la carga depende del sensor *I1*. Si detecta un producto en la zona de carga, el elevador extiende las horquillas hacia la derecha, eleva ligeramente la plataforma hasta un nivel superior y contrae las horquillas. Una vez que el producto está en la plataforma, el sistema verifica qué lugar está disponible para llevar el producto. Una vez que se detecta un lugar disponible, la plataforma se mueve activando sus señales de motores *O2U* & *O1R* hasta llegar al lugar indicado. Cuando la plataforma está en el lugar indicado, las horquillas se desplazan hacia la izquierda y la plataforma se baja a una posición específica para cada nivel de almacenamiento. Para las entradas superiores, las horquillas deben alcanzar los sensores *I26*, *I24*, *I22*, *I20*, y para los niveles inferiores, las horquillas deben ser detectadas por los sensores *I25*, *I23*, *I21*, *I19*. Después de la carga, las horquillas se retraen y el elevador se envía a casa. La configuración de descarga utiliza las mismas entradas y salidas, pero en el orden adecuado para retirar un producto específico del almacén. El funcionamiento de la máquina de procesamiento se representa en la Figura 4.29 y se describe en la Tabla 4.4.

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

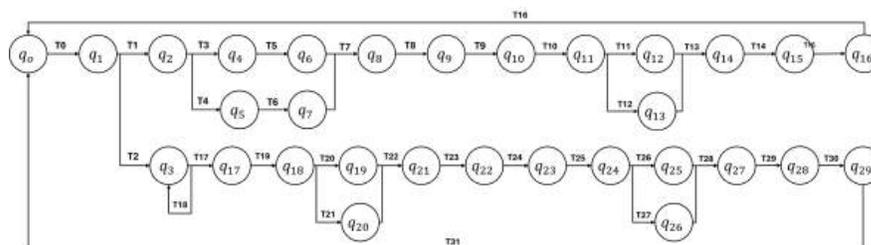


Figura 4.29: Estación de almacenamiento FSM

Tabla 4.4: Estados y transiciones de la estación de almacenamiento FSM.

Estado actual	Transicion	Estado siguiente	Estado Actual	Transicion	Estado siguiente
q_0	$T_0 = (Start)$	q_1	q_{16}	$T_{16} = I_{28}$	$q_0 = O3L^*0^*$
q_1	$T_1 = Load$	$q_2 = Load$	q_3	$T_{17} = Objectrequest$	$q_{17} = Discharge$
q_1	$T_2 = Discharge$	$q_3 = Discharge$	q_{17}	$T_{18} = NOTOccupiedplace$	q_3
q_2	$T_3 = I_2$	$q_4 = O1R^*1^*$	q_{17}	$T_{19} = Occupiedplace$	$q_{18} = O1L^*O2U^*1^*$
q_2	$T_4 = \overline{I_19}$	$q_5 = O2D^*1^*$	q_{18}	$T_{20} = Place^*X^*$	$q_{19} = O1L^*0^*$
q_4	$T_5 = I_2$	$q_6 = O1R^*0^*$	q_{18}	$T_{21} = Place^*Z^*$	$q_{20} = O2U^*0^*$
q_5	$T_6 = \overline{I_2}$	$q_7 = O2D^*0^*$	$q_{19} \& q_{20}$	$T_{22} = Objectrequestposition$	$q_{21} = O3R^*1^*$
$q_6 \& q_7$	$T_7 = \overline{I_1}$	$q_8 = O3L^*1^*$	q_{21}	$T_{23} = I_{27}$	$q_{22} = O3R^*0^* \& O4U^*1^* =$
q_8	$T_8 = I_{29}$	$q_9 = O3L^*0^* \& O4U^*1^* =$	q_{22}	$T_{24} = UP^*Z^*$	$q_{23} = O4U^*0^* \& O3L^*1^* =$
q_9	$T_9 = I_{20}$	$q_{10} = O4U^*1^*$	q_{23}	$T_{25} = I_{28}$	$q_{24} = O3L^*0^* \& O1L, O2D^*1^* =$
q_{10}	$T_{10} = Verification$	$q_{11} = O1L^*1^* \& O2U^*1^* =$	q_{24}	$T_{26} = \overline{I_{13}}$	$q_{25} = O1L^*0^*$
q_{11}	$T_{11} = Place^*X^*$	$q_{12} = O1L^*0^*$	q_{24}	$T_{27} = \overline{I_{20}}$	$q_{26} = O2D^*0^*$
q_{11}	$T_{12} = Place^*Z^*$	$q_{13} = O2U^*1^*$	$q_{25} \& q_{26}$	$T_{28} = Objectoutposition$	$q_{27} = O3L^*1^*$
$q_{12} \& q_{13}$	$T_{13} = Place^*X^* \& Z^* =$	$q_{14} = O3R^*1^*$	q_{27}	$T_{29} = I_{29} \& \overline{I_{18}}$	$q_{28} = O3L^*0^* \& O4D^*1^* =$
q_{14}	$T_{14} = I_{27}$	$q_{15} = O3R^*0^* \& O4D^*1^* =$	q_{28}	$T_{30} = I_{19}$	$q_{29} = O4D^*0^* \& O3R^*1^* =$
q_{15}	$T_{15} = UP^*Z^*$	$q_{16} = O4D^*0^* \& O3L^*1^* =$	q_{29}	$T_{31} = I_{28}$	$q_0 = O3R^*0^*$

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

4.4. Modelación y computo del Desempeño

El diagrama de tiempos de un sistema industrial automatizado se puede ver en la Figura 4.30, donde t_{SP_i} corresponde al tiempo en el que se activa cada uno de los subprocesos. El tiempo de subproceso de una máquina, t_{SP_i} , se calcula por diferencia entre el tiempo final, $t_{SP_i}Final$, y el tiempo inicial $t_{SP_i}Inicial$ (4.1).

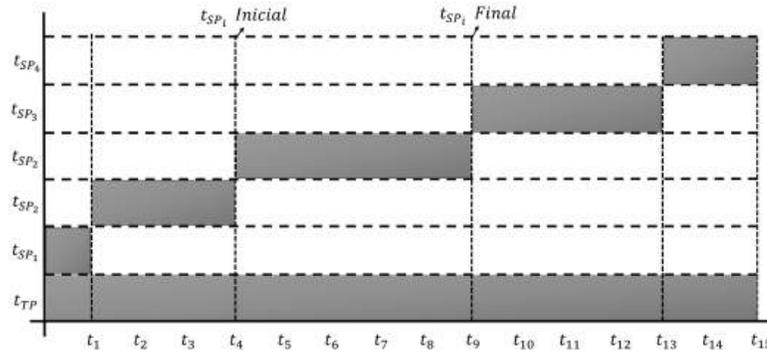


Figura 4.30: Operación de un sistema industrial

$$t_{SP_i} = (t_{SP_i}Final - t_{SP_i}Inicial) \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots \in \mathfrak{R} \quad (4.1)$$

El tiempo óptimo para cada uno de los subprocesos, $t_{SP_{OT}}$, se estima mediante el promedio t_{SP_i} basado en las últimas cinco activaciones $A = A_1, A_2, \dots, A_5$ como se indica en (4.2).

$$t_{SP_{OT}} = \frac{t_{SP_i}A1 + t_{SP_i}A2 + \dots + t_{SP_i}A5}{5} \quad (4.2)$$

Una vez determinado el tiempo ideal de cada uno de los subprocesos, se obtiene el indicador de desempeño de cada subproceso ID_{SP_i} con (4.3), si $ID_{SP_i} \geq 1$ el desempeño está en su momento óptimo, y si $ID_{SP_i} < 1$ el desempeño está por debajo de su tiempo óptimo. Además, los indicadores de desempeño de cada subproceso se utilizan para calcular el indicador de desempeño de cada estación que forme parte del proceso, ID_{P_i} , con (4.4).

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

$$ID_{SP_i} = \frac{t_{SP_i}}{t_{SP_{OT}}} \quad (4.3)$$

$$ID_{PS_i} = \sqrt{\frac{(ID_{SP_i=1})^2 + (ID_{SP_i=2})^2 + \dots + (ID_{SP_i=subprocesos})^2}{ID_{SP_{Xi=subprocesos}}} \quad (4.4)$$

4.4.1. Red compleja y desempeño total del proceso

El sistema industrial presentado en la Figura 4.2, se modela como redes complejas donde los nodos representan las máquinas y el peso del vértice representa el rendimiento. El rendimiento de las máquinas en un proceso se evalúa individualmente considerando el número de subprocesos que se incluyen en el funcionamiento de la máquina. En la Figura 4.31(A), hay tres subprocesos SP_1 , SP_2 y SP_3 , y se agrega un nodo observador para el cálculo del indicador de rendimiento del proceso, ID_{P_i} (4.4). En Figura 4.31(B) se observa el rendimiento del proceso. El nodo observador, C_S , determina el rendimiento del proceso total, ID_P , con (4.5). Dado que el rendimiento de las máquinas individuales que componen el proceso total se estima y se compara con su indicador óptimo en tiempo real, se puede detectar la máquina que causa un rendimiento general deficiente.

$$ID_P = \sqrt{\frac{(ID_{M_{i=1}})^2 + (ID_{M_{i=2}})^2 + \dots + (ID_{TM_{i=NumerodeMaquinas}})^2}{ID_{TM_{i=NumerodeMaquinas}}} \quad (4.5)$$

4.4.2. Analisis de pesos de red compleja

El analisis de los pesos de la red dirigida presentada en la Figura 4.2(A), se realiza mediante la construcción de su matriz de adyacencia y el analisis del grado de entrada y salida de los nodos.

La matriz de adyacencia de la red compleja Figura 4.31(A) se presenta en Tabla 4.5.

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

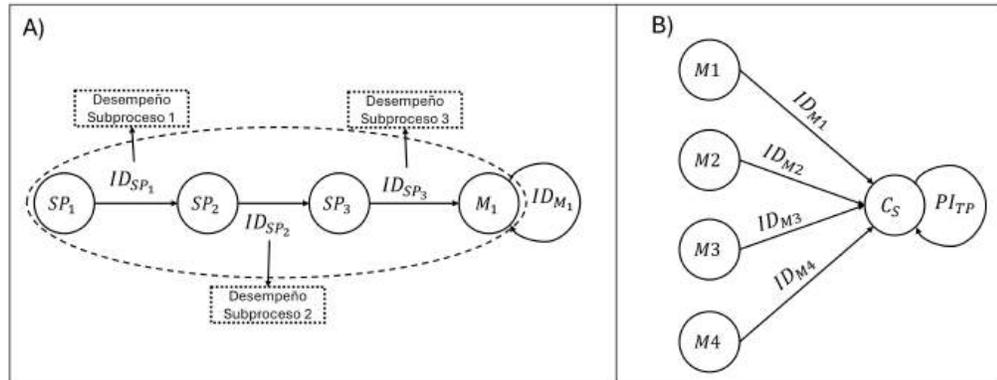


Figura 4.31: Red compleja del proceso de manufactura.

Tabla 4.5: Matriz de adyacencia de subprocesos

	SP_1	SP_2	SP_3	M_1
SP_1	0	0	0	0
SP_2	ID_{SP_1}	0	0	0
SP_3	0	ID_{SP_2}	0	0
M_1	0	0	ID_{SP_3}	0

El análisis del grado de salida de M_1 es el resultados de la suma de los indicadores de desempeño de los subprocesos considerados como se observa en:

$$ID_{M_1} = ID_{SP_1} + ID_{SP_2} + ID_{SP_3}$$

La matriz de adyacencia de la red compleja Fig. 4.31(B) se presenta en Tabla. 4.6.

Tabla 4.6: Matriz de adyacencia de proceso total

	M_1	M_2	M_3	M_4	C_S
M_1	0	0	0	0	0
M_2	0	0	0	0	0
M_3	0	0	0	0	0
M_4	0	0	0	0	0
C_S	ID_{M_1}	ID_{M_2}	ID_{M_3}	ID_{M_4}	ID_{PT}

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

El análisis del grado de salida de ID_{PT} es el resultados de la suma de los indicadores de desempeño de los procesos, que para el enfoque son 4, como se observa en:

$$ID_P = \sqrt{\frac{(ID_{M_1})^2 + (ID_{M_2})^2 + (ID_{M_3})^2 + (ID_{M_4})^2}{4}}$$

4.5. Resultados del Monitoreo de Desempeño

Para evaluar el rendimiento de las cuatro máquinas en el proceso de la rueda mediante el uso de (4.4), cada máquina se dividió en diferentes subprocesos, como se explica a continuación. La máquina de procesamiento, que se muestra en la Figura 4.2(A), se dividió en tres subprocesos. El primer subproceso por evaluar es la colocación del producto debajo del taladro, el segundo es la secuencia que realiza el taladro, y el tercero es la trayectoria del producto hasta su salida de la máquina. La evaluación del rendimiento de los tres subsistemas se observa en la Figura 4.32(A) y la evolución del análisis se muestra en la Figura 4.32(C). La máquina de la estación de clasificación observada en la Figura 4.2(B) se dividió en cuatro subprocesos. El tiempo que se tarda en clasificar y transportar cada uno de los productos se medirá en función del color, que representa el tipo de ruedas de coche que se pueden seleccionar para un coche. El análisis de rendimiento de la clasificación de las ruedas azules, blancas, verdes y amarillas se muestra en la Figura 4.32(B). Figura 4.32(D) presenta la evolución del análisis de la máquina clasificadora.

El Robot cartesiano observado en la Figura 4.2(C) se dividió en cuatro subprocesos. El tiempo que se tarda en transportar cada uno de los productos se medirá en función de su color. El análisis de desempeño en términos de tiempo de transporte del producto se puede ver en la Figura 4.33(A). La Figura 4.33(C) muestra la evolución del análisis. Finalmente, se analiza el proceso de almacenamiento en la Figura 4.2(D). Con el fin de evitar grandes transferencias de datos a través de Modbus, se consideran rutinas de almacenamiento de productos aleatorios. Figura 4.33(B) muestra el rendimiento medido para el proceso de almacenamiento, y la Figura 4.33(D) presenta la evolución del análisis.

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

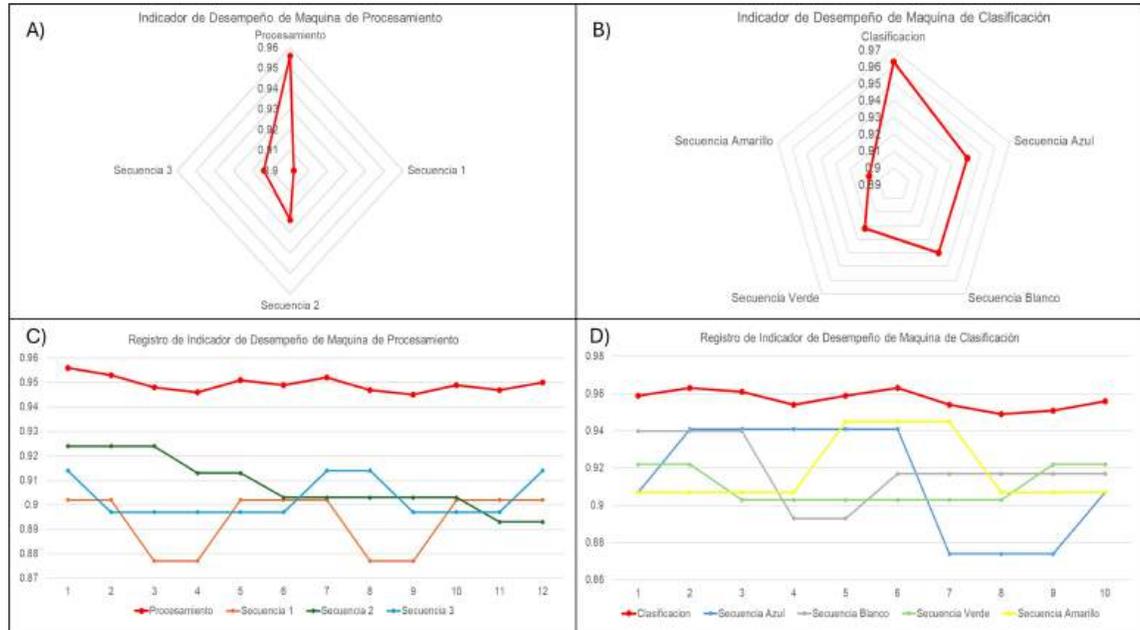


Figura 4.32: A) Desempeño de estación de procesamiento, B) Desempeño de estación de clasificación, C) Registro de desempeño de estación de procesamiento, D) Registro de desempeño de estación de clasificación

Finalmente, mediante el uso de la ecuación 4.5. Se analiza el rendimiento total del proceso de fabricación de la rueda, que se ve en la Figura 4.34 (A), donde se observa que el rendimiento total está cerca de la funcionalidad óptima y se observa que el robot cartesiano contiene el rendimiento más bajo. La figura 4.34(B) muestra la evolución del análisis.

4.5.1. Discusión de resultados

El enfoque presentado que utiliza redes complejas y autómatas de estado finito permite un cálculo sistemático tanto de KRI como de KPI adecuados para sistemas de producción ciberfísicos. KRI y KPI pueden ser calculados y registrados como los pesos de enlace correspondientes a procesos distribuidos, máquinas o cualquier otro tipo de estaciones de trabajo de manufactura, modeladas como nodos de una red compleja. Los autómatas de estados finitos constituyen una técnica formal de modelado y programación que hace que la reprogramación sea más fácil que los métodos no estructurados. Las herramientas computacionales

4. ANÁLISIS DE DESEMPEÑO

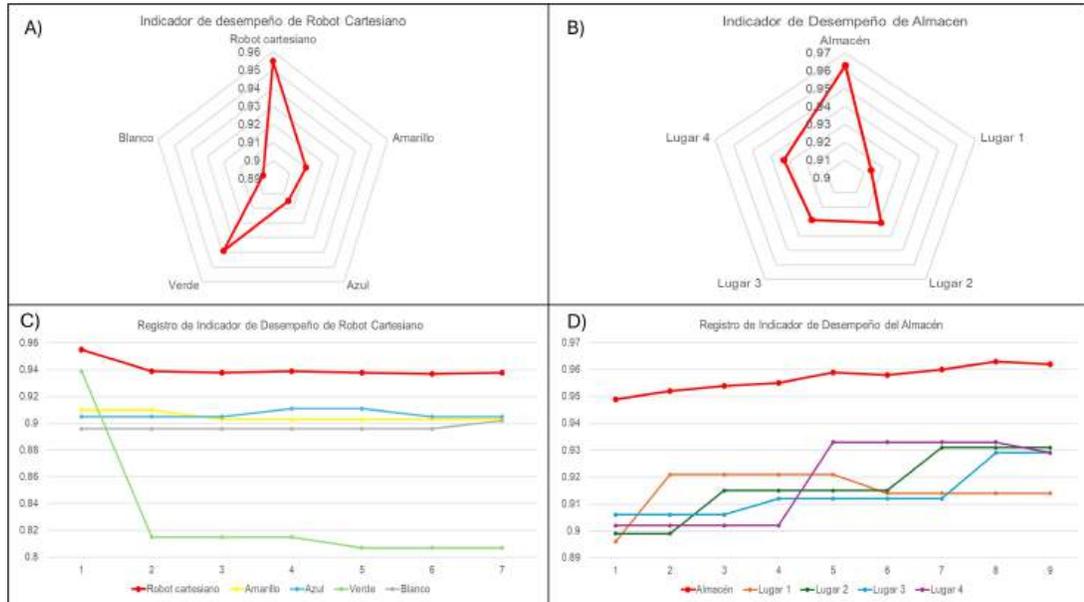


Figura 4.33: A) Desempeño robot cartesiano, B) Desempeño almacén, C) Registro de desempeño robot cartesiano, D) Registro de desempeño de almacén

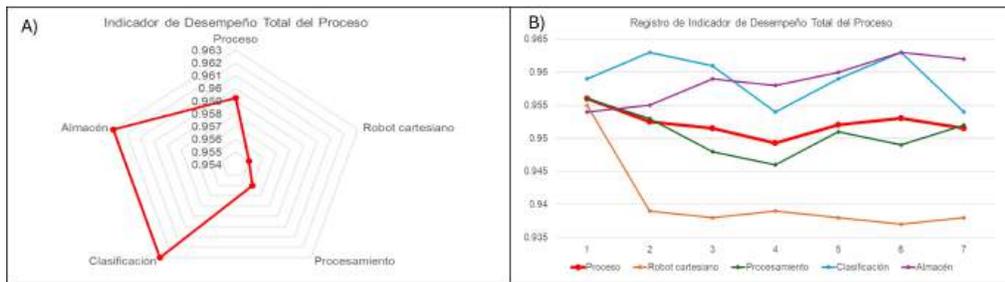


Figura 4.34: Análisis de desempeño total del proceso

combinadas de CN y FSA proporcionan medios para implementar funciones automatizadas avanzadas en los sistemas ciberfísicos, en este caso del monitoreo de desempeño para facilitar el autodiagnóstico del funcionamiento del sistema.

5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

5.1.1. Diagnóstico de fallas

En el trabajo presentado en el capítulo 3 se propuso un esquema novedoso de un sistema ciberfísico básico que incorpora un sistema virtual a nivel de control de supervisión. El sistema virtual se ejecuta en una simulación en tiempo real, proporcionando medios para monitorear y diagnosticar fallas en sensores, actuadores y en la ejecución del control lógico secuencial. En este enfoque, el gemelo digital es principalmente una simulación numérica del proceso y su controlador, que se compone de algoritmos que combinan un autómata híbrido como controlador virtual, junto con los sensores y actuadores modelados en una red compleja. El sistema implementado actúa como un sistema de control de supervisión capaz de diagnosticar y localizar fallos en los sistemas físicos en tiempo real. Los algoritmos fueron validados en un sistema automatizado de almacenamiento y recuperación. La implementación fue necesaria para resolver algunos problemas de sincronización presentados en la coordinación del gemelo digital con el sistema físico. Una de las principales pruebas demostró que el sistema era capaz de detectar y localizar fallos en dos actuadores y dos sensores. Los resultados obtenidos validan que el esquema propuesto es capaz de diagnosticar y localizar fallos concurrentes en

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

tiempo real y puede incorporarse como una función de automatización avanzada de los sistemas de manufactura.

5.1.2. Análisis de desempeño

El esquema de sistema ciberfísico propuesto en el capítulo 4 se aplica un algoritmo para el cálculo en línea del tiempo de activación/desactivación de cada subproceso programado con una máquina de estados finitos (FSM) donde la delimitación del subproceso es la base para el control del sistema físico. Los indicadores de rendimiento se calculan como el peso de los enlaces de una red compleja implementada como medio de control de supervisión para el monitoreo de procesos y la optimización del sistema físico. El objeto del estudio de caso fue un sistema ciberfísico de producción de ruedas con el nivel de autodiagnóstico de la arquitectura 5C. Se utilizó la combinación de la teoría de grafos y los autómatas finitos para calcular el indicador de rendimiento de una sola máquina y de todo un proceso. La prueba funcional y los resultados obtenidos muestran la aplicabilidad del esquema propuesto a diversos procesos. Este enfoque se puede incorporar en diversos sistemas de fabricación que utilizan un controlador lógico programable (PLC) con Modbus TCP/IP o cualquier otro protocolo industrial.

5.1.3. Conclusiones generales

Este proyecto plantea la hipótesis de que la conceptualización y modelación de un sistema ciberfísico industrial, analizado en tiempo real a través de la teoría de redes complejas y autómatas finitos, permite el diagnóstico y evaluación del desempeño del sistema.

Para validar esta hipótesis, se propone un sistema de monitoreo y control basado en autómatas híbridos y finitos, acoplado con análisis en tiempo real a través de la teoría de redes complejas, para el diagnóstico de fallas y evaluación del desempeño de procesos industriales.

Se concluye que la hipótesis planteada en este proyecto es válida, como se evidencia en los capítulos 5.1.1 y 5.1.2, donde los modelos de redes complejas y los modelos híbridos/autómatas finitos interactúan dentro de un sistema ciberfísico

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

interactúan. Se realiza un diagnóstico de fallas y evaluación del tiempo de desempeño mediante un análisis en tiempo real de los pesos de la red, los pesos de los nodos interconectados varían en función del número de activaciones y tiempos de ciclo de los autómatas híbridos/finitos en la evolución física del sistema.

5.2. Recomendaciones y trabajo futuro

El trabajo propuesto presenta una estructura de sistema ciberfísico y cuenta con un sistema físico y uno virtual.

La teoría de redes complejas, combinada con autómatas híbridos, ha demostrado ser una herramienta poderosa para el desarrollo de aplicaciones industriales, permitiendo modelar sistemas interconectados de manera más eficiente y precisa. Mediante la integración de estas teorías dentro de un sistema ciberfísico, es posible simular y optimizar procesos industriales, mejorando tanto la fiabilidad como el rendimiento de los sistemas. El autómata híbrido, que fusiona características de los autómatas clásicos con dinámicas más complejas, dio lugar a las soluciones innovadoras propuestas en este proyecto, que han mostrado ser viables en un contexto industrial. Por ello, es crucial continuar con experimentos que exploren las fronteras de esta combinación teórica, estableciendo el alcance de sus aplicaciones y evaluando su potencial en comparación con otras tecnologías existentes. La comparación con aplicaciones alternativas permitirá validar la efectividad de la solución propuesta y, a su vez, orientar futuras investigaciones hacia áreas con mayor potencial de mejora.

La teoría de redes complejas se puede utilizar como modelo de datos de sistemas ciberfísicos que posibilite implementar funciones no solo de diagnósticos sino de auto reconfiguración. Usada de manera conjunta con técnicas de modelación de procesos de manufactura y de programación estructurada de PLC como FSA y Autómatas híbridos.

Bibliografía

- [1] AKKURT, T., AND SARIÇİÇEK, İ. Kpi based performance estimation in production systems using deep learning techniques derin öğrenme teknikleri kullanılarak üretim sistemlerinde kpi tabanlı performans tahminleme. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* 39, 3 (2024). 25
- [2] ALDANA, M. Redes complejas. *Recuperado a partir de <http://www.fis.unam.mx/~max/English/notasredes.pdf>* (2006). 20
- [3] ALHAJJAR, E. Network science. In *Mathematics in Cyber Research*. Chapman and Hall/CRC, 2022, pp. 207–232. 1
- [4] ALONSO, M., TURANZAS, J., AMARIS, H., AND LEDO, A. T. Cyber-physical vulnerability assessment in smart grids based on multilayer complex networks. *Sensors* 21, 17 (2021), 5826. 23
- [5] ALONSO, M., TURANZAS, J., AMARIS, H., AND LEDO, A. T. Cyber-physical vulnerability assessment in smart grids based on multilayer complex networks. *Sensors* 21, 17 (2021), 5826. 24
- [6] ALSHALALFAH, A.-L., MOHAMED, O. A., AND OUCHANI, S. A framework for modeling and analyzing cyber-physical systems using statistical model checking. *Internet of Things* 22 (2023), 100732. 23
- [7] ANDRICKSON, J., CHACÓN, E., AND PABÓN, M. Industria 4.0, un enfoque discreto industry 4.0, a discrete approach. 4
- [8] BARABÁSI, A.-L. Network science. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 371, 1987 (2013), 20120375. 20

BIBLIOGRAFÍA

- [9] BELTRÁN, E. R., JIMÉNEZ, A. V., MORA, J. L. O., RAMOS, L. A. C., AND VALADEZ, J. O. V. Análisis de fallas en proceso industrial de una enlatadora aplicando redes complejas (analysis of failures in industrial process of a canner applying complex networks). *Pistas Educativas* 41, 134 (2019). 4
- [10] CHOI, S., WOO, J., KIM, J., AND LEE, J. Y. Digital twin-based integrated monitoring system: Korean application cases. *Sensors* 22, 14 (2022), 5450. 24
- [11] DIAZ, S., PEREZ-CORREA, J. R., AND FERNANDEZ-FERNANDEZ, M. A. Automatic control on batch and continuous distillation columns. *IEEE Latin America Transactions* 16, 9 (2018), 2418–2426. 3
- [12] GIUDICI, R. *Introducción a la teoría de grafos*. Equinoccio, 1997. 23
- [13] GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, G., GONZÁLEZ-CAVA, J. M., JOVE, E., CALVO-ROLLE, J. L., AND MÉNDEZ PÉREZ, J. A. Diseño de un gemelo digital para el gestor de operaciones de una lavandería industrial. In *XL Jornadas de Automática* (2019), Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións, pp. 499–505. 2
- [14] GUO, Z., ZHANG, Y., ZHAO, X., AND SONG, X. Cps-based self-adaptive collaborative control for smart production-logistics systems. *IEEE transactions on cybernetics* 51, 1 (2020), 188–198. 23
- [15] GUO, Z., ZHANG, Y., ZHAO, X., AND SONG, X. Cps-based self-adaptive collaborative control for smart production-logistics systems. *IEEE transactions on cybernetics* 51, 1 (2020), 188–198. 24
- [16] HAMZAH, M., ISLAM, M. M., HASSAN, S., AKHTAR, M. N., FERDOUS, M. J., JASSER, M. B., AND MOHAMED, A. W. Distributed control of cyber physical system on various domains: A critical review. *Systems* 11, 4 (2023), 208. 22
- [17] HARRISON, R., VERA, D., AND AHMAD, B. Engineering methods and tools for cyber-physical automation systems. *Proceedings of the IEEE* 104, 5 (2016), 973–985. 3
- [18] HAVARD, V., JEANNE, B., LACOMBLEZ, M., AND BAUDRY, D. Digital twin and virtual reality: a co-simulation environment for design and assessment of industrial workstations. *Production & Manufacturing Research* 7, 1 (2019), 472–489. 3

BIBLIOGRAFÍA

- [19] HU, F., LU, Y., VASILAKOS, A. V., HAO, Q., MA, R., PATIL, Y., ZHANG, T., LU, J., LI, X., AND XIONG, N. N. Robust cyber–physical systems: Concept, models, and implementation. *Future generation computer systems* 56 (2016), 449–475. 23
- [20] KANDAR, S. *Introduction to automata theory, formal languages and computation*. Pearson Education India, 2013. 11
- [21] KHADRA, A., AND RAMMAL, R. Scada system for solar backup power system automation. In *2022 International Conference on Smart Systems and Power Management (IC2SPM)* (2022), IEEE, pp. 75–79. 22
- [22] LEE, J., BAGHERI, B., AND KAO, H.-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters* 3 (2015), 18–23. 7
- [23] LI, P., ZHANG, F., YANG, Y., MA, X., YAO, S., YANG, P., ZHAO, Z., LAI, C. S., AND LAI, L. L. The integrated modeling of microgrid cyber physical system based on hybrid automaton. *Frontiers in Energy Research* 10 (2022), 748828. 23
- [24] LIN, H., AND ANTSAKLIS, P. J. Hybrid dynamical systems. 16
- [25] LIN, H., AND ANTSAKLIS, P. J. *Hybrid dynamical systems: Fundamentals and methods*. Springer, 2022. 17, 18
- [26] MARTELL-CHAVEZ, F., LÓPEZ-TÉLLEZ, J. M., PAREDES-ORTA, C. A., AND ESPINOSA-LUNA, R. Virtual laboratories for teaching automation, robotics, and optomechatronics. In *2023 IEEE World Engineering Education Conference (EDU-NINE)* (2023), IEEE, pp. 1–4. vii, 50, 51
- [27] MEHRABI, M. G., ULSOY, A. G., AND KOREN, Y. Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing. *Journal of Intelligent manufacturing* 11 (2000), 403–419. 23
- [28] MICHAEL, W. Grieves digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication-llc. 3
- [29] MOLLOY, M., AND REED, B. A critical point for random graphs with a given degree sequence. *Random structures & algorithms* 6, 2-3 (1995), 161–180. 19

BIBLIOGRAFÍA

- [30] MONOSTORI, L., KÁDÁR, B., BAUERNHANSL, T., KONDOH, S., KUMARA, S., REINHART, G., SAUER, O., SCHUH, G., SIHN, W., AND UEDA, K. Cyber-physical systems in manufacturing. *Cirp Annals* 65, 2 (2016), 621–641. 24
- [31] MORIELLO, S. Sistemas complejos, caos y vida artificial. *Red científica* (2003), 1579–0233. 19
- [32] MU, D., YUE, X., AND REN, H. Robustness of cyber-physical supply networks in cascading failures. *Entropy* 23, 6 (2021), 769. 23
- [33] MU, D., YUE, X., AND REN, H. Robustness of cyber-physical supply networks in cascading failures. *Entropy* 23, 6 (2021), 769. 24
- [34] NUHEL, A. K., SAZID, M. M., AHMED, K., BHUIYAN, M. N. M., AND HASSAN, M. Y. B. A pi controller-based water supplying and priority based scada system for industrial automation using plc-hmi scheme. In *2022 IEEE International Conference on Artificial Intelligence in Engineering and Technology (IICAIET)* (2022), IEEE, pp. 1–6. 22
- [35] PLATZER, A. *Logical foundations of cyber-physical systems*, vol. 662. Springer, 2018. 7
- [36] PÓSFAI, M., AND BARABASI, A.-L. *Network Science*. Citeseer, 2016. 23
- [37] QI, Q., TAO, F., HU, T., ANWER, N., LIU, A., WEI, Y., WANG, L., AND NEE, A. Enabling technologies and tools for digital twin. *Journal of Manufacturing Systems* 58 (2021), 3–21. 3
- [38] RAHIMIAN, M. A., AND PRECIADO, V. M. Detection and isolation of failures in directed networks of lti systems. *IEEE Transactions on Control of Network Systems* 2, 2 (2014), 183–192. 1
- [39] RAVASIO, D., TUISSI, L., SPINELLI, S., AND BALLARINO, A. A compressed air network energy-efficient hierarchical unit commitment and control. In *2023 15th International Conference on Computer and Automation Engineering (IC-CAE)* (2023), IEEE, pp. 469–473. 23
- [40] REYES-LUÉVANO, J., RUIZ-BELTRÁN, E., CASTAÑEDA-RAMOS, L., AND OROZCO-MORA, J. Structural analysis and fault detection on manufacturing systems: A complex network approach. In *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)* (2017), IEEE, pp. 1–6. 2

BIBLIOGRAFÍA

- [41] REYES-LUÉVANO, J., RUIZ-BELTRÁN, E., CASTAÑEDA-RAMOS, L., AND OROZCO-MORA, J. Detección y aislamiento de fallas en sistemas de manufactura desde el enfoque de redes complejas. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 16, 1 (2019), 36–47. 2
- [42] RIBEIRO, L., BARATA, J., CÂNDIDO, G., AND ONORI, M. Evolvable production systems: An integrated view on recent developments. In *Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology* (2010), Springer, pp. 841–854. 24
- [43] ROQUE ROLO, G., DIONISIO ROCHA, A., TRIPA, J., AND BARATA, J. Application of a simulation-based digital twin for predicting distributed manufacturing control system performance. *Applied Sciences* 11, 5 (2021), 2202. 24
- [44] SAMIR, K., KHABBAZI, M. R., MAFFEI, A., AND ONORI, M. A. Key performance indicators in cyber-physical production systems. *Procedia CIRP* 72 (2018), 498–502. 23
- [45] SAMIR, K., KHABBAZI, M. R., MAFFEI, A., AND ONORI, M. A. Key performance indicators in cyber-physical production systems. *Procedia CIRP* 72 (2018), 498–502. 24
- [46] SÁNCHEZ-CHÁVEZ, I. Y., AND MARTELL-CHÁVEZ, F. Multilevel automation of a manufacturing robotic cell using finite state machines. *Ingeniería, investigación y tecnología* 20, 4 (2019). 24
- [47] SHAO, J., BULDYREV, S. V., HAVLIN, S., AND STANLEY, H. E. Cascade of failures in coupled network systems with multiple support-dependence relations. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* 83, 3 (2011), 036116. 2
- [48] STAROLETOV, S. Automatic proving of stability of the cyber-physical systems in the sense of lyapunov with keymaera. In *2021 28th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)* (2021), IEEE, pp. 431–438. 23
- [49] SUN, T., XIA, W., ZHAO, X., AND SUN, X.-M. A novel mathematical characterization for switched linear systems based on automata and its stabilizability analysis. *IEEE Transactions on Control of Network Systems* (2023). 23

BIBLIOGRAFÍA

- [50] SUN, T., XIA, W., ZHAO, X., AND SUN, X.-M. A novel mathematical characterization for switched linear systems based on automata and its stabilizability analysis. *IEEE Transactions on Control of Network Systems* (2023). 24
- [51] TAO, F., SUI, F., LIU, A., QI, Q., ZHANG, M., SONG, B., GUO, Z., LU, S. C.-Y., AND NEE, A. Y. Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research* 57, 12 (2019), 3935–3953. 24
- [52] TCACIUCGHERASIM, S.-A. A solution for an industrial automation and scada system. In *2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)* (2022), IEEE, pp. 297–300. 22
- [53] TINOCO, D. Y ROJAS, I. Sistemas de primer orden, 2021. Oct 01, 2024. vi, 13, 15
- [54] VILLALOBOS, A. M. S., BELTRÁN, E. R., VALADEZ, J. O. V., AND MORA, J. L. O. Esquema para la detección y localización de fallas, en un sistema de combustión interna (scheme for detection and localization of failures, in an internal combustion system). *Pistas Educativas* 40, 130 (2018). 2
- [55] VILLALONGA, A., BERUVIDES, G., CASTANO, F., AND HABER, R. E. Cloud-based industrial cyber–physical system for data-driven reasoning: A review and use case on an industry 4.0 pilot line. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 16, 9 (2020), 5975–5984. 22
- [56] ZHANG, K., SHI, Y., KARNOUSKOS, S., SAUTER, T., FANG, H., AND COLOMBO, A. W. Advancements in industrial cyber-physical systems: an overview and perspectives. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* (2022). 22
- [57] ZHAO, Z., XU, Y., LI, Y., ZHAO, Y., WANG, B., AND WEN, G. Sparse actuator attack detection and identification: A data-driven approach. *IEEE Transactions on Cybernetics* (2023). 23
- [58] ZHAO, Z., XU, Y., LI, Y., ZHAO, Y., WANG, B., AND WEN, G. Sparse actuator attack detection and identification: A data-driven approach. *IEEE Transactions on Cybernetics* (2023). 24
- [59] ZHU, H., RHO, S., LIU, S., AND JIANG, F. Learning spatial graph structure for multivariate kpi anomaly detection in large-scale cyber-physical systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* (2023). 9

Apéndice B

B.1. Implementación de algoritmo de diagnóstico de fallas de entradas y salidas digitales

La implementación del sistema se basa en la consideración de un sistema digital y uno físico ejecutándose en paralelo y llevando un orden de ejecución como se menciona a continuación. El sistema físico Figura B.1 (1), corresponde al autómata físico programado en el PLC. El sistema digital ejecutándose en paralelo al sistema físico, lleva a cabo la ejecución del gemelo digital Figura B.12 y 3. Posterior a la ejecución del autómata físico y el autómata virtual se ejecutan las unidades de peso digital físico y virtual Figura B.14 y 5, almacenando la información de las entradas y salidas activas correspondientes al gemelo digital y el sistema físico. Por último y considerando un tiempo de sincronización (para el proyecto se utiliza un retardo de 20ms) para ejecutar la unidad de diagnóstico Figura B.16 que compara los vectores o matrices de adyacencia del sistema digital y el sistema virtual, determinando en base a la diferencia de los lugares de la matriz valores diferentes detectando fallas.

B.2. Implementación de algoritmo de diagnóstico de fallas de entradas y salidas analógicas

El funcionamiento del algoritmo de diagnóstico de fallas analógicas es idéntico al algoritmo de variables digitales se considerando variables analógicas del autómata híbrido Figura B.2.

B.

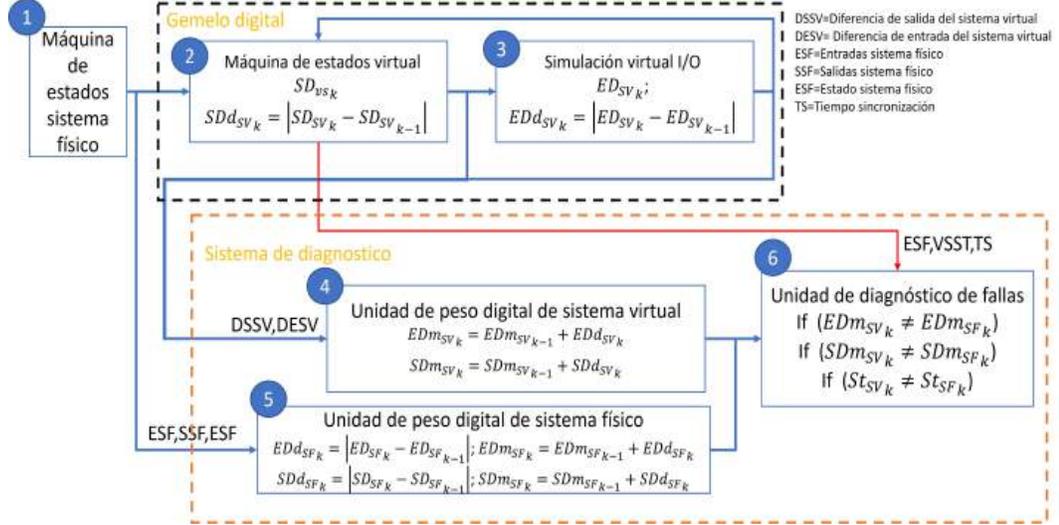


Figura B.1: Funcionamiento algoritmo de entradas y salidas digitales.

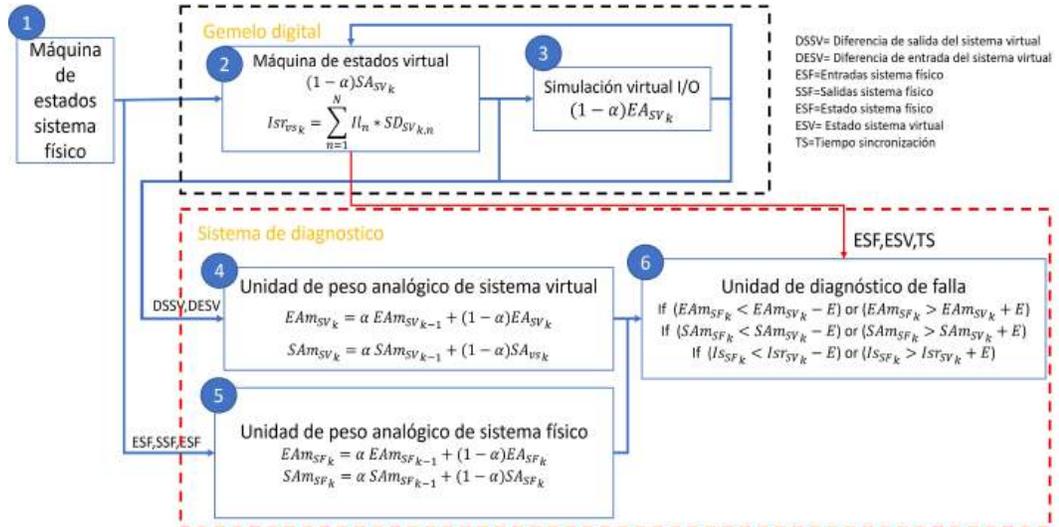


Figura B.2: Funcionamiento algoritmo de entradas y salidas analógicas.

Declaración

Por la presente declaro que he elaborado este documento sin la ayuda prohibida de terceros y sin hacer uso de ayudas distintas de las especificadas; nociones asumidas directamente o indirectamente de otras fuentes se han identificado como tales. Este documento no ha sido previamente presentado en forma idéntica o similar de algún otro examen nacional o extranjero.

El trabajo de tesis se llevó a cabo de **2020** a **2024** bajo la supervisión de Dr. **Fernando Martell Chávez**.

Aguascalientes, Ags. Agosto 2024