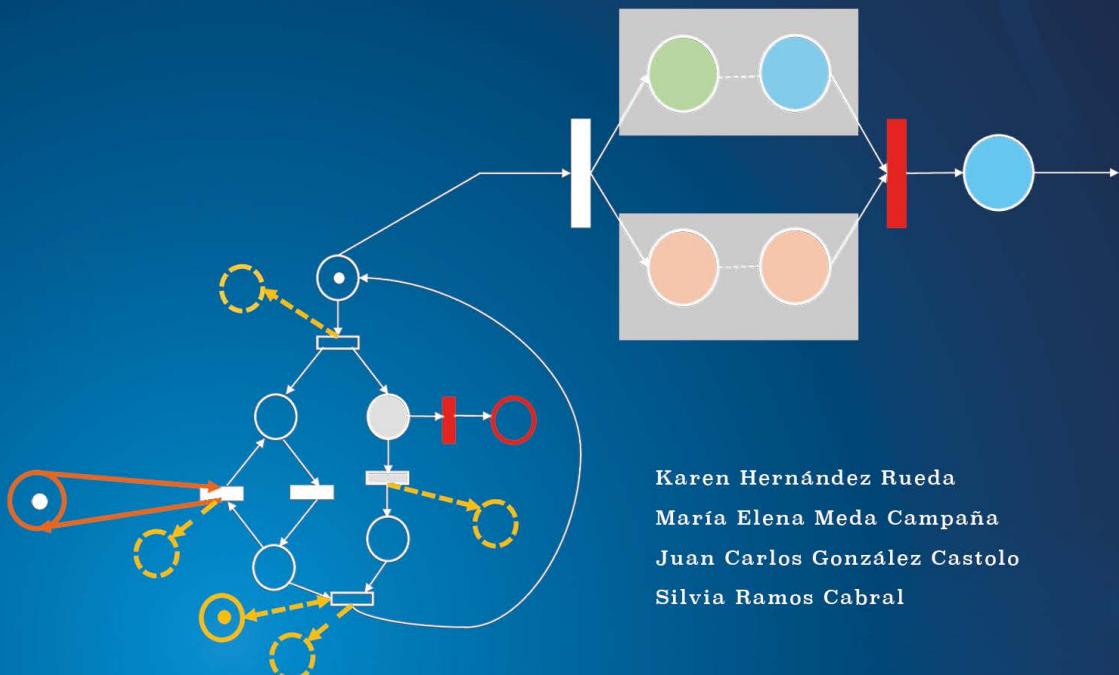


Aplicaciones de las redes de Petri

Diagnóstico de faltas, detección de
especificaciones y comercio electrónico

Applications of Petri Nets

Diagnosis, Specification
Detection and E-Commerce

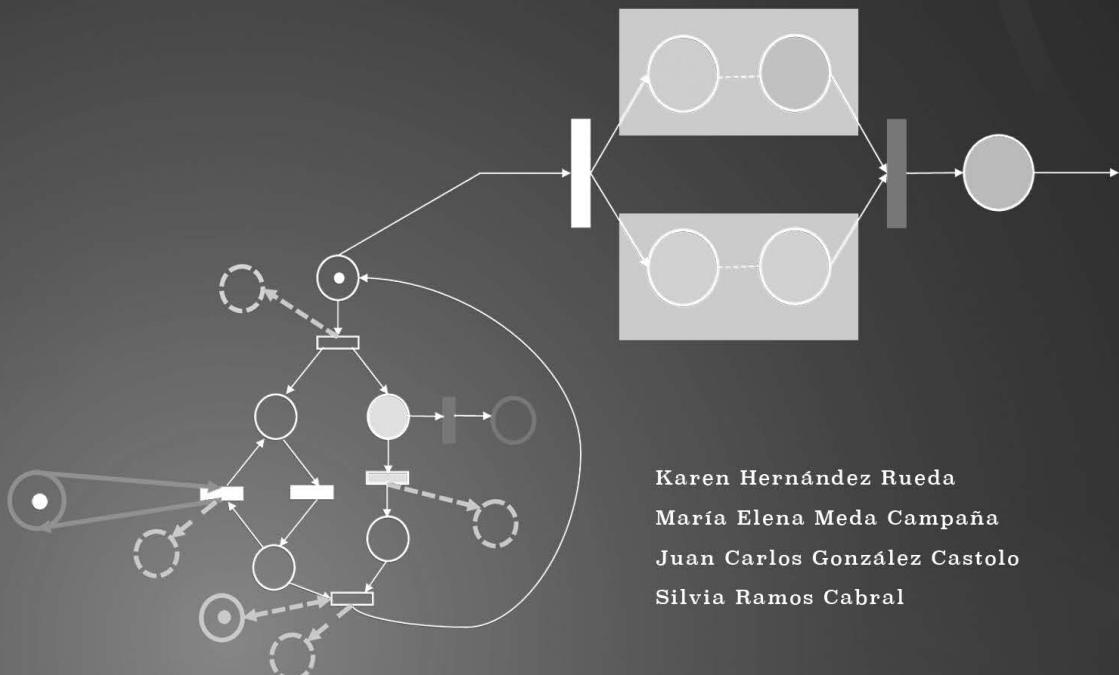


Aplicaciones de las redes de Petri

Diagnóstico de faltas, detección de
especificaciones y comercio electrónico

Applications of Petri Nets

Diagnosis, Specification
Detection and E-Commerce



Karen Hernández Rueda
María Elena Meda Campaña
Juan Carlos González Castolo
Silvia Ramos Cabral

Editora jefe	
Prof ^a Dr ^a Antonella Carvalho de Oliveira	
Editora ejecutiva	
Natalia Oliveira	
Asistente editorial	
Flávia Roberta Barão	
Bibliotecario	
Janaina Ramos	2025 por Atena <i>Editora</i>
Proyecto gráfico	Copyright © Atena Editora
Luiza Alves Batista	Copyright do texto © 2025 El autor
Nataly Evilin Gayde	Copyright de la edición © 2025 Atena
Thamires Camili Gayde	Editora
Imágenes de portada	Derechos de esta edición concedidos a
iStock	Atena Editora por el autor.
Edición de arte	Open access publication by Atena
Luiza Alves Batista	Editora



Todo el contenido de este libro tiene una licencia de Creative Commons Attribution License. Reconocimiento-No Comercial-No Derivados 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

El contenido del texto y sus datos en su forma, corrección y confiabilidad son de exclusiva responsabilidad del autor, y no representan necesariamente la posición oficial de Atena Editora. Se permite descargar la obra y compartirla siempre que se den los créditos al autor, pero sin posibilidad de alterarla de ninguna forma ni utilizarla con fines comerciales.

Los manuscritos nacionales fueron sometidos previamente a una revisión ciega por pares por parte de miembros del Consejo Editorial de esta editorial, mientras que los manuscritos internacionales fueron evaluados por pares externos. Ambos fueron aprobados para su publicación en base a criterios de neutralidad académica e imparcialidad.

Atena Editora se compromete a garantizar la integridad editorial en todas las etapas del proceso de publicación, evitando plagios, datos o entonces, resultados fraudulentos y evitando que los intereses económicos comprometan los estándares éticos de la publicación. Las situaciones de sospecha de mala conducta científica se investigarán con el más alto nivel de rigor académico y ético.

Consejo Editorial

Ciencias Humanas y Sociales Aplicadas

Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva – Universidade para o Desenvolvimento do Alto Vale do Itajaí

Prof. Dr. Alexandre de Freitas Carneiro – Universidade Federal de Rondônia

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Profª Drª Aline Alves Ribeiro – Universidade Federal do Tocantins
Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Ana Maria Aguiar Frias – Universidade de Évora
Profª Drª Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa
Prof. Dr. Antonio Carlos da Silva – Universidade de Coimbra
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Arnaldo Oliveira Souza Júnior – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Caroline Mari de Oliveira Galina – Universidade do Estado de Mato Grosso
Prof. Dr. Christopher Smith Bignardi Neves – Universidade Federal do Paraná
Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Daniel Richard Sant'Ana – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo
Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Eufemia Figueroa Corrales – Universidad de Oriente: Santiago de Cuba
Profª Drª Fernanda Pereira Martins – Instituto Federal do Amapá
Profª Drª Geuciane Felipe Guerim Fernandes – Universidade Estadual de Londrina
Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Jadilson Marinho da Silva – Secretaria de Educação de Pernambuco
Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
Prof. Dr. Joachin de Melo Azevedo Sobrinho Neto – Universidade de Pernambuco
Prof. Dr. João Paulo Roberti Junior – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Jodeylson Islony de Lima Sobrinho – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof. Dr. José Luis Montesillo-Cedillo – Universidad Autónoma del Estado de México
Profª Drª Juliana Abonizio – Universidade Federal de Mato Grosso
Prof. Dr. Julio Cândido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof. Dr. Kárpio Márcio de Siqueira – Universidade do Estado da Bahia
Profª Drª Kátia Farias Antero – Faculdade Maurício de Nassau
Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal do Paraná
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Profª Drª Lisbeth Infante Ruiz – Universidad de Holguín
Profª Drª Lucicleia Barreto Queiroz – Universidade Federal do Acre
Prof. Dr. Lucio Marques Vieira Souza – Universidade do Estado de Minas Gerais
Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
Profª Drª Marcela Mary José da Silva – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
Profª Drª Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Profª Drª Marianne Sousa Barbosa – Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Miguel Rodrigues Netto – Universidade do Estado de Mato Grosso
Profª Drª Mônica Aparecida Bortolotti – Universidade Estadual do Centro Oeste do Paraná
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Pedro Henrique Máximo Pereira – Universidade Estadual de Goiás
Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro Oeste
Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Vanesa Bárbara Fernández Bereau – Universidad de Cienfuegos
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Vanessa Freitag de Araújo – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Federal da Bahia
Universidade de Coimbra
Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Aplicaciones de las redes de Petri: diagnóstico de faltas, detección de especificaciones y comercio electrónico

Autores: Karen Hernández Rueda
María Elena Meda Campaña
Juan Carlos González Castolo
Silvia Ramos Cabral

Revisión: Los autores

Diagramación: Camila Alves de Cremo

Corrección: Jeniffer dos Santos

Indexación: Amanda Kelly da Costa Veiga

Datos de catalogación en publicación internacional (CIP)

A642 Aplicaciones de las redes de Petri: diagnóstico de faltas, detección de especificaciones y comercio electrónico / Karen Hernández Rueda, María Elena Meda Campaña, Juan Carlos González Castolo, et al.; Coordinadora Karen Hernández Rueda. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2025.

Otro autor
Silvia Ramos Cabral

Formato: PDF
Requisitos del sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acceso: World Wide Web
Incluye bibliografía
ISBN 978-65-258-3308-8
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.088252404>

1. Redes de Petri, diagnóstico de faltas, detección, especificaciones, comercio electrónico. I. Hernández-Rueda, Karen. II. Meda-Campaña, María Elena. III. González-Castolo, Juan Carlos IV. Hernández-Rueda, Karen (Coordinadora). V. Título.

CDD 004.21

Preparado por Bibliotecario Janaina Ramos - CRB-8/9166

Atena Editora

Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARACIÓN DEL AUTOR

Para efectos de esta declaración, el término 'autor' se utilizará de forma neutral, sin distinción de género o número, salvo que se indique lo contrario. De esta misma forma, el término 'obra' se refiere a cualquier versión o formato de creación literaria, incluidos, pero no limitando a artículos, e-books, contenidos en línea, de acceso abierto, impresos y/o comercializados, independientemente del número de títulos o volúmenes. El autor de esta obra: 1. Atestigua que no tiene ningún interés comercial que constituya un conflicto de intereses en relación con la obra publicada; 2. Declara que participó activamente en la elaboración de la obra, preferentemente en: : a) Concepción del estudio, y/o adquisición de datos, y/o análisis e interpretación de datos; b) Preparación del artículo o revisión con el fin de que el material sea intelectualmente relevante; c) Aprobación final de la obra para su presentación; 3. Certifica que la obra publicada está completamente libre de datos y/o resultados fraudulentos; 4. Confirma la citación y referencia correcta de todos los datos e interpretaciones de datos de otras investigaciones; 5. Reconoce haber informado todas las fuentes de financiamiento recibidas para realizar la investigación; 6. Autoriza la edición de la obra, que incluye registros de la ficha catalográfica, ISBN, DOI y otros indexadores, diseño visual y creación de portada, maquetación del núcleo, así como su lanzamiento y difusión según los criterios de Atena Editora.

DECLARACIÓN DE LA EDITORIAL

Atena Editora declara, para todos los efectos legales, que: 1. La presente publicación sólo constituye una cesión temporal de los derechos de autor, del derecho de publicación, y no constituye responsabilidad solidaria en la creación de la obra publicada, en los términos de la Ley de Derechos de Autor (Ley 9610/98), del art. 184 del Código Penal y del art. 927 del Código Civil; 2. Autoriza e incentiva a los autores a firmar contratos con repositorios institucionales, con el fin exclusivo de divulgar la obra, siempre que se reconozca debidamente la autoría y edición y sin ningún fin comercial; 3. La editorial puede poner la obra a disposición en su sitio web o aplicación, y el autor también puede hacerlo a través de sus propios medios. Este derecho solo se aplica en caso de que la obra no se comercialice a través de librerías, distribuidores o plataformas asociadas. Cuando la obra se comercialice, los derechos de autor se cederán al autor al 30% del precio de cubierta de cada ejemplar vendido; 4. Todos los miembros del consejo editorial son doctores y están vinculados a instituciones públicas de educación superior, conforme a lo recomendado por CAPES para la obtención del libro Qualis; 5. De conformidad con la Ley General de Protección de Datos (LGPD), la editorial no cede, comercializa o autoriza el uso de los nombres y correos electrónicos de los autores, ni ningún otro dato sobre los mismos, para cualquier finalidad que no sea la divulgación de esta obra.

APLICACIONES DE LAS REDES DE PETRI: DIAGNÓSTICO DE FALTAS, DETECCIÓN DE ESPECIFICACIONES Y COMERCIO ELECTRÓNICO

PETRI NETS APPLICATIONS: FAULT DIAGNOSIS, SPECIFICATIONS DETECTION AND E-COMMERCE

Autores

Authors

Karen Hernández Rueda

María Elena Meda Campaña

Juan Carlos González Castolo

Silvia Ramos Cabral

APLICACIONES DE LAS REDES DE PETRI: DIAGNÓSTICO DE FALTAS, DETECCIÓN DE ESPECIFICACIONES Y COMERCIO ELECTRÓNICO

PETRI NETS APPLICATIONS: FAULT DIAGNOSIS, SPECIFICATIONS DETECTION AND E-COMMERCE

CUERPOS ACADÉMICOS

ACADEMIC GROUPS

UDG-CA-931 Educación, Tecnologías e Innovación Universidad de Guadalajara
UDG-CA-649 e-World y Gestión del Conocimiento Universidad de Guadalajara

COORDINADOR

COORDINATOR

Karen Hernández Rueda

PRESENTACIÓN

Las Redes de Petri, introducidas por Carl Adam Petri en 1962, han evolucionado significativamente desde su concepción original como herramienta gráfica para modelar sistemas distribuidos. Este libro, “*Aplicaciones de las Redes de Petri: Diagnóstico de Faltas, Detección de Especificaciones y Comercio Electrónico*”, reúne una serie de investigaciones que exploran las aplicaciones de las RP en diversos campos.

Desde el control de procesos hasta la ingeniería de software y el comercio electrónico, las RP han demostrado ser una herramienta invaluable para el modelado y la simulación de sistemas complejos. Este libro se divide en secciones que abordan los antecedentes teóricos de las RP, su aplicación en el diagnóstico de fallas, la detección de especificaciones y el modelado de transacciones en comercio electrónico.

Cada capítulo ofrece una combinación de teoría, metodología y resultados prácticos, proporcionando al lector una comprensión profunda y aplicada de cómo las RP pueden ser utilizadas para resolver problemas reales en sistemas concurrentes y distribuidos. A través de estudios de caso y ejemplos detallados, los autores muestran cómo las RP pueden ser utilizadas para mejorar la eficiencia y la fiabilidad de diversos sistemas.

Esperamos que este libro no solo sirva como una guía práctica para investigadores y profesionales en el campo, sino también como una fuente de inspiración para nuevas aplicaciones y desarrollos futuros en el uso de las Redes de Petri.

Karen Hernández Rueda
Coordinador

PRESENTATION

Petri Nets, introduced by Carl Adam Petri in 1962, have evolved significantly from their original conception as a graphical tool for modeling distributed systems. This book, *“Applications of Petri Nets: Fault Diagnosis, Specification Detection, and E-Commerce,”* brings together a series of research studies that explore the applications of PN in various fields.

From process control to software engineering and e-commerce, PN have proven to be an invaluable tool for modeling and simulating complex systems. This book is divided into sections that address the theoretical background of PN, their application in fault diagnosis, specification detection, and transaction modeling in e-commerce.

Each chapter offers a combination of theory, methodology, and practical results, providing the reader with a deep and applied understanding of how PN can be used to solve real-world problems in concurrent and distributed systems. Through case studies and detailed examples, the authors demonstrate how PN can be used to improve the efficiency and reliability of various systems.

We hope that this book not only serves as a practical guide for researchers and professionals in the field but also as a source of inspiration for new applications and future developments in the use of Petri Nets.

Karen Hernández Rueda
Coordinator

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
INTRODUCTION.....	1
ANTECEDENTES DE REDES DE PETRI	4
PETRI NETS BACKGROUND	4
INTRODUCCIÓN	4
REDES DE PETRI	5
REDES DE PETRI INTERPRETADAS	7
DIAGNÓSTICO DE FALTAS CON REDES DE PETRI INTERPRETADAS.....	11
FAULT DIAGNOSIS USING INTERPRETED PETRI NETS	11
INTRODUCCIÓN	11
MARCO TEÓRICO.....	13
METODOLOGÍA	21
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
CONCLUSIONES.....	25
DETECCIÓN DE ESPECIFICACIONES UTILIZANDO REDES DE PETRI INTERPRETADAS	28
DETECTION OF SPECIFICATIONS USING INTERPRETED PETRI NETS.....	28
INTRODUCCIÓN	28
MARCO TEÓRICO.....	29
METODOLOGÍA	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
CONCLUSIONES.....	40
MODELADO DE TRANSACCIONES DEL COMERCIO ELECTRÓNICO CON REDES DE PETRI INTERPRETADAS	43
MODELING E-COMMERCE TRANSACTIONS WITH INTERPRETED PETRI NETS	43
INTRODUCCIÓN	43
MARCO TEÓRICO.....	45
METODOLOGÍA	49
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
CONCLUSIONES.....	66
CONCLUSIONES	71
CONCLUSIONS	71

INTRODUCCIÓN

Las Redes de Petri (RP) fueron introducidas por Carl Adam Petri en su tesis doctoral en 1962, titulada “Kommunikation mit Automaten” (Comunicación con Autómatas). Petri desarrolló este formalismo con el objetivo de proporcionar un modelo matemático y gráfico que pudiera describir la comunicación y sincronización en sistemas concurrentes (Petri, 1962; Ramchandani, 1974).

Las RP surgieron a inicios de los años 60 como una herramienta gráfica para modelar sistemas distribuidos (Ávila Vázquez, 2019) y se propusieron para el análisis de algoritmos en la computación, pero en la actualidad se usan para el modelado de diferentes sistemas, incluidos tanto de procesos como el control de estos.

Las RP son ampliamente aceptadas por sus técnicas de análisis y síntesis, representan naturalmente tanto el comportamiento como la estructura del sistema, y permite modelar ciertas condiciones que en un sistema real son difíciles de lograr o resultan muy costosas, es decir, son muy útiles para la modelación y simulación de sistemas complejos (Peterson, 1981). Como herramienta matemática (Murata, 1989; David, y Alla, 2005) es posible establecer ecuaciones de estado, ecuaciones algebraicas y otros modelos matemáticos que rigen el comportamiento de los sistemas. Las RP cubren una amplia gama de aplicaciones que incluye Protocolos de Comunicación (Sreenivas y Krogh, 1991), Sistemas de Manufactura (Zurawski y Zhou, 1994), entre otros.

Varios autores (Murillo-Soto, 2018; Mantulak, 2022; Vega-de la Cruz, et al., 2020; Hernández Pérez et al., 2019; Michalus et al., 2015; Cabac et al., 2018; Batista Rodríguez, 2017; Morales et al., 2015; Latorre-Biel et al., 2022; Guevara-Ortega y Rodríguez-Urrego, 2017,) han mencionado sus aplicaciones como en Diagnóstico de Fallos, Flujo de Trabajo, Ingeniería de Software, Control de Procesos y toma de Decisiones, Concurrencia, Cadenas de Suministros, entre otros.

En particular, en este libro se presentan trabajos de investigación de las aplicaciones en el diagnóstico de faltas operacionales, en la detección de especificaciones de identificación, y en el modelado del comercio electrónico. Sin embargo, primeramente, se dan antecedentes de las RP y posteriormente, se presentan las investigaciones de las aplicaciones mencionadas, y al final se presentan las conclusiones.

INTRODUCTION

Petri Nets (PN) were introduced by Carl Adam Petri in his doctoral thesis in 1962, titled “Kommunikation mit Automaten” (Communication with Automata). Petri developed this formalism with the aim of providing a mathematical and graphical model that could describe communication and synchronization in concurrent systems (Petri, 1962; Ramchandani, 1974).

PN were initially applied in the early 1960s as a graphical tool for modeling distributed systems (Ávila Vázquez, 2019) and were proposed for the analysis of algorithms in computing, but nowadays they are used for modeling different systems, including both processes and their control.

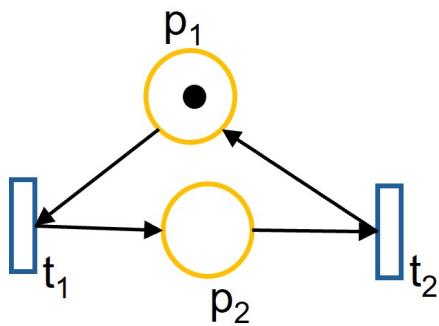
PN are widely accepted for their analysis and synthesis techniques, they naturally represent both the behavior and the structure of the system and allow modeling certain conditions that in a real system are difficult to achieve or are very costly, i.e., they are very useful for modeling and simulation of complex systems (Peterson, 1981). As a mathematical tool (Murata, 1989; David, y Alla, 2005) it is possible to establish equations of state, algebraic equations and other mathematical models that govern the behavior of systems. These cover a wide range of applications including Communication Protocols (Sreenivas y Krogh, 1991), Manufacturing Systems (Zurawski y Zhou, 1994), among others.

Several authors (Mantulak, 2022; Vega-de la Cruz, et al., 2020; Hernández Pérez et al., 2019; Michalus et al., 2015; Cabac et al., 2018; Batista Rodríguez, 2017; Morales et al., 2015; Latorre-Biel et al., 2022; Guevara-Ortega y Rodríguez-Urrego, 2017) have mentioned their applications such as in Fault Diagnosis, Workflow, Software Engineering, Process Control, Concurrency, Supply Chains, among others.

This book presents research works on applications in the diagnosis of operational faults, in the detection of identification specifications, and in e-commerce modeling. However, first, background information on PN is given, and then research on the mentioned applications is presented, followed by conclusions.

REDES DE PETRI

PETRI NETS



ANTECEDENTES DE REDES DE PETRI

PETRI NETS BACKGROUND

RESUMEN

En este capítulo, primero se introducen los conceptos básicos de Redes de Petri (RP) y Redes de Petri Interpretadas (RPI) que son utilizadas en las aplicaciones que se abordan a lo largo del libro. Un lector interesado puede consultar las referencias (Cabasino M.P., Giua A. & Seatzu C., 2013) y (Seatzu C. et al, 2013) para más información.

PALABRAS CLAVE: Redes de Petri, Redes de Petri Interpretadas.

ABSTRACT

In this chapter, the basic concepts of Petri Nets (PNs) and Interpreted Petri Nets (IPNs) used in the application that are addressed through the book. An interested reader can refer to references (Cabasino M.P., Giua A. & Seatzu C., 2013) and (Seatzu C. et al, 2013) for more information.

KEYWORDS: Petri Nets, Interpreted Petri Nets.

INTRODUCCIÓN

Las Redes de Petri (RP) son una herramienta que permite modelar el comportamiento y la estructura de un sistema, en particular, de sistemas que evolucionan de un estado a otro con la ocurrencia de eventos (sucesos que representan transiciones de estado) discretos asíncronos a lo largo del tiempo, como los sistemas de manufactura, protocolos de comunicación, tráfico, entre otros (Wonham, 2015). A estos sistemas se les conoce como Sistemas de Eventos Discretos (SED), en la figura 1 se puede ver un ejemplo con un modelo de colas que representa la configuración de un sistema informático común (Cassandras & Lafortune, 2008). En este sistema, los trabajos llegan a la cola del CPU y una vez servidos por la CPU salen o solicitan acceso a uno de los dos discos (D1, D2). Luego vuelven para ser servidos de nuevo en la CPU. El conjunto de eventos consiste normalmente en llegadas y salidas de los distintos servidores, y una posible representación del estado del sistema corresponde a las tres longitudes de cola en la CPU y los discos D1 y D2.

El modelo se puede ejecutar para analizar eventos críticos del sistema, es decir, simular las condiciones límites para determinar problemas que pueden surgir, determinar errores, establecer condiciones de control, entre otras cosas, que sería difícil de lograr con otras herramientas. Además, comparadas con otros modelos gráficos, como los automátas finitos (AF), se evitan problemas de explosión de estados, es decir, el número de estado del sistema tiene un crecimiento exponencial respecto de la carga del sistema (Ramirez-Treviño, 2012). Asimismo, ofrecen una opción confiable para representar procesos síncronos y hacer un análisis formal del sistema modelado (Vega de la Cruz et al., 2016).

En las siguientes líneas se describen tanto las RP como las Redes de Petri Interpretadas, otras clases de RP.

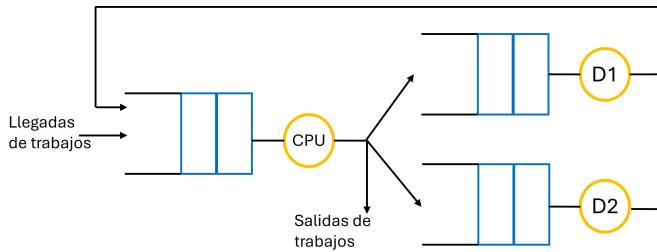


Figura 1. Ejemplo de un SED. Fuente (Cassandras and Lafortune, 2018).

REDES DE PETRI

Una RP consiste en una estructura de red (un dígrafo bipartito), una descripción de estados (marcado) y una regla de transición (regla de marcado). Una RP es representada por dos clases de vértices (figura 2): círculos y barras. Los círculos representan lugares (p_1, p_2) que se asocian a acciones o salidas de un sistema que pueden ser modeladas (Murata, 1989). Las barras representan transiciones (t_1, t_2) las cuales se asocian a eventos y acciones o salidas. Un lugar de entrada p_1 es un lugar cuyo arco sale de p_1 , y entra a una transición t_1 (una transición cualquiera t_1), y a su vez, se considera lugar de salida de la transición t_2 porque sale un arco de esta transición y entra a p_2 . Los lugares pueden estar marcados o no (tener puntos negros dentro de los lugares) como lo tiene el lugar p_1 para describir un estado de la red. Un marcado inicial ($M(p_1)=1$) es una distribución inicial de marcas o tokens. La presencia o ausencia de la marca puede indicar si la condición asociada a los lugares es verdadera o falsa. En cualquier momento dado, la distribución de marcas en lugares se denomina marcado. El marcado define el estado actual del sistema modelado.

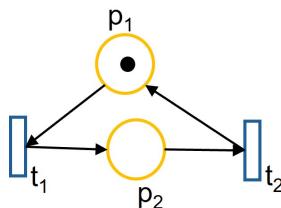


Figura 2. Red de Petri. Fuente propia.

La RP pueden utilizarse para simular el comportamiento dinámico de un sistema, SED en este caso, y su marcado cambia según la siguiente regla de disparo (Cabasino et al., 2013):

- se dice que una transición t está habilitada si cada lugar de entrada p de t está marcado con al menos $w(p,t)$ tokens, donde $w(p,t)$ es el peso del arco de p a t ,

- b. una transición habilitada puede o no dispararse (dependiendo de si el evento relacionado con t realmente tiene lugar o no), y
- c. el disparo de una transición activada t elimina $w(p,t)$ marcas o tokens de cada lugar de entrada p de t , y añade $w(t,p)$ marcas o tokens a cada lugar de salida p de t , donde $w(p,t)$ es el peso del arco de t a p .

En la figura 2, t_1 se considera habilitada, es decir, se puede disparar porque su lugar de entrada p_1 tiene una marca. Caso contrario a t_2 que se considera no habilitada porque su lugar de entrada p_2 no tiene una marca. El peso de los arcos en este caso se considera de uno, lo que significa que no puede eliminarse o agregarse más de una marca o token a los lugares cuando se dispara cualquier transición.

La definición formal de RP se presenta a continuación (Hernández-Rueda & Medina-Campa, 2015).

Definiciones de Redes de Petri

Definición 1. Una estructura G de una RP es un dígrafo bipartito definido por la 4-tupla $G=(P,T,I,O)$, donde $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ son conjuntos finitos de lugares y transiciones respectivamente, tal que $P \cap T = \emptyset$ y $P \cup T = \emptyset$. $I: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ y $O: P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ son las funciones de entrada y salida que describen los arcos que van de los lugares a las transiciones y de las transiciones a los lugares respectivamente.

Definición 2. Un marcado es una función $M: P \rightarrow \{0, 1, 2, 3, \dots\}$ que asigna a cada lugar un numero entero no negativo, nombrado como el número de marcas que residen dentro de cada lugar. M_0 es la distribución inicial de marcado.

Definición 3. Una RP N es una estructura G junto con un marcado inicial, esto se denota como $N=(G, M_0)$.

La matriz de incidencia C de $n \times m$ de N está definida por $C[i,j] = O(t_j, p_i) - I(p_i, t_j)$. La notación $\bullet t = \{p | I(p, t) \neq 0\}$, $t\bullet = \{p | O(p, t) \neq 0\}$, $\bullet p = \{t | O(p, t) \neq 0\}$ y $p\bullet = \{t | I(p, t) \neq 0\}$ representa los lugares de entrada y de salida de t , y las transiciones de entrada y de salida de p respectivamente. La figura 3 muestra la matriz de incidencia (C) y el marcado inicial (M_0) de la RP de la figura 2.

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{o} \quad M_0 = [1 \quad 0]^\top$$

Figura 3. Matriz de incidencia y marcado inicial de la RP de figura 2. Fuente propia.

Definición 4. Sea N una RP. Los vectores X_i tal que $CX_i = 0$, $X_i \geq 0$ son conocidos como T-semiflujos. El soporte de un T-semifljo X_p , denotado por $\text{á}X\text{ñ}$, es el conjunto de transiciones $T_p = \{t | X_p(t) > 0\}$. La subred $T_i = \{(P_i, T_i, I_i, O_i, M_{0i})\}$ de N generada por el T-semifljo X_i es una T-componente si $P_i = (\text{á}X\text{ñ} \cap \text{á}X\text{ñ})$, $T_i = \text{á}X\text{ñ}$; I_i , O_i y M_{0i} son las funciones de entrada y salida, y el marcado inicial restringido a P_i y T_i respectivamente.

De acuerdo con las reglas de evolución de mercado descritas previamente, una transición t_j se dice que está habilitada en el marcado M_k si este tiene $M_k(p_j) \geq l(p_j, t_j)$ marcas en cada lugar p_j de entrada a t_j . Una transición habilitada t_j se puede disparar, remueve $l(p_j, t_j)$ marcas de p_j y añade $O(t_j, p_k)$ marcas a p_k produciendo un nuevo marcado M_{k+1} (representado por $M_k \xrightarrow{t_j} M_{k+1}$) que puede ser calculado usando la ecuación de estado $M_{k+1} = M_k + C \vec{t}_j$ donde C es la matriz de incidencia y $\vec{t}_j(i) = 1$ si $i=j$ y $\vec{t}_j(i) = 0$ en cualquier otro caso.

Observe que $M_0 \xrightarrow{\vec{t}_j} M_1$ puede ser extendido a una secuencia de transiciones $M_0 \xrightarrow{\sigma} M_q$ donde $\sigma = t_a t_b \dots t_r$. En este caso M_q se dice que es alcanzable desde M_0 . El conjunto de alcanzabilidad de N , denotado por $R(G, M_0)$, es el conjunto de todos los posibles marcados alcanzables desde M_0 , disparando solamente las transiciones habilitadas.

Definición 5. Una RP N es viva (o equivalentemente M_0 es un marcado de N vivo) si, a partir de cualquier marcado alcanzado desde M_0 , es posible disparar de última instancia cualquier transición de N al progresar a través de alguna secuencia de disparo adicional. Una transición $t_k \in T$ es *esta viva*, para un marcado M_0 , si $\forall M_k \in R(G, M_0) \exists M_n \in R(G, M_0)$ tal que t_k es habilitada ($M_n \rightarrow t_k$). Una RP está viva si todas sus transiciones son vivas.

Definición 6. Una RP N es k -segura si $\forall M \in R(N, M_0)$ y $\forall p \in P$, $M(p) \leq k$. Si se cumple que $\forall M \in R(N, M_0)$ y $\forall p \in P$, $M(p) \leq 1$, la red es llamada 1-segura (segura o binaria).

De la misma forma, se dice que una RP es llamada 1-acotada para un marcado M_0 , si $\forall p_i \in P$ y $\forall M_j \in R(G, M_0)$, se tiene que $M_j(p_i) \leq 1$.

Definición 7. Una RP N es fuertemente-conexa para cualesquiera dos nodos de la red X, Y (lugares o transiciones) de la red si existe un camino de X a Y y de Y a X .

Definición 8. Un sifón (o cerrojo) es un subconjunto de lugares $S = \{p_1, \dots, p_s\} \subseteq P$ de una RP tal que $\bullet S \subset S \bullet$.

Definición 9. Una secuencia de transiciones de disparo en una RP N es una secuencia $\sigma = t_1 t_2 \dots t_k \dots$ tal que $M_0 \xrightarrow{t_1} M_1 \xrightarrow{t_2} M_2 \dots M_w \xrightarrow{t_k} \dots$

REDES DE PETRI INTERPRETADAS

Una Red de Petri Interpretada (RPI) es una extensión de la RP basada en las señales de entrada y salida. RPI es una RP que incluye alfabetos de entrada y de salida que están asociados con las transiciones y lugares de la RP, respectivamente. Esta puede modelar las secuencias de comandos dadas por las señales de actuadores y sensores cada vez que se alcanza un nuevo estado (Ruiz-Beltrán et al., 2014). Gráficamente una RPI distingue dos tipos de lugares, medible (círculo transparente) representado en la figura 3 por el lugar p_1 , y no medible (círculos relleno u oscuro) simbolizado por el lugar p_2 . Las transiciones también se consideran como manipulable (barra transparente o no rellena) como t_1 o no manipulable (barra llena u oscura) como t_2 que suele etiquetarse con el símbolo ε , esto significa que no podemos saber si t_2 fue o no disparada. φ representa una función de salida, λ es una función de etiqueta, a , es un símbolo de entrada y h , representa un sensor.

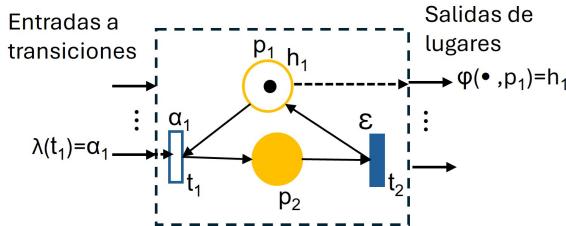


Figure 3. Red de Petri Interpretada. Fuente propia.

Definiciones de Redes de Petri Interpretadas

Definición 10. Una RPI es una 4-tupla $Q=(N,\Sigma,\lambda,\varphi)$ donde $N=(G,M_0)$ es una RP, $\Sigma=\{a_1, a_2, \dots, a_r\}$ es el alfabeto de salida de la red y a_i es un símbolo de salida, $\lambda: T \rightarrow \Sigma \cup \{\varepsilon\}$ es una función de etiqueta de transiciones con símbolos de entrada con la siguiente restricción: $\forall t_j, t_k \in T, j \neq k$, si $\forall p_j \quad l(p_j, t_j) = l(p_j, t_k) \neq 0$ y ambos $\lambda(t_j) \neq \varepsilon, \lambda(t_k) \neq \varepsilon$, entonces $\lambda(t_j) \neq \lambda(t_k)$. En este caso ε representa un evento incontrolable del sistema. Y φ es una función de salida representada por un matriz $\varphi = [\varphi_{ij}]$ de $q \times n$ tal que $y_k = M_k$ es el mapeo del marcado M_k en un vector de observación q -dimensional o la salida de la RPI. La columna $\varphi(\bullet, i)$ es el vector elementario e_i si el lugar p_i tiene asociado la señal del sensor h (todas sus entradas iguales a 0, excepto la h); o es un vector nulo (todas sus entradas iguales a 0) si p_i no tiene asociado una señal sensor. En el documento se usan los símbolos φ y Φ , indistintamente, es decir, son iguales.

Definición 11. Una transición $t_j \in T$ de una RPI está habilitada en marcado M_k si $\forall p_i \in P, M_k(p_i) > l(p_i, t_j)$. Una transición habilitada t_j , etiquetada con otro el símbolo diferente de ε (vacío o silencioso), puede ser disparado cuando $\lambda(t_j)$ está activada. Una transición t_j etiquetada con el símbolo ε puede ser disparada. Cuando una transición habilitada t_j se dispara en un marcado M_k , entonces se alcanza un nuevo marcado M_{k+1} . Este hecho es representado como $M_k \xrightarrow{t_j} M_{k+1}$; M_{k+1} puede calcularse usando la parte dinámica del sistema de la ecuación de estados representada por $M_{k+1} = M_k + Cv_k$ y $y_k = \varphi M_k$.

Definición 12. Una secuencia de transiciones de disparo de una RPI (Q, M_0) o Q es una secuencia $\sigma = t_i t_j \dots$ tal que $M_0 \xrightarrow{t_i} M_1 \xrightarrow{t_j} \dots$ El conjunto de todas las secuencias de disparo $\mathcal{L}(Q)$, es nombrado lenguaje de disparo de (Q) . $\mathcal{L}(Q) = \{\sigma | \sigma = t_i t_j \dots \text{ donde } M_0 \xrightarrow{t_i} M_1 \xrightarrow{t_j} \dots\}$.

Definición 13. Una secuencia de vectores de observación (símbolos de salida) de Q es una secuencia $\omega = (y_0) (y_1) \dots (y_n)$, donde $y_k = \varphi M_k$ y $y_i \neq y_{i+1}$. Si ω es una secuencia de símbolos de salida, entonces el conjunto de secuencia de transiciones de disparo $\sigma \in \mathcal{L}(Q)$ cuyo disparo genera la secuencia de salida ω se representa por $\Omega(\omega)$.

Definición 14. Sea (Q) una RPI. El conjunto $\Lambda(Q)$ denota todas las secuencias de símbolos de salida de (Q) . El conjunto de todas las secuencias de longitud $\geq k$ será denotado por $\Lambda^k(Q)$, es decir, $\Lambda^k(Q) = \{\omega \in \Lambda(Q) | |\omega| \geq k\}$.

Definición 15. El conjunto de todas las secuencias de salida que conducen a una marca final en la RPI (Q) es denotada por $\Lambda_B(Q)$, es decir, $\Lambda_B(Q) = \{\omega \in \Lambda(Q) \mid \exists \sigma \in \Omega(\omega) \text{ tal que } M_0 \xrightarrow{\omega} M_j \text{ y } M_j \text{ no habilita ninguna transición, o cuando } M_j \text{ habilita } t_j(M_0 \xrightarrow{t_j})\}$ entonces $C(\bullet, t_j) = \bar{0}$.

Algunas RP se consideran discretas (en la que los disparos de las transiciones y lugares se consideran valores no negativas) y otras continuas (los disparos de las transiciones y lugares pueden ser valores reales), particularmente en este libro se usan las RP discretas.

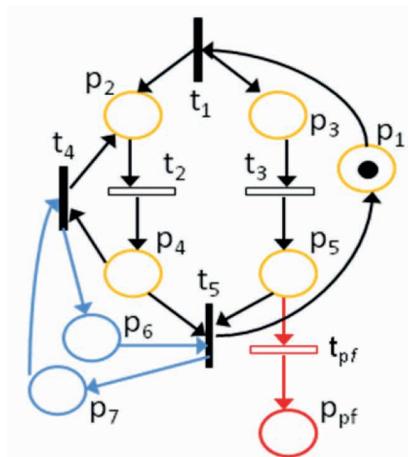
En los siguientes capítulos se presentan algunas de las aplicaciones de RPI; primero aplicadas al diagnóstico de faltas, luego aplicadas a la detección de especificaciones y finalmente, aplicadas al comercio electrónico.

REFERENCIAS

- Cabasino M. P., Giua A. & Seatzu C. (2013). Petri Nets. En C. Seatzu, M. Silva & J.H. van Schuppen (Eds), Control of Discrete Event Systems (pp. 191-232). London, New York: Springer.
- Cassandras C. G. & Lafortune S. (2008). Introduction to Discrete Event Systems. New York, USA: Springer Editorial, second edition.
- Hernández-Rueda, K. and Meda-Campaña, M. E. (2015). Fault Diagnosis in Discrete Events Systems Not Diagnosable. *Memoria Electro*, 1(35), pp. 141-146.
- Murata, T. (1989). Petri nets: Properties, analysis and applications. Proceedings of the IEEE, 77(4), ISSN: 0018-9219, 541-580.
- Ramírez-Treviño A., Ruiz-Beltrán E., Arámburo-Lizárraga J. & López-Mellado E. (2012). Structural Diagnosability of DES and Design of Reduced Petri Net Diagnosers. IEEE Transaction on Systems, MAN and Cybernetics, 42(2), pp. 416-429.
- Ruiz-Beltrán E., Ramírez-Treviño A. & Orozco-Mora J.L. (2014). En Formal Methods in Manufacturing: Fault Diagnosis in Petri Nets (728). Campos J., Seatzu C. y Xie X. Boca Raton, FL.: CRC Press Taylor-Francis Group. , 41, pp. 553-574.
- Vega de la Cruz, L. O., Lao León, Y. Pérez Pravia, M. (2016). Redes de Petri en la determinación de puntos críticos para el control interno. Universidad y sociedad, (4), ISSN: 2238-3620 <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/533>
- Wonham W. M. (2015). Supervisory Control of Discrete Event Systems. En J. Baillieul, T. Samad (Eds), Encyclopedia of Systems and Control (pp.1396-1404). London, N.Y: Springer-Verlag.

DIAGNÓSTICO DE FALTAS

FAULT DIAGNOSIS



DIAGNÓSTICO DE FALTAS CON REDES DE PETRI INTERPRETADAS

FAULT DIAGNOSIS USING INTERPRETED PETRI NETS

RESUMEN

En la actualidad el diagnóstico de faltas debe incluirse en los sistemas para incrementar su confiabilidad porque cada vez son grandes y complejos. Si un componente se rompe o deja de funcionar como debiera (falta) y no se detecta a tiempo, puede provocar daños materiales o comprometer la seguridad de operadores. El objetivo es evitar esas situaciones, en especial para los sistemas que, por su estructura y diseño, no pueden detectar y localizar las faltas en un tiempo determinado porque no son diagnosticables. En este trabajo se presenta una opción de diagnóstico de faltas operacionales de un Sistema de Eventos Discretos no diagnosticable a través de un Circuito de Regulación Inteligente que forza su diagnosticabilidad. Como antecedente, este circuito funciona para el diagnóstico de faltas permanentes de sistemas no diagnosticables, asimismo, no modifica la forma de operar del sistema como lo hacen otros diagnositicadores. El resultado muestra que es posible diagnosticar faltas operacionales con este circuito, pero que se deben hacer adecuaciones.

PALABRAS CLAVE: Diagnóstico de faltas, Redes de Petri Interpretadas, Faltas Operacionales, Circuito de Regulación, Forzar el Diagnóstico.

ABSTRACT

Nowadays, fault diagnosis must be included in the systems to increase their reliability because they are becoming larger and more complex. If a component breaks or stops working as it should (fault) and is not detected in time, it can cause material damage or compromise the safety of operators. The objective is to avoid such situations, especially for systems that, due to their structure and design, cannot detect and locate faults in each time because they are not diagnosable. This paper presents a fault diagnosis option, in particular, operational faults, through an Intelligent Regulation Circuit that forces a system to be diagnosable and that works in the permanent faults diagnosis, also, it does not modify the way systems operate as other diagnosers do. The result shows that it is possible to diagnose operational faults with this circuit, but that adjustment must be made.

KEYWORDS: Fault diagnosis, Interpreted Petri Nets, Operational Faults, Regulation Circuits, Enforcing diagnosis.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas se construyen idealmente para que no fallen, pero siempre existen factores externos que pueden causarlo (figura 1) y esto conlleva a que este tenga un comportamiento inesperado, por lo que deben incluirse tareas de detección y localización de faltas para incrementar su confiabilidad.



Figura 1. Accidente de tren en 2023 en Balasore, India. Fuente <https://elpais.com/internacional/2023-06-03/el-accidente-del-tren-de-la-india-en-imagenes.html>.

Uno de los sistemas más utilizados en diversas áreas son los Sistemas de Eventos Discretos (SED), sistemas dinámicos con estados discretos y controlado por eventos (Cassandra C.G & Lafortune S., 2008), esto debido a que permiten modelar e inferir sobre los sistemas grandes y completos reales de diferentes áreas (Ibrahim et al., 2017). Algunos ejemplos de estos sistemas son los de trenes, manufactura, tráfico urbano, redes informáticas, servicios web, entre otros. En estos sistemas generalmente solo se pueden identificar ciertos eventos (denominados parcialmente observables) y a menudo están sujetos a faltas (algunos elementos del sistema no operan bien, pero este funciona bien) que puede ocasionar su falla (el sistema ya no funciona). Estas fallas pueden ocasionar daños materiales y no materiales (figura 1), por lo que es importante su diagnóstico y para ello, es necesario que el sistema sea diagnosticable.

De acuerdo con Hernández-Rueda y Meda-Campaña (2018) “La diagnosticabilidad (la propiedad de que las faltas siempre se pueden detectar e identificar) es una propiedad importante que se desea garantizar y para ello es necesario establecer un método de diagnóstico adecuado porque algunos sistemas no son diagnosticables”. Uno de los métodos de diagnóstico muy utilizados en diversos sistemas tecnológicos es el modelo de eventos discretos (Lafortune et al., 2011) que se usa en este trabajo.

Por otro lado, el diagnóstico se ha estudiado desde diferentes enfoques, por ejemplo, con autómatas finitos (AF) y RP, pero aun es un problema abierto dado que las soluciones proponen algoritmos complejos o solo consideran ciertos sistemas. Lin y Wonham (1998) presentaron uno de los primeros trabajos sobre el diagnóstico de faltas basado en el modelo con el uso de un autómata, este se realiza con el sistema fuera de línea (sistema detenido) a partir de su lenguaje de entrada y de salida sin determinar exactamente el

estado de falta. En el mismo año, Sampath et al. (1995) sugieren un enfoque basado en el lenguaje con el uso de AF para estudiar el comportamiento de faltas, este modela tanto el comportamiento nominal como de falta, y caracteriza la propiedad de diagnosticabilidad, asimismo resuelven problemas de detección y localización de faltas en línea. Doloti et al. (2009) usa un problema de programación entera para determinar la secuencia de eventos que fue dispara para determinar la ocurrencia de una falta. Luego, Basile et al. (2012) usa este enfoque para establecer las condiciones de una diagnosticabilidad acotada y señala la existencia de ciclos no observables que implican la no diagnosticabilidad de un sistema. Asimismo, Ramírez-Treviño et al. (2012) se presenta una caracterización estructural de la propiedad de diagnosticabilidad y un método para diseño de diagnosticadores de modelo reducido para detectar y localizar faltas de SED con el uso de RPI y se introduce el concepto de distancia relativa entre pares de transiciones para establecer las condiciones del diseño. Más tarde Ruiz-Beltrán et al. (2014) se estable que cuando la distancia relativa no es finita no es posible hacer un diagnóstico y con esta, propone algoritmos para determinar la diagnosticabilidad de un SED modelado RPI. Hernández-Rueda et al. (2015) propone un Circuito de Regulación para forzar el diagnóstico de un SED con el uso de la distancia relativa, pero la propuesta limita mucho su funcionamiento. Posteriormente, en (Hernández et al., 2017; Hernández-Rueda y Meda-Campaña, 2018) se propone un Circuito de Regulación Inteligente (CRI) para forzar el diagnóstico del SED no diagnosticables para el diagnóstico de faltas permanentes, este enfoque ya no restringe tanto su desempeño, y no tiene el problema de complejidad computacional como en (Haar et al., 2017; Hu et al., 2019; Ran et al., 2019; Hu et al., 2021) porque el análisis es estructural, pero solo se aplica en faltas permanentes. Por lo que, en este trabajo se muestra la aplicación del CRI a faltas operacionales y se establecen las modificaciones que se deben hacer para que se puedan diagnosticar este tipo de faltas.

En la siguiente sección se presentan los sustentos teóricos necesarios para su comprensión como el modelado de faltas en RPI, la diagnosticabilidad, la definición del CRI y las condiciones de uso, entre otros. Asimismo, se presenta la metodología usada para la aplicación del CRI con las faltas operacionales. Luego se muestran los resultados obtenidos y se discute al respecto. Finalmente, se exponen las conclusiones.

MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan los conceptos y antecedentes del diagnóstico de faltas, faltas modeladas con RPI, diagnosticabilidad y el Circuito de Regulación Inteligente definido con RPI para forzar el diagnóstico.

Diagnóstico de faltas

El diagnóstico de faltas tiene que ver con la detección, localización y aislamiento de faltas. Una falta se considera un comportamiento no deseado del sistema. En la mayoría de los casos, estos comportamientos implican pérdidas humanas o económicas, por lo que es importante contar con un sistema de diagnóstico. Una forma de realizar el diagnóstico se basa en el enfoque del modelo del sistema real, con información a priori representada por algún modelo matemático y/o representación gráfica. Para determinar si el sistema es diagnosticable, es decir, que puede detectar la ocurrencia de faltas en un tiempo finito, es necesario contar con el modelo que represente su comportamiento normal (deseado o especificado) así también como el modelo de las posibles faltas a detectar (comportamiento anormal). El diagnóstico se hace a través de la comparación entre el modelo especificado o normal con respecto al sistema actual del sistema (comportamiento normal más el de faltas) como se muestra en la figura 2. Si existe alguna diferencia entre el modelo del sistema con respecto al actual o real, entonces se dice que existe un error, si este es diferente de cero se dice que existe una falta.

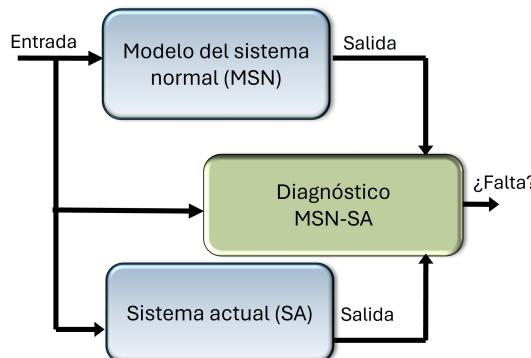


Figura 2. Diagnóstico de faltas. Fuente (Hernández et al., 2017).

Si la falta permite que el sistema siga funcionando y se detecta, es posible repararla para evitar que el sistema falle. De lo contrario, se produce una falla que origina que el sistema se detenga, deja de funcionar, porque el comportamiento del sistema se desvía del especificado (figura 3).

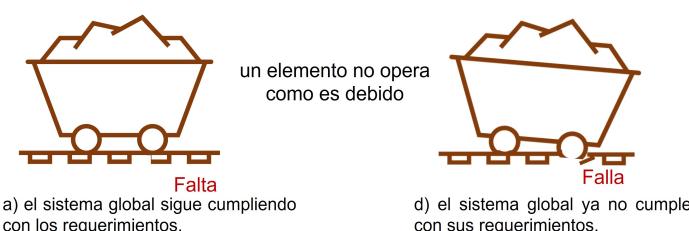


Figura 3. Diferencia entre falta y falla. Fuente propia.

Por lo tanto, una falta es una fuente de un problema que puede producir un error en el comportamiento especificado del sistema, pero aun así el sistema puede seguir operando.

Modelado de las faltas

Las faltas se modelan según su tipo, pueden ser transitorias o permanentes, las primeras son limitadas en el tiempo y se pueden producir por comportamientos erróneos del sistema o interferencias externas, y las segundas tienen una duración mayor a las primeras, por lo que pueden ocasionar que los componentes del sistema dejen de trabajar correctamente. En la figura 4 se representan ambas, la permanente se representa con una transición (f_1) y un lugar adicional a la red, y la transitoria (f_2) con un lugar adicional. La transitoria en este caso se refiere a una falta operacional, es decir, existe cuando el sistema puede pasar de un estado a otro, aunque sea válido, pero sin ejecutar una o más tareas específicas necesarias (Ruiz-Beltrán et al., 2014).

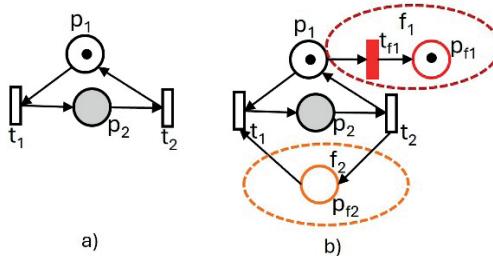


Figura 4. RPI en a) estado normal y b) estado de falta (f_1 permanente y f_2 operacional) más normal.
Fuente propia.

En este trabajo sólo se consideran las faltas operacionales f_i . A continuación, se indica cómo se modelan.

Sea (Q, M_0) una RPI (*Q en delante*) en estado normal, f_i una falta operacional y $\sigma = t_i t_j \dots t_k$ una secuencia de transiciones que representan tareas $t_{i,j}, \dots, t_k$ cuya ejecución puede ser omitida. La falta f_i se incluye en la RPI de la siguiente forma, se agrega una transición no manipulable t_f y arcos desde t_i a t_f y de t_f a t_k , cuando t_f sea disparada, entonces la ejecución de σ es omitida y eso refleja un comportamiento anormal de la RPI (Ruiz-Beltrán et al., 2014).

Por otro lado, es necesario considerar las siguientes notaciones y definición para entender el análisis de diagnóstico de una falta, ya que los lugares y transiciones de la RPI que modela un SED, considera el comportamiento normal y de falta.

El conjunto de lugares P de una RPI Q se partitiona en dos subredes, $P = P^N \cup P^F$, donde P^N es el conjunto de lugares que representan un estado normal de la RP y P^F el conjunto de lugares que modelan los estados de falta. El conjunto de transiciones T de Q se partitiona en dos subconjuntos $T = T^N \cup T^F$, que representan el conjunto de transiciones

normales y de falta respectivamente, donde $T^F = \bullet P^F$. El comportamiento normal embebido de la RPI (Q^N, M_0^N) o Q^N de Q es la red incluida en Q donde P^F y T^F junto con los arcos unidos a estos lugares y transiciones son removidos. Asimismo, es necesario definir los lugares y transiciones que pueden ser afectados por una falta, ya sea después de que ocurre o antes de que suceda.

Definición 1. Sea Q una RPI y $t_i \in T^F$. El conjunto de lugares de pre-riesgo de t_i es $P_i^R = \{p_k | p_k \in \bullet t_i\}$. El conjunto de lugares de post-riesgo de t_i es $P_i^{PR} = \{p_k | p_k \in (\bullet t_i) \cap P^N\}$. El conjunto de transiciones de pre-riesgo de t_i es $T_i^R = \{t_k | t_k \in \bullet P_i^R \cap T^N\}$ y el conjunto de transiciones de post-riesgo de t_i es $T_i^{PR} = \{t_k | t_k \in P_i^{PR} \cap T^N\}$ (Ramírez-Treviño A. et al, 2012).

La figura 5 muestra la notación presentada en la definición 2 para entender el análisis del diagnóstico. La falta operacional f_2 tiene un lugar de pre-riesgo $P_2^R = p_1$, un lugar de post-riesgo $P_2^{PR} = p_2$, una transición de pre-riesgo $T_2^R = t_1$ y una transición de post-riesgo $T_2^{PR} = t_2$.

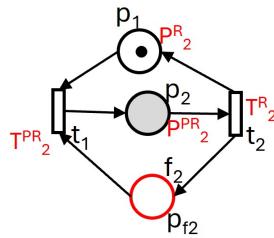


Figura 5. Notación para el análisis del diagnóstico. Fuente propia.

Diagnosticabilidad

La diagnosticabilidad implica determinar la posibilidad de detectar en un tiempo finito ciertos eventos (k) no deseados (faltas) en un sistema y eso conlleva a un problema si eso no pasa (Haal S. et al, 2017). Si una falta no puede detectarse después de k pasos, entonces implicaría que hay eventos que pueden seguirse ejecutando con la ocurrencia de la falta (eventos indeterminados), y eso no hace posible distinguirlos de otros eventos que no tienen falta. Es decir, se ve la misma la salida de la RPI tanto para eventos que no tienen falta como los que sí tienen, por eso la RPI es no diagnosticable entrada-salida (es decir, con los datos de entrada y de salida) como en la figura 6, dado que el disparo de las transiciones t_3 y t_4 (falta permanente) no son manipulables y no se puede distinguir si se disparó una transición de falta (t_4) o una transición normal del sistema (t_3), por lo que se consideran indistinguibles las secuencias de transiciones a) y b).

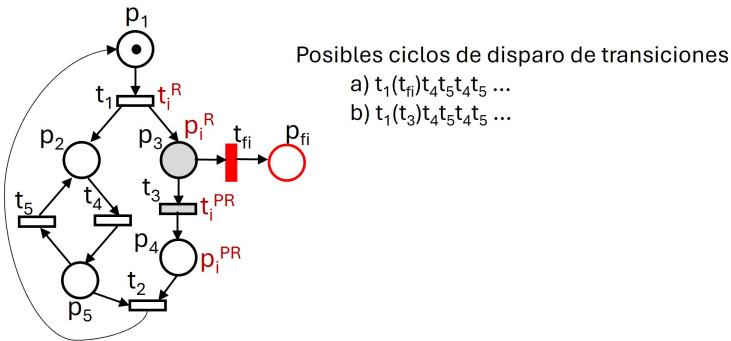


Figura 6. RPI con ciclos de disparo indistinguibles. Fuente (Hernández et al., 2017).

Por otro lado, como la RP tiene un evento o ciclo indeterminado que sucede a través del disparo de las transiciones t_4t_5 después de la ocurrencia de la falta t_{fi} es decir, ambas transiciones t_4t_5 pueden dispararse manera infinita, aunque haya ocurrido la falta, y eso hace que la falta no sea diagnosticable, y, por ende, el SED representado con la RPI también se considera no diagnosticable. Esto significa que el SED no cumple con la propiedad de diagnosticabilidad entrada-salida que se define a continuación.

Definición 2. Una RPI viva dada por Q es diagnosticable entra-salida en $k<\infty$ pasos si usando cualquier secuencia de disparo de transiciones de longitud igual o mayor a k y la estructura de Q son suficientes para distinguir la ocurrencia de una falta en el SED (Ramírez-Treviño A. et al, 2012).

En el caso de la RPI de la figura 6, $k=\infty$ porque el disparo de las transiciones (número de pasos) es infinito para t_4 y t_5 . Estos eventos se pueden evitar si las transiciones de postriesgo pertenecen a cualquier secuencia de eventos finita y si las transiciones son evento-detectable.

Definición 3. Sea una RPI viva dada por Q , una transición es evento-detectable si su disparo puede distinguirse del disparo de cada otra transición con la información de $\omega \in \Lambda(Q)$. Una RPI Q , es evento-detectable si y solo si $\forall t_j$ en Q t_j es evento-detectable (Ramírez-Treviño A. et al, 2012).

Es decir, si una $t_3 \in T^{PR}$ se puede disparar indicaría que la marca no se queda retenida en un lugar de falta (p_{fi}) sino que está en un lugar (p_3) que pertenece al estado normal del sistema, por lo que esa habilitación indica la ausencia de falta, en este caso de la permanente. En caso contrario, es decir, si se intenta disparar $t_3 \in T^{PR}$ y no se puede hacer, entonces revela que su lugar de entrada no tiene marca (p_3) y eso sucede porque la marca se encuentra en un lugar de falta (p_{fi}). Por lo tanto, si la $t_3 \in T^{PR}$ está en cualquier secuencia finita en el comportamiento normal de la red, entonces en un número finito de pasos se intentará disparar dicha transición, y su disparo o no disparo permite determinar si la falta existió (Hernández-Rueda et al, 2015). Por lo que se considera el concepto de la distancia

relativa (Ruiz-Beltrán et al., 2007) entre dos transiciones y los sifones de la red (Desel y Esparza, 1995), que se presenta a continuación.

Definición 4. Sea Q una RPI limitada, la distancia relativa $D_R(t_i, t_j)$ entre cualquier par de transiciones $t_i, t_j \in T$, es el número máximo de veces que t_i puede ser disparado sin que se dispare t_j cuando una marca se retiene en el lugar $\bullet t_i$, esto es, el marcado que habilita a t_i no puede usarse para disparar la transición t_j . La distancia máxima relativa $D_H(t_i, t_j)$, entre cualquier par de transiciones $t_i, t_j \in T$ es $D_H(t_i, t_j) = \max\{D_R(t_i, t_j), D_R(t_j, t_i)\}$ (Ramírez-Treviño A. et al, 2012).

Por lo que el diagnóstico de las faltas se puede realizar con el cálculo de la distancia máxima relativa entre dos transiciones y el diagnóstico se puede caracterizar con este parámetro, considerando la proposición que se presenta en la siguiente línea.

Proposición 1. Sea Q una RP limitada, donde Q^N es viva, acotada y fuertemente-conexa. Sea t_{fi} una falta permanente, p_k un lugar de riesgo y S_{ti} el sifón que se desmarcará cuando t_{fi} se dispare. Se asume que $|p_k \bullet| = 1$ y la transición post-riesgo $t_a \in p_k \bullet$ y las transiciones pre-riesgo son evento-detectable. Q es diagnosticable respecto a t_{fi} si todos los T -semiflujos de la red contienen transiciones en $\bullet S_{ti} \cap S_{ti} \bullet$, indica las transiciones de entrada y de salida a los lugares que forman el sifón S_{ti} (Ruiz-Beltrán E. et al, 2014).

Por otro lado, se considera el concepto de circuito de regulación (Desel y Esparza, 1995) que cuando se agrega a un RP o RPI no modifican su estructura de comportamiento y puede permitir delimitar las secuencias de disparos infinitas (forzar el diagnóstico), si existen en la RPI lugares comunes de entrada a transiciones, siendo una de estas transiciones parte del evento o ciclo indeterminado, para que la RPI sea diagnosticable. A continuación, se presenta la caracterización (definición 5, proposición 2 y 3) de la RPI donde se puede forzar el diagnóstico.

Definición 5. Sea Q una RPI y $T_r = \{t_i, t_j, \dots, t_x\} \subseteq T$ un conjunto de transiciones tal que $\bullet t_i = t_j = \dots = t_x$. $C_r = \{p'_i, p'_j, \dots, p'_x\}$ es un circuito de regulación de un conjunto de lugares para T_r que se pueden agregar a la RPI si $\bullet p'_i = t_i, p'_j = t_i, \dots, p'_x = t_x$ y $p'_x = t_i$. Sólo se marca una plaza en C_r en el marcado inicial (Hernández-Rueda et al, 2015).

Proposición 2. Sea Q una RPI viva, binaria y evento-detectable. Sea $t_i \in T^F$ una falta permanente y $t_x \in T^{PR}$. Sea $D_H(t_x, t_i) = \infty$ donde $t_i \in T^N$. Sea X_1 y X_2 dos T -semiflujos mínimos tal que $t_x \in \langle X_1 \rangle$ y $t_i \in \langle X_2 \rangle$. Si existe una transición $t_a \in \langle X_1 \rangle, t_b \in \langle X_2 \rangle$ tal que $\bullet t_a = t_b$ y un circuito de regulación C_r se añade, entonces $D_H(t_x, t_i) < \infty$ (Hernández-Rueda & Meda-Campaña, 2015).

Proposición 3. Sea Q una RPI viva, binaria y evento-detectable. Sea $t_i \in T^F$ una falta permanente y $t_x \in T^{PR}$. Sea $XT = \{X_1, \dots, X_n, X_x\} \in T$ -semiflujos mínimos tal que $t_x \in \langle X_x \rangle$. Si $\forall t_j$ tal que $D_H(t_x, t_j) = \infty, t_j \in X_n \cap T^N$ y $X_n \in XT$ existen transiciones $t_a \in \langle X_n \rangle, t_b \in \langle X_x \rangle, n \neq x$ tal que $\bullet t_a = t_b$ y un circuito de regulación C_r se añade, entonces t_i es diagnosable (Hernández-Rueda et al, 2015).

En la figura 7 se muestra el ejemplo del Cr agregado a la RPI de la figura 6 para volver diagnosable la falta.

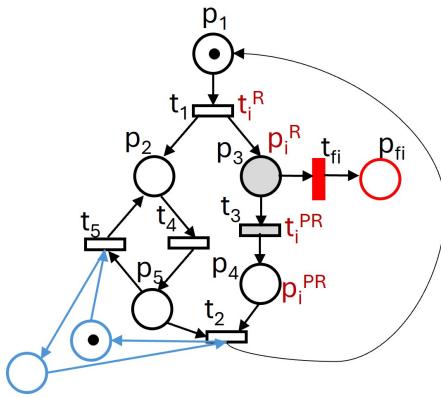


Figura 7. RPI diagnosticable con el Circuito de Regulación. Fuente propia.

Dado que con este circuito se limitada mucho el lenguaje de la RPI (la secuencia de disparo $t_4 t_5$ solo se realiza una vez después de ocurrida la falta), se definió un nuevo Cr denominado Circuito de Regulación Inteligente o CRI (Hernández-Rueda et al., 2017; Hernández-Rueda et al., 2019) para usarse en el diagnóstico de faltas permanentes. A continuación, se presenta su definición.

Circuito de Regulación Inteligente

Definición 6. Sea Q^N una RP viva, acotada y fuertemente conexa. Sea $t_f \in T^F$ una transición del sistema. Sea $T_{tf} = \{t_a, t_b, t_c, \dots, t_x\} \subseteq T \in T_r$ de la falta t_f . Un CRI para el conjunto T_{tf} está formado por un lugar de auto-lazo p_{si} y un lugar de salida p_{csi} (contador) para todas las transiciones de ese conjunto, un lugar de salida p_{cri} de la transición de pre-riesgo de la falta t_f , un lugar de salida p_{cpri} de la transición de post-riesgo de la falta t_f , y un *Sistema de Toma de Decisiones (STD)* que calcula el marcado de los lugares p_{cri} , p_{cpri} , p_{si} y p_{csi} y que monitorea un número k máximo de veces que se pueden disparar algunas transiciones del conjunto T_r sin disparar algunas otras transiciones del mismo conjunto. En el marcado inicial $\forall p_{si} M(p_{si})=1$, $\forall p_{csi} M(p_{csi})=0$ y $\forall p_{cpri} M(p_{cpri})=0$ (Hernández-Rueda et al., 2019).

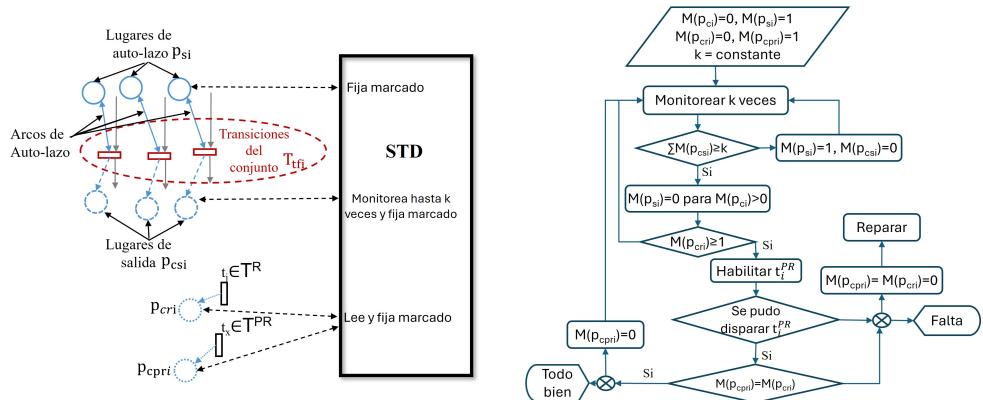


Figura 8. Circuito de Regulación Inteligente: esquema y algoritmo para su ejecución. Fuente (Hernández-Rueda et al., 2019).

En la figura 8 se muestra el esquema del CRI y el algoritmo que muestra cómo funciona. Por cada conjunto de T_j de la falta t_{fi} se considera un CRI. Antes que el CRI inicie el monitoreo del sistema a diagnosticar, se establecen las condiciones iniciales, por ejemplo, el número de eventos k que deben ejecutarse antes de determinar la ocurrencia de una falta y los contadores se establecen en cero. Posteriormente, se revisa si la transición post-riesgo se intentó disparar y si las marcas de los lugares de salida de esta son iguales. Si no son iguales entonces se determina que sí ocurrió una falta. Esto se hace cada vez que se ejecuta un disparo.

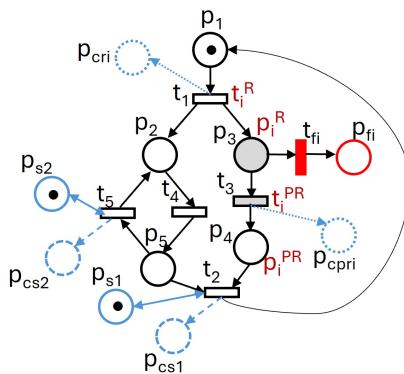


Figura 9. RPI diagnosticable con el Circuito de Regulación Inteligente. Fuente propia.

La figura 9 muestra el CRI agregado a la RPI de la figura 6. Con este CRI a diferencia del anterior, se puede decidir en qué momento (k pasos o veces) determinar si ocurrió o no una falta, por lo que el disparo de la secuencia $t_4 t_5$ ocurrirá k veces en lugar de solo una vez como sucedía con el otro circuito simple. Por otro lado, aunque se agregan más lugares, estos no modifican el comportamiento del SED modelado. Los lugares de auto-

lazo (p_{s1} y p_{s2}) sirven para establecer decisiones con base en la cantidad de marcas que se encuentran en sus contadores respectivos (p_{cs1} y p_{cs2}) y determinar si hubo o no una falta, los contadores de las transiciones de riesgo y post-riesgo (p_{cr1} y p_{cpri}) ayudan de confirmar la existencia o no de la falta permanente.

METODOLOGÍA

Como se comentó en la parte de la introducción, para realizar el diagnóstico de falta se usa el modelado de sistemas con RPI, y en particular, para hacer diagnosticable el sistema con menos limitación en su desempeño, se usa el enfoque del CRI para forzar el diagnóstico de la falta. Al igual que se agregó un CRI para diagnosticar una falta permanente, se hará para diagnosticar una falta operacional. Los pasos que se deben seguir se describen a continuación, con base en la información de Hernández-Rueda et al. (2019).

- Modelar el sistema en RPI.
- Modelar la falta operacional con RPI.
- Si el sistema es no diagnosticable y se cumple que $p'_i = t_i$, $p'_j = t_i$, ..., $p'_x = t_x$ y $p'_x = t_i$ de la [definición 5](#), entonces agregar el CRI a la RPI del modelo del SED con la falta operacional modelada. De lo contrario, no es posible usar el método.
- Usar el algoritmo que se muestra en la figura 8.
 - Inicializar las variables.
 - Establecer el valor de k , se supondrá $k=2$.
 - Ejecutar disparo de secuencia de transiciones desde la condición inicial de la RPI.
 - Verificar si se cumple la condición 1: $\sum M(p_{csj}) \geq k$, $(M(p_{cs1}) + M(p_{cs2}))$.
 - Si se cumple esta condición, entonces se quitan las marcas de los lugares de auto-lazo ($M(p_{si})$) para cada contador que tiene al menos una marca ($M(p_{csj}) > 0$) y eso provoca que el sistema se detenga. Luego se verifica si el contador de lugar de la transición de riesgo tiene alguna marca, condición 2: $(M(p_{csj}) \geq 1)$, es decir, si se ha disparado. Si hay más de uno, se debe verificar por cada uno. Si no se ha disparado, entonces se continúa verificando la condición 1. Si se ha disparado, entonces se habilita la transición de post-riesgo y se verifica la condición 3: t_j^{PR} , esto es, si se puede disparar quiere decir que no hubo ninguna falta, pero si no se puede disparar se dice que existe una falta.
 - Si no la cumple, entonces la ejecución del sistema continua.
 - Continuar ejecutando el algoritmo.

La figura 10 es una RPI que tiene una falta operacional no diagnosticable debido a que la secuencia de disparo $t_5 t_4$ representa un evento indeterminado y eso provoca que

la distancia máxima relativa $D_H(t_x, t_y) = \infty$. Además, cumple con la [definición 5](#) ($t_2 = t_4 = p_2$), por lo que se puede agregar el CRI y eso hace que $D_H(t_x, t_y) < \infty$. Se inicializan las variables ($p_{s1} = 1, p_{s2} = 1, p_{cs1} = 0, p_{cs2} = 0, p_{cri} = 0, p_{cpri} = 0$). Se establece $k=2$, esto implica que t_2 y t_4 se puede disparar una vez o que t_2 se puede disparar dos veces o que t_4 se puede disparar dos veces por la condición $\sum M(p_{cs1}) \geq k$, ($M(p_{cs1}) + M(p_{cs2})$). Se inicia la ejecución de la secuencia de disparo de transiciones, primero t_1, t_4, t_5, t_4 (cuando no se dispara una falta) y luego, $t_1, t_4, t_{fi}, t_3, t_1, t_4$ (cuando se dispara una falta) para verificar que es posible determinar la existencia de una falta operacional con el CRI usado para faltas permanentes. Cada que se dispara una transición en la zona de riesgo, se verifica que se cumpla la condición $\sum M(p_{cs1}) \geq 2$, es decir, que la suma de las marcas que hay en cada contador asociado al lugar de auto-lazo ($M(p_{s1})$ y $M(p_{s2})$) sea igual o mayor al valor de $k=2$.

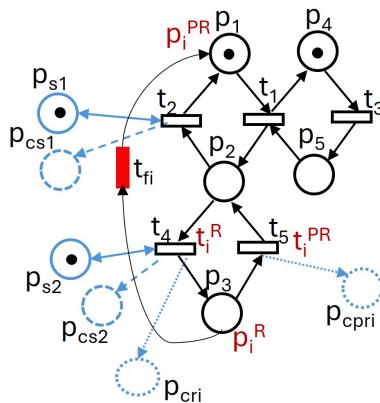


Figura 10. RPI no diagnosticable que contiene un CRI. Fuente propia.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evolución de la marca de acuerdo con la secuencia de disparo t_1, t_4, t_5, t_4 se observa en la figura 11. La figura muestra la secuencia de disparo de cada transición, una seguida de la otra hasta finalizar la secuencia. Se observa que, al finalizar la secuencia, se cumple que $k=2$ porque hay dos marcas en el contador p_{cs2} vinculado al lugar de auto-lazo p_{s2} que sale de la transición t_4 y que sumado a los ceros marcas del contador p_{cs1} vinculado al lugar de auto-lazo p_{s1} que sale de la transición t_2 da dos, que fue la condición fijada para verificar si se disparó o no una falta. Por lo que, se quita la marca del lugar de auto-lazo p_{s2} para que ya no se dispare el ciclo indeterminado y se revise si hubo o no una falta. El algoritmo indica que se debe habilitar e intentar disparar la transición de post-riesgo, t_5 , vemos que es posible porque en la figura del último disparo, está habilitada la transición (el lugar de entrada tiene p_3 una marca) y se puede disparar, entonces, se ve si la cantidad de marcas en los contadores de las transiciones de riesgo y post-riesgo son iguales, si son iguales

se considera que no hubo una falta, pero en este caso son diferentes ($M(p_{cri})=2 \neq M(p_{cpri})=1$) y hubo una falta por lo que no es correcto el diagnóstico. Sin embargo, si considera la condición contraria, ver que sean diferentes las marcas en p_{cri} y p_{cpri} , y, además, que $M(p_{cpri}) \neq 0$, entonces se puede decir que no hay falta.

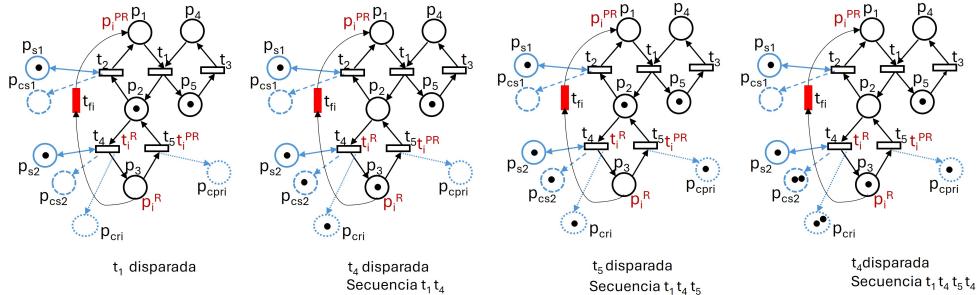


Figura 11. Evolución de la secuencia de disparo t_1, t_2, t_3, t_4 de la RPI de Figura 10. Fuente propia.

La evolución de la marca de acuerdo con la secuencia de disparo $t_1, t_4, t_1, t_3, t_1, t_4$ se observa en la figura 12. Igual que en la figura 11, esta muestra la secuencia de disparo de cada transición, una seguida de la otra hasta finalizar la secuencia. Igual que en la secuencia de disparo de la figura 11, al finalizar la secuencia, se cumple que $k=2$ porque hay dos marcas en el contador p_{cs2} vinculado al lugar de auto-lazo p_{s2} que sale de la transición t_4 y cero marcas del contador p_{cs1} vinculado al lugar de auto-lazo p_{s1} que sale de la transición t_2 , que fue la condición fijada para verificar si se disparó o no una falta. Por lo que, se quita la marca del lugar de auto-lazo p_{s2} para que ya no se dispare el ciclo indeterminado y se revisa si hubo o no una falta.

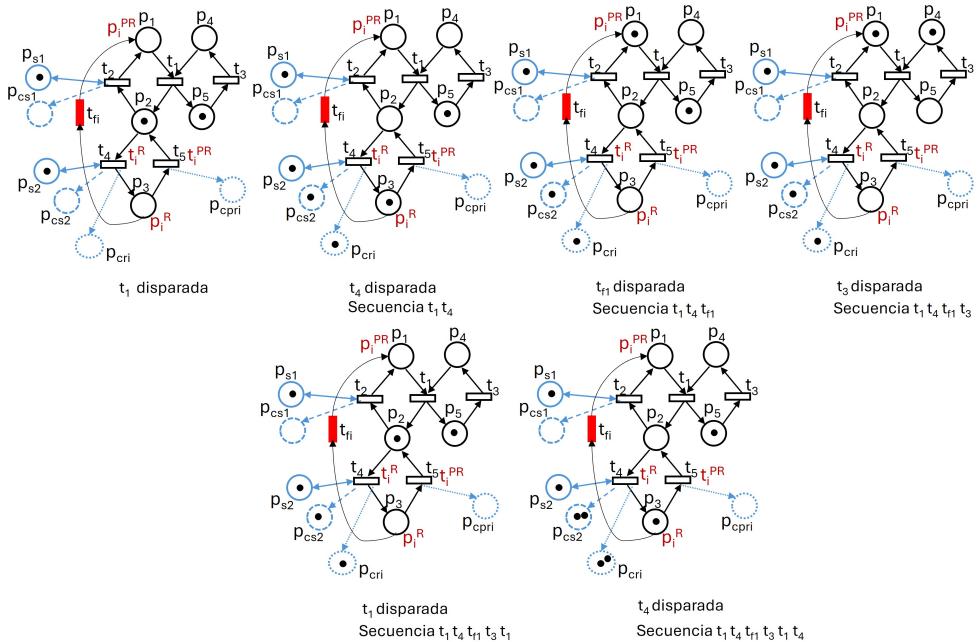


Figura 12. Evolución de la secuencia de disparo t_1, t_4, t_1, t_3, t_4 de la RPI de Figura 10. Fuente propia.

Igualmente, al caso anterior, es posible disparar la transición de post-riesgo y si se observa la cantidad de marcas en los lugares contares p_{cri} y p_{cpri} son diferentes, en este caso sí hay una falta. Sin embargo, para considerar el caso anterior, se puede decir que, si considera la condición contraria, ver que sean diferentes las marcas en p_{cri} y p_{cpri} , y, además, que $M(p_{cpri})=0$, entonces se puede decir que hay falta.

De acuerdo con los casos revisados, se puede decir que es posible determinar si hubo o no una falta operacional en una RPI no diagnosticable con el CRI si se realiza el ajuste mencionado. En una primera aproximación, el algoritmo modificado para detectar las faltas operacionales se muestra en la figura 13. A diferencia de la falta permanente, la falta operacional da la posibilidad de realizar el disparo de la transición post-riesgo, por lo que se debe considerar tanto el caso de que las marcas en los lugares de los contadores de t_i^R y de t_i^{PR} sean diferentes como iguales, pero siempre comparar si $M(p_{cpri})=0$ o no.

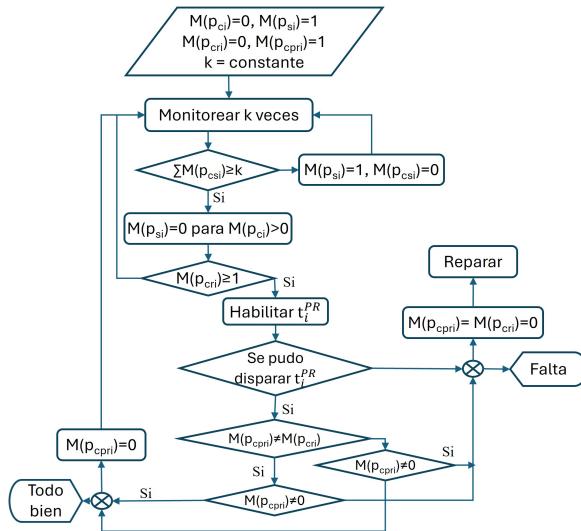


Figura 13. Algoritmo modificado para que el CRI detecte faltas operacionales. Adecuado de (Hernández-Rueda et al., 2019).

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la forma de forzar el diagnóstico de faltas operacionales con base en la definición, funcionamiento y aplicación del CRI propuesto por Hernández-Rueda, Meda Campaña y Martínez Haro (2018) para detectar faltas permanentes en SED. A diferencia de las faltas permanentes, no es posible determinar que no hay faltas con la condición $M(p_{cri})=M(p_{cpri})$ porque la transición de post-riesgo se puede habilitar si ocurre una falta operacional. Por lo que es necesario revisar tanto ese caso ($M(p_{cri})=M(p_{cpri})$) como el caso en que son diferentes las marcas ($M(p_{cri})\neq M(p_{cpri})$), y después, verificar si la cantidad de marcas que hay en $M(p_{cpri})=0$. Sin embargo, como trabajo futuro es importante analizar otros tipos de RPI para verificar que, efectivamente, estas condiciones propuestas funcionan para todas las PRI con este tipo de faltas. Por otro lado, es importante mencionar que existe una ventaja del CRI respecto al CR, ya que no limita al sistema porque la RPI sigue funcionando mientras se decide inspeccionar si pudo ocurrir una falta después de la ocurrencia de k eventos. Como se pudo notar, se puede variar el monitoreo de las faltas, a partir del valor de k que se fija al inicio de arranque de la supervisión. El valor de k es ligado al número de eventos que se deciden ejecutar antes de la determinar la existencia o no de faltas.

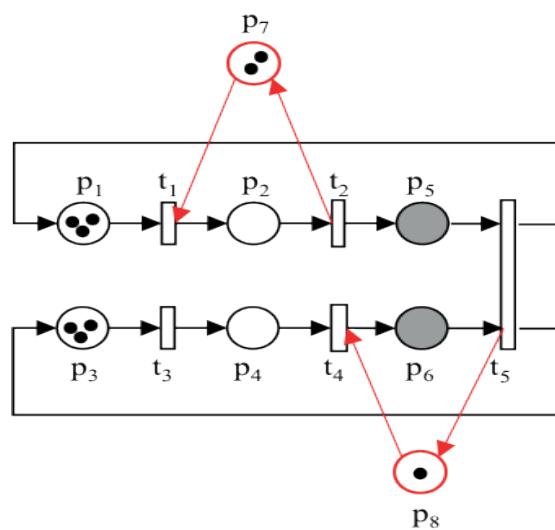
La principal contribución en el área es evidenciar que es posible diagnosticar faltas operacionales con el nuevo enfoque de forzar la diagnosticabilidad a través del CRI. Como trabajo futuro se tiene interés por caracterizar este diagnóstico para toda clase de RP y presentar un algoritmo más formal.

REFERENCIAS

- Basile, F., Chiacchio, P., & De Tommasi, G. (2012). On K-diagnosability of Petri nets via integer linear programming. *Automatica*, 48(9), 2047-2058.
- Cassandras C. G. & Lafortune S. (2008). Introduction to Discrete Event Systems. New York, USA: Springer Editorial, second edition.
- Dotoli M., Fanti M. P., Mangini A. M. & Ukovich W. (2009, Octubre). On-line Fault Detection in Discrete Event Sysyms by Petri nets and Integer Linear Programming. *Automatica*, 45(11), pp. 2665-2672.
- Desel J. and Esparza J. (1995). Free Choice Petri Nets. University Press. Cambridge.
- Haar S., Haddad S. , Melliti T. & Schwoon S. (2017). Optimal constructions for active diagnosis. *Journal of Computer and System Sciences*, 83(1), pp. 101-120.
- Hernández-Rueda, K., Meda-Campaña, M. E., & Haro-Martínez, B. (2019). Circuito de Regulación Inteligente para Detección de Faltas en Sistemas de Eventos Discretos: definición, funcionamiento y aplicación. En M. T. Prieto Quezada, J. C. Carrillo Navarro, L. P. Cruz Covarrubias, P. Aguilar Pérez, & C. G. Herrera (Eds.), *Liderazgo y producción de Cuerpos Académicos* (pp. 460-469). Fondo Editorial Universitario. ISBN: 978-84-18080-62-3.
- Hernández-Rueda, K. and Meda-Campaña, M. E. (2018). Analysis and Impelementation of an Algorthim to Detect Faults. *Memoria Electro*, 1(40), pp.126-132.
- Hernández R. K., Meda C. M.E. & Haro M. B. (2017). Diagnóstico Ativo de Faltas en Sistemas de Eventos Discretos. *Pistas Educativas*, 128(39), pp. 730-748.
- Hernández-Rueda K., Meda-Campaña M.E. & Arámburo-Lizárraga J. (2015). Diagnosability in Interpreted Petri Nets. *IFAC-Papers On Line*, 48(7), pp. 58-63. doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.473.
- Hernández-Rueda, K. and Meda-Campaña, M. E. (2015). Fault Diagnosis in Discrete Events Systems Not Diagnosable. *Memoria Electro*, 1(35), pp. 141-146.
- Hu, Y., Ma, Z., Li, Z., & Giua, A. (2021). Diagnosability enforcement in labeled Petri nets using supervisory control. *Automatica*, 131, pp. 109776.
- Hu, Y., Ma, Z., & Li, Z. (2019, August). Active diagnosis of Petri nets using Q-diagnoser. In *2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (pp. 203-208). IEEE.
- Ibrahim H., Dague P., Grastien A., Ye L., Simon L. (2017). Diagnosability Planning for Controllable Discrete Event Systems. Proceedings of the Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-17), pp 1149- 1155.
- Lafortune S., Teneketzis D. & Sampath M. (2011). Failure Diagnosis of Dynamic Systemas: An approach Based on Discrete Event Systems. Proceedings of the American Control Conference, pp. 2058-2068.
- Lin, F. & Wonham, W. M. (1998). On observability of discrete event systems. *Information Sciences*, 44(3), pp. 173–198.
- Ramírez-Treviño A., Ruiz-Beltrán E., Arámburo-Lizárraga J. & López-Mellado E. (2012). Structural Diagnosability of DES and Design of Reduced Petri Net Diagnosers. *IEEE Transaction on Systems, MAN and Cybernetics*, 42(2), pp. 416-429.
- Ran, N., Giua, A., & Seatzu, C. (2019). Enforcement of diagnosability in labeled Petri nets via optimal sensor selection. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 64(7), pp. 2997-3004.
- Ruiz-Beltrán E., Ramírez-Treviño A. & Orozco-Mora J.L. (2014). En Formal Methods in Manufacturing: Fault Diagnosis in Petri Nets (728). Campos J., Seatzu C. y Xie X. Boca Raton, FL.: CRC Press Taylor-Francis Group. , 41, pp. 553-574.
- Sampath M., Sengupta R., Lafortune S., and Sinnamohideen K. (1995). Diagnosability of discrete-event system. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(9), pp. 1555–1575.

DETECCIÓN DE ESPECIFICACIONES

SPECIFICATION DETECTION



DETECCIÓN DE ESPECIFICACIONES UTILIZANDO REDES DE PETRI INTERPRETADAS

DETECTION OF SPECIFICATIONS USING INTERPRETED PETRI NETS

RESUMEN

El avance tecnológico ha conducido a la creación de nuevos sistemas que integran en sus procesos de producción diferentes tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas (IoC), el Big Data, el análisis de datos, la Inteligencia Artificial (IA), el Machine Learning (ML), el blockchain, los gemelos digitales y el cómputo en la nube, entre otras. Esta nueva forma de producir se conoce hoy en día como Industria 4.0, o como Cuarta Revolución Industrial. El modelado en este contexto es muy importante porque a través de los modelos se pueden hacer estudios para definir, analizar, simular, implementar, optimizar, detectar faltas y en muchas ocasiones sirven de apoyo en el proceso de toma de decisiones. Entre las herramientas que permiten hacer estos análisis se encuentran las redes de Petri, las cuales además de tener una representación matemática también tienen una representación gráfica. En este capítulo se presenta el uso de una metodología de modelado en línea de redes de Petri interpretadas en la detección de especificaciones implementadas bajo un esquema de control por restricciones.

PALABRAS CLAVE: Sistemas Ciber-Físicos, Control por Restricciones, Diseño de Especificaciones, Redes de Petri, Identificación de Sistemas.

ABSTRACT

Advances in technology have led to the creation of new systems that integrate different advanced technologies into their production processes such as the Internet of Things (IoT), Big Data (BD), data analysis, Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML), blockchain, digital twins and cloud computing, among others. This new way of producing is known as Industry 4.0, or the Fourth Industrial Revolution. Modeling in this context is very important because through models, studies can be carried out to define, analyze, simulate, implement, optimize, detect errors, and often serve as support in decision making. Among the tools that allow these analyzes to be carried out are Petri nets, which in addition to having a mathematical representation also have a graphical representation. This chapter presents the use of an online modeling methodology of interpreted Petri nets in the detection of specifications implemented under a constraint control scheme.

KEYWORDS: Cyber-Physical Systems, Constraint Control, Specification Design, Petri Nets, System Identification.

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta el uso de las RP en la construcción de modelos en línea usando un enfoque de identificación asintótico (Meda-Campana et al. 2000). Específicamente, se presenta una propuesta para la detección en línea de especificaciones que se encuentran ejecutándose junto con el sistema bajo un esquema de control basado en

restricciones. La importancia de poder identificar estas especificaciones es para determinar si el sistema de interés se está comportando conforme a lo que fue establecido ya que una diferencia entre la especificación identificada y la que fue implementada puede indicar que existen anomalías en el comportamiento del sistema controlado.

El alcance de esta investigación es presentar una propuesta para detectar un tipo de especificaciones basadas en restricciones denominadas restricciones de exclusión mutua generalizadas, GMEC por sus siglas en inglés (Guia et al., 1992)

El capítulo también tiene como propósito mostrar un tipo de SED en los que esta propuesta puede utilizarse los cuales son los sistemas ciber-físicos.

MARCO TEÓRICO

En prácticamente todas las áreas de la ciencia los modelos son necesarios para poder analizar, diseñar e implementar sistemas (Cassandras y Lafortune, 2008).

Hoy en día, con el avance tecnológico es más que nunca necesario contar con herramientas de análisis que permitan evitar riesgos, desperdicios y en general ahorrar y optimizar recursos.

En esta sección, se describe el contexto en el cual es necesario contar con esquemas de verificación y validación tal como puede ser la detección de especificaciones.

Industria 4.0

Actualmente, nos encontramos en la era de la Industria 4.0 conocida también como la cuarta revolución industrial. Esta nueva era se caracteriza por la integración de técnicas avanzadas de producción con operaciones realizadas con tecnologías inteligentes, transformando con ello la forma de producir o desarrollar actividades.

Asimismo, este nuevo contexto industrial ha provocado el desarrollo de aplicaciones, algoritmos y nuevas tecnologías que maximicen el uso de las ya existentes como la robótica, la analítica, el internet de las cosas y los sistemas ciber-físicos, entre otros.

En (Deloitte, 2024) se establece que uno de los objetivos de la Industria 4.0 es la integración digital de la información desde cualquier lugar, generada de forma diversa y en diferentes formatos para poder realizar operaciones de forma continua.

En la figura 1 se representa el ciclo que se lleva a cabo entre el flujo continuo de información y las acciones que se realizan entre los mundos físico y digital a través de una serie de pasos conocida como PDP por sus siglas en inglés (physical-to-digital-to-physical). El PDP abarca todas las acciones que se llevan a cabo para pasar del mundo físico al mundo digital y viceversa. De forma general, el PDP se realiza de la siguiente forma:

Físico-Digital. Se captura la información del mundo físico y se crea un registro digital de la misma.

Digital-Digital. En este paso, la información se comparte y se interpreta utilizando analítica avanzada, análisis de escenarios e inteligencia artificial para descubrir información relevante.

Digital-Físico. Se aplican algoritmos para traducir las decisiones del mundo digital a datos efectivos, estimulando acciones y cambios en el mundo físico (Deloitte, 2024).

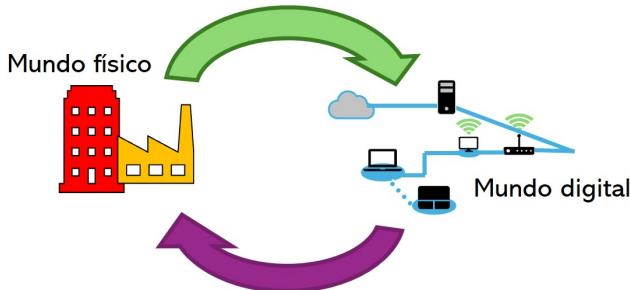


Figura 1. Ciclo de información que se da entre el mundo físico y el mundo digital.

Fuente propia.

La cuarta revolución industrial tiene impacto en diferentes ámbitos que van desde la forma de producir hasta la forma de interactuar con los consumidores, así como en el avance científico y tecnológico debido a que promueve el desarrollo de nuevas tecnologías las cuales además llevarán a la creación de nuevos productos.

Ante esta transformación tecnológica las empresas deben competir para seguir en el mercado por lo que están en la constante búsqueda de herramientas de análisis que permitan transitar en este cambio.

Es en este punto en donde se enmarca la importancia del uso de las Redes de Petri ya que esta herramienta permite el estudio de problemas complejos asociados a sistemas que están definidos dentro de la Industria 4.0.

Sistemas ciber-físicos

El término de sistemas ciber físicos (CPS) engloba a una amplia gama de sistemas complejos y multidisciplinarios que integran tecnologías informáticas embebidas con el mundo real, esto ha sido en gran medida gracias a los avances alcanzados en la electrónica digital y en el contexto de la Industria 4.0.

Un componente principal de los CPS son las interfaces de comunicación entre el mundo real (físico) y el cibernetico. Las interfaces son los componentes intermedios como sensores, actuadores, convertidores analógico-digital (ADC) y convertidores digital-analógico (DAC), responsables de unir los sistemas ciberneticos con el mundo físico.

La metodología de diseño de estos sistemas incluye la dinámica conjunta de computadoras, software, redes, almacenamiento en la nube, procesos y dispositivos físicos para interactuar con la realidad.

Todos los días, quizás sin darnos cuenta tenemos contacto con este tipo de sistemas pues muchos de ellos forman parte de nuestra vida cotidiana, tal es el caso de sistemas vehiculares, de transporte, de gestión, de redes y casas inteligentes, entre otros.

La parte física se refiere al mundo real como sistemas, sensores y actuadores; es la parte que interactúa con el entorno, mientras que la parte cibernetica controla los objetos y toma decisiones.

Los sistemas ciber-físicos, aunque no necesariamente están definidos para implementarse dentro de la Industria 4.0 sí que forman parte importante de ella debido a que son los sistemas que permiten la automatización y conectividad (entre otras propiedades) de lo que se conoce como fábricas inteligentes. En este mismo sentido podemos considerar la importancia de los CPS en las Smart Cities (Baheti y Gill, 2011).

Implementar estos sistemas permite que las empresas optimicen sus recursos como tiempo y dinero y agreguen seguridad en sus operaciones. En entornos productivos los CPS pueden utilizarse en el diseño de cadenas de suministro y en la gestión y predicción de inventarios.

Muchos de los CPS pueden considerarse como sistemas de eventos discretos (SED) dada la naturaleza de su comportamiento. En un SED un estado cambia a otro cuando ocurre un evento. Estos eventos pueden ser de carácter físico o lógico dependiendo de la instrumentación del sistema por lo que se puede describir en ellos las partes físicas y ciberneticas que conforman un CPS.

Entre los CPS que pueden ser analizados desde la óptica de los SED se encuentran además de los que ya se han mencionado los sistemas de manufactura, sistemas de transporte, sistemas de logística, entre otros.

Por esta razón las redes de Petri se pueden utilizar para describir, analizar, diseñar e implementar CPS.

En la figura 2, se presenta un CPS relacionado con redes de comunicación.

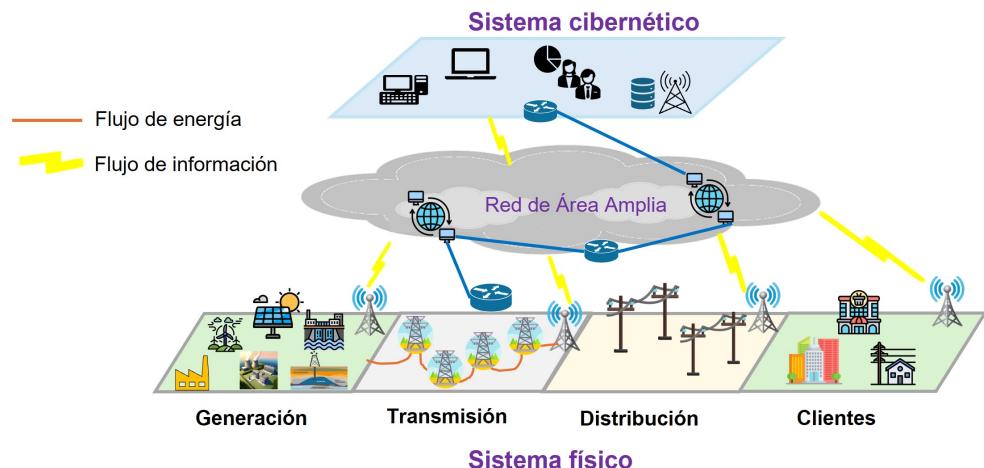


Figura 2. Ejemplo de un CPS. Fuente (Jha et al., 2021)

El uso de redes de Petri en sistemas complejos, como los definidos en el contexto de la Industria 4.0, permite contar con modelos que describan de forma eficiente el comportamiento y la estructura de estos con el objetivo de realizar un análisis riguroso entre comportamiento esperado y el observado. Asimismo, las RP además de facilitar el diseño y validación de sistemas ciber-físicos, también asegura que estos cumplan con los requisitos de comportamiento y operen de manera eficiente y segura a través de diferentes metodologías de verificación y validación, como la detección de especificaciones.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada en la detección de especificaciones se basa en el enfoque de identificación asintótico. En este apartado se presenta un breve resumen de este enfoque.

Identificación asintótica usando Redes de Petri Interpretadas

El problema de identificación consiste en calcular un modelo a partir del conocimiento de sus señales de entrada y de salida (Cabasino et al., 2006). El proceso general de identificación se presenta en la figura 3.

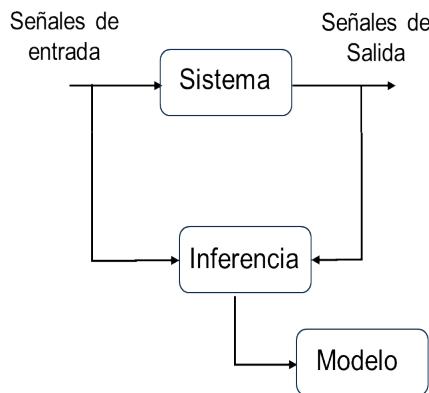


Figura 3. Proceso de identificación. Fuente propia.

Por otra parte, el problema de identificación asintótico en términos de RP interpretadas (RPI) consiste en construir un modelo que represente el comportamiento observado de un SED conforme evoluciona, tal como se muestra en la figura 4 (Meda-Campaña y López-Mellado, 2001).

Este proceso consiste en 2 fases: 1) la construcción de la parte medible (instrumentada con sensores y actuadores) y 2) la inferencia de la parte no medible.

A continuación, se presenta de forma resumida el algoritmo de identificación asintótico, la descripción completa de este algoritmo se puede encontrar en (Meda-Campaña y López-Mellado, 2001), (Meda-Campaña y López-Mellado, 2002) y (Meda-Campaña y López-Mellado, 2003).

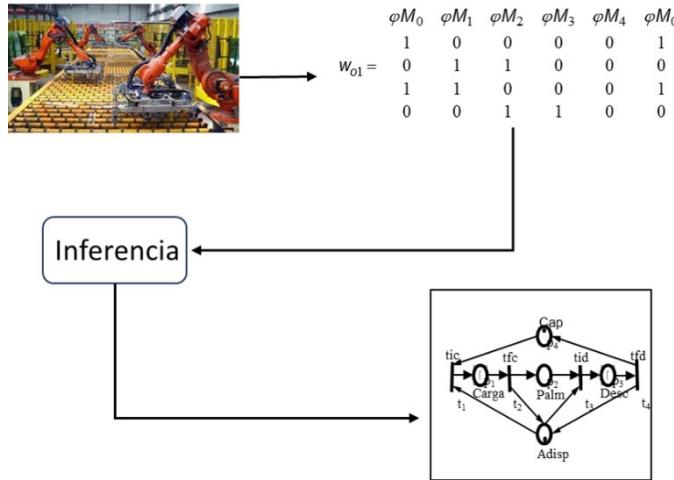


Figura 4. Proceso de identificación asintótico. Fuente propia.

Algoritmo de identificación asintótico (AIA)

Input: El modelo en RPI Q_{i-1} y la m -word $w_i = t_p \dots t_f$ calculadas previamente, los conjuntos $Dep(Q_i)$, $concurr(Q_i)$ y el conjunto de m -words $W = \{w_1, w_2, \dots, w_{i-1}\}$

Output: El modelo en RPI Q_i

I. Cálculo de la parte medible φC_{Q_i}

- (1) Leer los símbolos de salida $\varphi(M_a), \varphi(M_b), \dots$ generados por el SED
- (2) Detectar una palabra de salida $w_{oi} = \varphi(M_a), \varphi(M_b), \dots, \varphi(M_c)$ tal que $\varphi(M_a) = \varphi(M_c)$
- (3) Calcular con la ecuación $\varphi C_{Q_i}(\cdot, t_i) = \varphi(M_i) - \varphi(M_{i-1})$ la parte medible de cada transición t_i que genera el cambio de símbolos de salida consecutivos en w_{oi}
- (4) Formar la m -word $w_i = t_a t_b \dots t_c$ con las transiciones calculadas en el punto 3 y agregarla al conjunto W .

II. Inferencia de la parte no medible $y C_{Q_i}$

- (5) Agregar las NDep necesarias para formar t-componentes
 - a. Entre transiciones consecutivas t_i y t_j de w_i para restringir el orden de ejecución de las transiciones en w_i
 - b. Entre m -words consecutivas w_{i-1} y w_i para formar un t-componente real de Q .
- (6) Ajustar el modelo Q_{i-1} para permitir el disparo de todas las m -words calculadas al formar t-semiflujos reales del SED
 - a. Fusionando lugares no medibles o
 - b. Eliminando NDep y/o lugares no medibles

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Especificaciones descritas como restricciones de exclusión mutual generalizadas

Las restricciones de exclusión mutua generalizadas mejor conocidas como GMEC (por sus siglas en inglés), es un tipo de control que permite gestionar el uso de los recursos disponibles entre diferentes procesos.

Un control de este tipo definido en términos de RP limita que ciertos marcados (estados del sistema) se alcancen, restringiendo así el comportamiento del sistema a un conjunto de estados deseables.

La caracterización de este tipo de control en RP consiste en limitar el total de marcas en un determinado conjunto de lugares (Guia, DiCesare y Silva, 1992).

El problema de GMEC es aplicable cuando en un mismo proceso la especificación acerca del uso de los recursos cambia, tal es el caso de sistemas de manufactura flexible y en general en diversos sistemas de producción en donde a partir de la misma configuración física del sistema se pueden desarrollar diferentes órdenes de producción (Campaña & Vázquez, 2020).

Este enfoque tiene sentido cuando los modelos que representan al sistema son RP k-acotadas debido a que en ellas existe un paralelismo implícito que permite representar diferentes comportamientos en un mismo modelo que pudiera ser secuencial. El enfoque de identificación asintótico definido previamente ha sido aplicado solamente para construir RP binarias. Sin embargo, es posible su uso en la construcción de RPI k-acotadas. Cabe señalar que en la literatura existen otras técnicas de identificación las cuales se enfocan en el cálculo de otros tipos de redes de Petri tal es el caso de los trabajos de Guia y Seatzu (2005), Klein et al. (2005), Cabasino et al. (2006), Dotoli et al. (2007) y Barragán et al. (2015), entre otros.

En esta sección se muestra el uso del enfoque de identificación asintótico en la detección de especificaciones implementadas como GMEC.

A continuación, se define el problema de control de SED bajo el esquema de restricciones (Guia, DiCesare y Silva, 1992).

Definición: Sea S_f un DES modelado por una RP compuesta por un conjunto de lugares P . Una restricción (\vec{w}, k) se define como:

$$(\vec{w}, k) = \{M \in N^{|P|} \mid \vec{w}^T \cdot M \leq k\}$$

donde, \vec{w} es un vector de pesos de números enteros no negativos, k es un número entero positivo y N el conjunto de números naturales. Una restricción de este tipo define un conjunto de marcados legales en los cuales se cumple que el peso del marcado en los lugares seleccionados no excede la cuota establecida por k . El conjunto de marcados que no cumplen con la restricción se denominan marcados prohibidos y son los que en la RP controlada no se pueden alcanzar.

En las RP tradicionales se asume que todas las transiciones son controlables, lo que implica que su disparo puede ser impedido por un agente externo llamado *controlador*. En este sentido, un control tipo GMEC puede ser implementado agregando lugares (medibles) llamados *monitores*. El marcado inicial de estos lugares representa las unidades disponibles a procesar por un recurso, mientras que sus lugares de entrada y de salida representan el uso y la liberación de estas unidades (Guia et al., 1992).

Ejemplo. Considere el SED representado por la RPI de la figura 5. Se requiere que este sistema cumpla con ciertas restricciones en el uso de recursos para satisfacer un plan de producción. Para llevar a cabo esta tarea se implementó un control tipo GMEC.

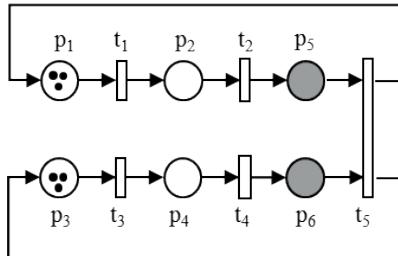


Figura 5: RPI que modela a un SED. Fuente: propia.

El plan de ejecución del sistema se conoce como la especificación que se requiere realice el SED. Para este ejemplo se define la siguiente especificación.

El recurso representado por el lugar p_2 no debe procesar más de 2 unidades a la vez, mientras que el recurso representado por el lugar p_6 sólo debe procesar una unidad a la vez.

Esta especificación de comportamiento o de ejecución en el contexto de GMEC se traduce en las siguientes restricciones:

$$1. w_1 = (000001)^T, k \leq 2$$

$$2. w_2 = (000001)^T, k \leq 1$$

Las restricciones se deben implementar en el sistema a través de los lugares *monitor* y de su marcado inicial para satisfacer la especificación.

Según Guia et al. (1992) para construir el modelo controlado a través de restricciones del tipo GMEC, la matriz de incidencia C^S (C_{QGMEC}) y el marcado inicial M_0^S del modelo

controlado se deben calcular como $C^S = \begin{bmatrix} C \\ -W^T \cdot C \end{bmatrix}$ y $M_0^S = \begin{bmatrix} M_0 \\ k - W^T \cdot M_0 \end{bmatrix}$, respectivamente.

En la matriz C^S , los renglones $-W^T \cdot C$ representan a los lugares *monitor*.

Asimismo, para implementar el control por restricciones es necesario conocer el estado inicial del sistema y su estructura.

Para el SED considerado en este ejemplo, el marcado inicial es $M_0 = [303000]^T$ mientras que la matriz de incidencia se presenta a continuación.

$$C = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Para calcular C^S (la estructura del sistema controlado) es necesario calcular los lugares *monitor* los cuales se calculan como $-W^T \cdot C$, el resultado de este cálculo es una matriz que representa a estos lugares junto con los arcos de entrada y salida.

En este ejemplo, las restricciones w_1 y w_2 se representan en la matriz $W^T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, en esta matriz se indican que los lugares que intervienen directamente en las restricciones son p_2 y p_6 .

Al multiplicar esta matriz negada por la matriz de incidencia se obtienen los lugares *monitor*. La matriz que resulta de este cálculo es $-W^T \cdot C = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$.

A continuación, es necesario calcular el marcado inicial de los lugares *monitor* como $k - W^T \cdot M_0$, donde k es un arreglo que describe las cotas de las restricciones.

El marcado inicial es la condición que hará que el número máximo de marcas en el lugar p_2 sea 2, mientras que en el lugar p_6 sea 1, tal como lo establecen las restricciones 1 y 2 de la especificación respectivamente. De las restricciones se obtiene $k = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}$ y $W^T \cdot M_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ por lo que $k - W^T \cdot M_0 = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}$, donde 2 es el marcado inicial de p_2 y 1 es el marcado de p_6 .

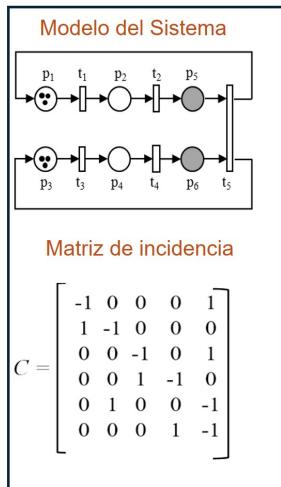
De esta manera el sistema controlado resultante es $N^S = (PuS, T, Pre^S, Pos^S)$, con matriz de incidencia $C^S = \begin{bmatrix} C \\ -W^T \cdot C \end{bmatrix}$ y marcado inicial $M_0^S = \begin{bmatrix} Mo \\ k - W^T \cdot M_0 \end{bmatrix}$.

En la figura 6 se presenta el proceso de construcción del control para el SED de la figura 5. En el paso 5 se muestra la RP controlada en donde los lugares y arcos en color rojo representan la estructura de los lugares *monitor*.

Detección de especificaciones del tipo GMEC usando RPI

En esta investigación, el problema de detección de especificaciones consiste identificar un control tipo GMEC a partir de las lecturas de las señales de salida del sistema controlado. Esto se traduce en el cálculo del conjunto de lugares *monitor* junto con su marcado inicial y la relación entre sus transiciones de entrada y de salida (arcos) ya que son las estructuras que se agregan al modelo del DES para forzar que este realice una determinada especificación.

Sistema



Construcción del control con GMEC

1. Restricciones

$$w_1 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)^T \ k \leq 2$$

$$w_2 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1)^T \ k \leq 1$$

$$k = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

2. Cálculo de la matriz de restricciones W^T

$$-W^T = \begin{bmatrix} 0 & -1000 & 0 \\ 0 & 0 & 000 & -1 \end{bmatrix}$$

3. Cálculo de los lugares monitor

$$-W^T C = \begin{bmatrix} -110 & 0 & 0 \\ 0 & 00 & -11 \end{bmatrix}$$

4. Cálculo del marcado de los lugares monitor

$$M_0^S = k - W^T \cdot M_0$$

$$M_0^S = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

5. Modelo del Sistema controlado

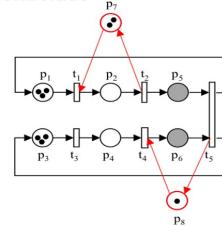


Figura 6. Construcción de un modelo de control tipo GMEC. Fuente propia.

Siguiendo este enfoque, la especificación al igual que el sistema se desconoce, solo se tiene acceso a las lecturas de las señales de salida.

Proposición. Sea Q el modelo del sistema, C_Q su matriz de incidencia y $wo = \phi(Ma)$ $\phi(Mb) \dots \phi(Md)$ una secuencia de símbolos de salida del sistema controlado $N^S = (PuS, T, Pre^S, Pos^S)$. Es posible calcular el conjunto de lugares monitor $LM = \{lm_1, lm_2 \dots lm_k\}$ representador por $-W^T C$ con el AIA, si todas las transiciones $TM = \{LM \cup LM^-\} \in T$ de entrada y de salida de los lugares en LM son disparadas en Q .

Prueba. La prueba es directa a partir de la suposición de que el modelo Q ya está calculado y por lo tanto es conocido y los lugares *monitor* son medibles por definición. En este sentido el sistema controlado se puede considerar como un SED completamente medible y a partir del uso de la ecuación $\phi C(\cdot, t_i) = \phi(M_i) \cdot \phi(M_{i-1})$ se concluye que el AIA calcula el modelo Q_{GMEC} cuando todas las transiciones que pertenecen a TM se disparan en Q .

La aplicación del AIA en el problema de detección de especificaciones implementadas con GMEC corresponde básicamente al cálculo del modelo controlado conocido ahora como Q_{GMEC} (el cual incluye la especificación). La especificación se identifica al hacer una diferencia entre Q_{GMEC} y el modelo Q del sistema, logrando con ello detectar los lugares monitor y sus arcos de entrada y salida. Lo anterior se realiza con el siguiente algoritmo.

Algoritmo de Detección de Especificaciones (ADE)

Input: El modelo en RPI Q del sistema (que incluye el marcado inicial)

Output: La RPI de la especificación $-W^T C$ (estructura de los lugares monitor)

1. **Mientras** exista una transición en Q (columna de C_Q) que no se haya ejecutado

Calcular la matriz de incidencia C_{QGMEC} con el AIA partir de la diferencia los símbolos de salida como:

$$\phi C(\cdot, t_i) = \phi(M_i) \cdot \phi(M_{i+1})$$

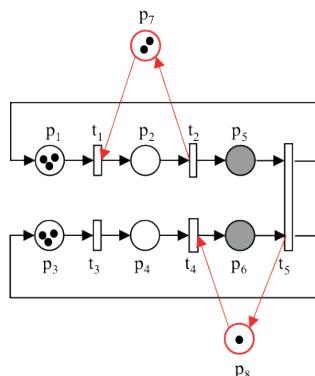
2. Construir la matriz $-W^T C$ con los renglones C_{QGMEC} / C_Q (que son los lugares monitor con sus arcos de entrada y salida)

3. El marcado inicial para el modelo Q_{GMEC} es $M_0^S = \phi(M_0^S)$

Para ilustrar la propuesta. suponga la siguiente evolución del sistema al cual se le implementó un control tipo GMEC según la especificación presentada en la sección anterior. Las lecturas de los lugares bajo la línea punteada representan el marcado de los *Lugares Monitor*.

$\phi(M_0)$	$\phi(M_1)$	$\phi(M_2)$	$\phi(M_3)$	$\phi(M_4)$	$\phi(M_0)$
3	2	2	2	2	3
0	1	0	0	0	0
3	3	3	2	2	3
0	0	0	1	0	0
0	0	1	1	1	0
0	0	0	0	1	0
2	1	2	2	2	2
1	1	1	1	0	1

Al utilizar el ADE se obtiene la RPI de la figura 7 con marcado inicial $M_0^S = \phi(M_0^S) = [30300021]^T$, cuya matriz de incidencia es la que se presenta en la misma figura.



$$C_{QGMEC} = \left[\begin{array}{cccccc} -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{array} \right] \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} C_Q \\ \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} -W^T C$$

Figura 7: Modelo en RPI para un SED controlado usando GMEC. Fuente propia.

El ADE utiliza la ecuación $\phi C(\cdot, t_i) = \phi(M_i) \cdot \phi(M_{i-1})$ para calcular a partir de la diferencia de 2 símbolos de salida consecutivos las relaciones entre los lugares monitor (p_7 y p_8) y las transiciones que ya han sido previamente calculadas. Por ejemplo, la diferencia entre $\phi(M_1)$ y $\phi(M_0)$ da como resultado la columna 1 de la matriz C_{QGMEC} . En este caso se calcula el arco de salida del lugar monitor p_7 que es de entrada a la transición t_1 . Al dispararse todas las transiciones de Q todas las columnas de C_{QGMEC} se habrán calculado y por lo tanto todos los lugares *monitor* y sus arcos de entrada y de salida (tal como lo indica la proposición anterior). Lo señalado en rojo tanto en la RPI como en la matriz de incidencia corresponde a estos lugares. Como la matriz C_Q se conoce, es posible identificar los lugares *monitor* como los renglones de C_{QGMEC} que no están calculados en C_Q , así el conjunto $-W^T C = C_{QGMEC} / C_Q$.

En la RPI de la figura 5 se pueden realizar diferentes ejecuciones, entre ellas las que hacen que el marcado en los lugares p_2 y p_6 excedan la cota que se establece en la especificación; por ejemplo, la secuencia $s_1 = t_1 t_3 t_3 t_1 t_1 t_3 t_4 t_4 \dots$ ejecutada a partir de M_0 alcanza el marcado $M_i = [030102]^T$ en donde $M_i(p_2) > 2$ y $M_i(p_6) > 1$, el cual no es permitido en el sistema controlado.

En cambio, en el modelo de la figura 7 que fue calculado con el ADE, todas las ejecuciones alcanzan marcados legales y por lo tanto secuencias como la s_1 no pueden llevarse a cabo.

Para mostrar que la especificación implementada con un GMEC se puede detectar con el enfoque de identificación asintótico, es necesario señalar que los renglones marcados en rojo en la matriz C_{QGMEC} son iguales a los renglones calculados con el esquema de GMEC como $-W^T \cdot C$. Estos renglones representan a los lugares monitor en ambos casos. El marcado inicial de los lugares monitor calculado como $k \cdot W^T \cdot M_0$ para implementar el GMEC son también las lecturas de los lugares p_2 y p_6 en el primer símbolo de salida $M_0^S = \phi(M_0^S) = [30300021]^T$ el cual corresponde a 2 y 1 marcas respectivamente, en ambos casos.

Es importante señalar que en el caso de que no se disponga con un modelo Q del sistema (sin control) y el ADE inicie en la fase de las lecturas del sistema controlado, este calculará un el modelo que represente el comportamiento observado.

En base a lo anterior, en un esquema de verificación, el ADE puede ser utilizado para comprobar que se está ejecutando el plan de ejecución correcto al comparar el modelo calculado contra el que fue implementado usando el esquema GMEC.

CONCLUSIONES

El trabajo que aquí se describe se centró en la aplicación de un enfoque de identificación asintótico introducido previamente en la literatura para detectar especificaciones implementadas bajo el esquema de GMEC.

En este sentido, el algoritmo se ejecuta sin conocer las condiciones del sistema ni las características de la señal de entrada, solamente con la instrumentación de los sensores que se refleja en las lecturas de los símbolos de salida. Sin embargo, para efectos de comprobación del algoritmo se asumen ciertas condiciones tales como que el sistema sea vivo y acotado, que sea evento detectable y que la señal de entrada permita la evolución del sistema de tal manera que sea posible modificar las dependencias que se calcularon de manera errónea. En el caso de que el SED no cumpla estas condiciones se calcula un modelo que representa el comportamiento de salida que ha sido observado (las secuencias de salida observadas se reproducen en el modelo calculado).

Por otro lado, se mencionó en el capítulo que los CPS pueden ser considerados como SED debido a la naturaleza discreta de muchos de los eventos que ocurren en ellos, por lo que las redes de Petri pueden ser utilizadas para estudiar a estos sistemas. En cuanto al problema de detección de especificaciones es necesario mencionar que este enfoque no solo facilita el diseño y validación de sistemas ciber-físicos, sino que también asegura que los sistemas cumplan con la especificación y operen de manera segura haciendo posible la operación dentro de los términos establecidos.

Detectar una especificación puede ser de vital importancia en la fase de seguridad de un sistema. Cuando se contrasta la especificación implementada con la especificación detectada con el ADE se puede abordar alguno de los siguientes problemas:

- Validar que el sistema cumple con los criterios de comportamiento.
- Detectar y corregir errores.
- Hay que asegurar que el sistema no presenta vulnerabilidades como ataques cibernéticos, entre otros.

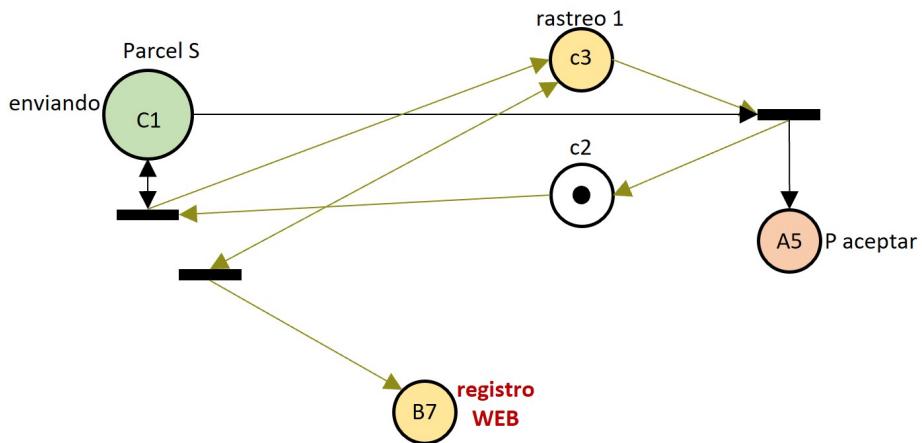
Como trabajo futuro se propone la identificación de SED cuando se conoce además de las señales de salida algunas señales de los actuadores, relajando la propiedad de evento detectabilidad. Asimismo, mostrar que el enfoque de detección de especificaciones es aplicable a cualquier esquema de control que se implemente agregando subestructuras a la RP que representa al SED para hacer que se cumpla una determinada especificación.

REFERENCIAS

- Baheti, R., & Gill, H. (2011). Cyber-physical systems. The impact of control technology, 12(1), 161-166.
- Barragán, I., Tuoh, J. C. S., & Medina, J. (2015). Petri nets representing the evolution of elementary cellular automata. *IEEE Latin America Transactions*, 13(9), 3103-3112.
- Cabasino, M. P., Giua, A., & Seatzu, C. (2006, July). Identification of deterministic Petri nets. In *2006 8th International Workshop on Discrete Event Systems* (pp. 325-331). IEEE.
- Cassandras, C. G., & Lafortune, S. (Eds.). (2008). *Introduction to discrete event systems*. Boston, MA: Springer US.
- Campaña, M. E. M., & Vázquez, A. S. M. (2020). Modelado adaptativo para celdas de manufactura flexible usando redes de Petri interpretadas (Adaptive modeling of flexible manufacturing cells using interpreted Petri nets). *Pistas educativas*, 42(136).
- Deloitte. (2024, mayo 16). *¿Qué es la Industria 4.0?* <https://www2.deloitte.com/cl/es/pages/manufacturing/articles/que-es-la-industria-40.html>
- Dotoli, M., Fanti, M. P., & Mangini, A. M. (2007, September). On line identification of discrete event systems via Petri nets: an application to monitor specification. In *2007 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering* (pp. 893-898). IEEE.
- Giua, A., DiCesare, F., & Silva, M. (1992, October). Generalized mutual exclusion contraints on nets with uncontrollable transitions. In *[Proceedings] 1992 IEEE international conference on systems, man, and cybernetics* (pp. 974-979). IEEE. doi: 10.1109/ICSMC.1992.271666.
- Giua, A., & Seatzu, C. (2005, December). Identification of free-labeled Petri nets via integer programming. In *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control* (pp. 7639-7644). IEEE.
- Gold, E. M. (1978). Complexity of automaton identification from given data. *Information and control*, 37(3), 302-320.
- Hiraishi, K. (1992, June). Construction of a class of safe Petri nets by presenting firing sequences. In *International Conference on Application and Theory of Petri Nets* (pp. 244-262). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Jha, A.V., Appasani, B., Ghazali, A.N. et al. Smart grid cyber-physical systems: communication technologies, standards and challenges. *Wireless Netw* 27, 2595–2613 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11276-021-02579-1>
- Klein, S., Litz, L., & Lesage, J. J. (2005). Fault detection of discrete event systems using an identification approach. *IFAC Proceedings Volumes*, 38(1), 92-97.
- Meda-Campana, M., Ramirez-Treviño, A., & Lopez-Mellado, E. (2000, December). Asymptotic identification of discrete event systems. In *Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 00CH37187)* (Vol. 3, pp. 2266-2271). IEEE.
- Meda-Campana, M. E., & Lopez-Mellado, E. (2001, December). A passive method for online identification of discrete event systems. In *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No. 01CH37228)* (Vol. 5, pp. 4990-4995). IEEE.
- Meda-Campana, M. E., & Lopez-Mellado, E. (2002, December). Incremental synthesis of Petri net models for identification of discrete event systems. In *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 2002.* (Vol. 1, pp. 805-810). IEEE.
- Meda-Campana, M., & López-Mellado, E. (2003). Required transition sequences for DES identification. In *Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control (CDC 2003), Maui, Hawaii USA* (pp. 3778-3782).

COMERCIO ELECTRÓNICO

E-COMMERCE



MODELADO DE TRANSACCIONES DEL COMERCIO ELECTRÓNICO CON REDES DE PETRI INTERPRETADAS

MODELING E-COMMERCE TRANSACTIONS WITH INTERPRETED PETRI NETS

RESUMEN

Este trabajo de investigación presenta una representación formal del proceso de transacción de compra y venta en el *comercio electrónico* (CE) utilizando *Redes de Petri* (RP) y mapas conceptuales para una descripción general. El CE es un área de estudio que ha ganado un marcado interés en los últimos tiempos. La transacción de compra y venta se analiza desde un esquema donde no existe la participación de algún actor que gestione el dinero, lo que subraya que la interacción es directa entre el comprador y el vendedor a través de un portal *web*. Este tipo de esquema se identifica como *transacción directa*. La utilización de mapas conceptuales se debe a que son un recurso que facilita la presentación rápida de procesos complejos y permite su formalización, ya que se asemejan a grafos con etiquetas asociadas a nodos y/o arcos. La descripción del proceso mediante mapas conceptuales se acompaña de una narración de los eventos y/o estados. Formalizar un proceso es conveniente porque facilita su posterior análisis, modificación, mejora, control y/o seguimiento. La representación formal mencionada consiste en una RP interpretada (RPI), la cual permite manipular el detalle del proceso de las transacciones según sea necesario.

PALABRAS CLAVE: Redes de Petri, Redes de Petri Interpretadas, Comercio Electrónico, Modelado.

ABSTRACT

This research work presents a formal representation of the purchase and sale transaction process in *electronic commerce* (e-commerce) using *Petri Nets* (PN) and concept maps for an overview. E-commerce is an area of study that has gained significant interest in recent times. The purchase and sale transaction is analyzed from a scheme where there is no involvement of any actor managing the money, emphasizing that the interaction is direct between the buyer (consumer) and the seller (provider) through a *web* portal. This type of schema is identified as a *direct transaction*. The use of concept maps is due to their ability to facilitate the quick presentation of complex processes and allow for their formalization, as they resemble graphs with labels associated with nodes and/or arcs. The process description through concept maps is accompanied by a narration of the events and/or states. Formalizing a process is convenient because it facilitates its subsequent analysis, modification, improvement, control, and/or monitoring. The mentioned formal representation consists of an interpreted PN (IPN) which allows the manipulation of the transactions process details as needed.

KEYWORDS: Petri Nets, Interpreted Petri Nets, e-Commerce, Modeling.

INTRODUCCIÓN

En años recientes, el desarrollo y uso de plataformas WEB para la venta y compra de productos, se ha incrementado significativamente (AlSalem & AlShamari, 2023). El uso

masivo de las tecnologías de información y comunicación (TIC), apuntala el interés en el estudio de: 1) estrategias de marketing a través de las plataformas de Redes Sociales (Travassos Rosário & Carmo Días, 2023) , 2) cómo atraer y retener a los compradores (Sakalauskas & Kriksciuniene, 2024), 3) cómo dar sentido a estrategias digitales (Manningham, Asseli, & Bourguignon, 2024), 4) cómo superar la barrera de desconfianza del consumidor (Genés-Durán, Hernández-Serrano, Esparza, Bellés-Muñoz, & Muñoz-Tapia, 2021), 5) seguridad en las transacciones comerciales (Aziz, y otros, 2023), 6) elementos jurídicos que atiendan disputas transaccionales (Liu & Yan , 2023), 7) administración de negocios sobre plataformas digitales (Domański, Wojciechowski, Lewandowicz, & Hadaś, 2023), extendiéndose a áreas no directamente relacionadas como el 8) estudio del desarrollo cognitivo con el uso de la tecnología (Velingkar, Kulkarn, & Patavardhan, 2024), etc. El comercio electrónico es parte del área de negocios electrónicos (Ramírez, 2008) y se utiliza incluso como estrategia para la evasión de impuestos (Corabi, 1999), combate a la pobreza (Grupo del Banco Mundial y Organización Mundial del Comercio, 2018) , y, obviamente, desarrollo inmobiliario (Nosratabadi, y otros, 2019), etc. Se han utilizado, para su modelado, estudio y/o desarrollo, diferentes herramientas entre las que destacan diagramas de flujo (Khan, Shams-E-Mofiz, & Sharmin, 2020), grafos (Fang, Yu, Ding, & Lin, 2023), autómatas (Torres, Soto, Ontiveros, & Carrasco, 2008), entre otras.

Las RdP son utilizadas en una amplia variedad de áreas, por ejemplo, en el modelado y análisis de sistemas de control (Tkáčik M. , Jadlovský, Jadlovská, Jadlovská, & Tkáčik, 2024), en el internet de las cosas (Boca, y otros, 2023), en modelos de control de vehículos (Castellanos Contreras & Rodríguez Urreg), en protocolos de seguridad (Feng, Chen, & Gong, 2024), etc., ya que facilita su descripción y estudio (Murata, 1989), análisis (Tkáčik M. , Jadlovský, Jadlovská, Jadlovská, & Tkáčik, 2024) donde se busca mejorar la confiabilidad (Huang, Cheng, Zhou, & Lu, 2023) y/o eficiencia (Pan, Tseng, & Chen, 2023) de procesos y/o sistemas. También se utilizan para diseño y modelado (Chandler & Davidrajuh, 2024), implementación y/o gestión (Dongsheng , Jianmin , Stephen C.F. , Jiaguang, & Li , 2002) de dichos procesos y/o sistemas.

Algunas de las áreas donde se han aplicado las Redes de Petri son la industria automotriz (Benarbia, Kyamakya, Al Machot, & Kambale, 2023), sistemas informáticos (Xiang, Zhao, & Liu, 2021), redes informáticas (Zhang, Feng, Yang, & Li, 2023), salud (Rybarczyk, Formanowicz, Radom, & Formanowicz, 2023), producción industrial (Čapkovič, 2023), administración (Lenz, Mevius, & Oberweis, 2005), sistemas de transporte (Idel Mahjoub, Chakir El-Alaoui, & Nait-Sidi-Moh, 2017), etc. Existen trabajos donde se usan las Redes de Petri para modelado de logística del comercio electrónico (Yu, Yan, Ding, Jiang, & Zhou, 2014), modelado de transacciones comerciales (Medina-Garcia, Medina-Marin, Montaño-Arango, Gonzalez-Hernande, & Hernandez-Gress, 2023), modelado de gestión de negocios (Lenz, Mevius, & Oberweis, 2005), representación de interacciones entre departamentos administrativos (Capek & Bata, 2007)], modelado del rendimiento

de sistemas WEB (Song & Hao, 2012), modelado de cruce de transportes (Mugarza & Mugarza, 2021), modelado del estado de drones (Fedorova, Beliautsou, & Zimmermann, 2022), etc.

Entre los problemas que se han tratado con RdP, se pueden mencionar la toma de decisiones (Kabashkin, 2023), recuperación de fallas (Odrey, 2008), análisis del control de flujo de procesos (Lefebvre, Thomas, Leclercq, & Druaux, 2005), seguridad estructural en sistemas de producción (A. & D. , 2002), seguridad en telecomunicaciones (H. , C., & Z. , 2011), selección de rutas de transporte (Huacan , Xuhong, & Dawei , 2008), implementación de robustez en sistemas de manufactura (B. & H. , 2023), mejora de logística de mantenimiento (de Andrade Melan, de Carvalho Michalski, Murad, Caminada Netto, & Martha de Sousa, 2022), reducción de costos (Lelana & Soepangkat, 2012), etc.

Existe una amplia variedad de Redes de Petri entre las que se pueden mencionar las coloreadas (Feng, Chen, & Gong, 2024), estocásticas (Bause & Kritzinger, 2002), difusas (Kan, Liang, Zha, & Wang, 2023), temporizadas (Strzeciwilk, 2023), probabilísticas (Bernemann, Cabrera, Heckel, & König, 2020), interpretadas (Grobelna & Szczęśniak, 2022), cuánticas (Letia T. , Durla-Pasca, Dahlia , & Cuibus, 2022), etc.

Cabe agregar que también existen trabajos donde se utilizan las Redes de Petri en combinación de otros formalismos, por ejemplo, agentes (Gonçalves, Machado, Rodrigues, & Adamatti, 2022), algoritmos evolutivos (Letia T. S., Durla-Pasca, Al-Janabi, & Cuibus, 2022), redes neuronales (Petrosov, Lomazov, & Petrosova, 2021), redes bayesianas (Lu, Fang, & Fang, 2022), etc.

En este trabajo se utilizan las RdP como una herramienta formal de representación del proceso de transacción simple del comercio electrónico. La representación se forma de manera modular, partiendo de un esquema general. En los módulos se tienen submódulos que incrementan el nivel de detalle del proceso transaccional.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. La siguiente sección presenta el glosario de definiciones seguido del marco teórico sobre la RdP. La siguiente sección muestra el contexto general de las transacciones de CE utilizando mapas conceptuales. Posteriormente, se obtiene el modelo de transacciones de CE como bloques de casos utilizando RdP. Finalmente se dan las conclusiones.

MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan el glosario y se describe la transición de *compra-venta directa (dpst)* para que se entiende la propuesta.

Glosario

Greed state (Gs): es el nivel emocional en el cual una *entidad* procede a la compra de un producto.

Producto (P): es un servicio y/u objeto que es ofrecido en un mercado.

Consumidor (Cmer): *entidad* que adquiere un *P* a través de una *transacción de compra-venta*.

Entity: una organización o individuo.

Transacción de compra-venta (pst): proceso de pagar con dinero y recibir a cambio un *P*.

Proveedor (Pder): *entidad* que ofrece su *P* y busca realizar una *pst* por dicho *P*.

En el contexto del *CE*, el *Cmer* y *Pder* son *consumidores en línea* (*eCmer*) y *proveedores en línea* (*ePder*), respectivamente.

pst directo (dpst): el *ePder* y/o *eCmer* hacen las operaciones de dinero, sin intermediarios.

Matriz de pre- incidencia y pos- incidencia: la matriz de pre- incidencia de *G* es $C^-=[c_{ij}^-]$ donde $c_{ij}^- = I(p_i, t_j)$; la matriz de pos- incidencia de *G* es $C^+=[c_{ij}^+]$ donde $c_{ij}^+ = 0(p_i, t_j)$; la matriz de incidencia de *G* es $C = C^+ - C^-$.

Una función de marcado $M: P \rightarrow \mathbb{Z}^+$ *da el número de marcas (representadas por *) que residen dentro de cada lugar.*

Disparo en RP: una transición t_j puede ser disparada alcanzando un nuevo marcado M_{k+1} el cual puede ser calculado usando la ecuación de estado de la RP: $M_{k+1} = M_k + C^+ v_k - C^- v_k$ donde $v_k(i) = 0, i \neq j, v_k(j) = 1$.

Un conflicto estructural es una subestructura de RP en donde dos o más transiciones tienen uno o más transiciones de entrada; dichas transiciones se habilitan simultáneamente y con el disparo de una de ellas, se desactivan las demás.

Nota: En este trabajo las RP son vivas, pero no 1-acotada. En la RP los lugares tienen asociadas etiquetas que describen un estado. La RP tiene lugares de control identificados por la letra minúscula *c* y un número, $c_i | i \in \mathbb{N}$.

Las transiciones son referidas indistintamente por sus lugares de entrada y/o salida $t \in (p_i \wedge p_j)$, respectivamente, ya que carecen de etiqueta durante el proceso de obtención del modelo.

Descripción general del *dpst*

El *dpst* tiene cuatro actores que se exponen como bloques, los cuales están interrelacionados, como se muestra en la figura 1. Los bloques son relativos a acciones o eventos que ocurren en ellos. Cada bloque representa un *actor* en el *dpst*. Todos los bloques se consideran *actores animados* porque entre ellos hay comunicación, acciones y reacciones. Los actores protagonistas, *ePder* y *eCmer*, tienen una comunicación indirecta. El actor *WEB* corresponde a todo estado en que se involucra la asistencia del portal *WEB*. El servicio de paquetería se identifica por la etiqueta *Parcel S*.

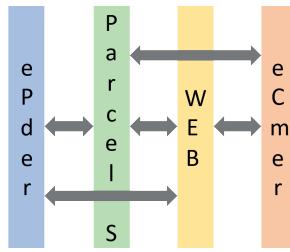


Figura 1. Interacción de actores en el *dpst*. Fuente (González et al., 2022).

El *dpst* se muestra con un mapa conceptual en la figura 2. El mapa conceptual se asemeja a un grafo donde hay nodos unidos por arcos. Cabe mencionar que los mapas conceptuales son herramientas prácticas para representar procesos complejos, sin embargo, el poder de representación de los mapas conceptuales es limitado porque los bucles tienen una descripción imprecisa y el flujo es ambiguo y/o confuso. Para clarificar el mapa conceptual del *dpst*, se hace su descripción a través de la tabla 1. Los estados de los actores, dentro del *dpst*, son caracterizados por colores para una identificación visual conveniente.

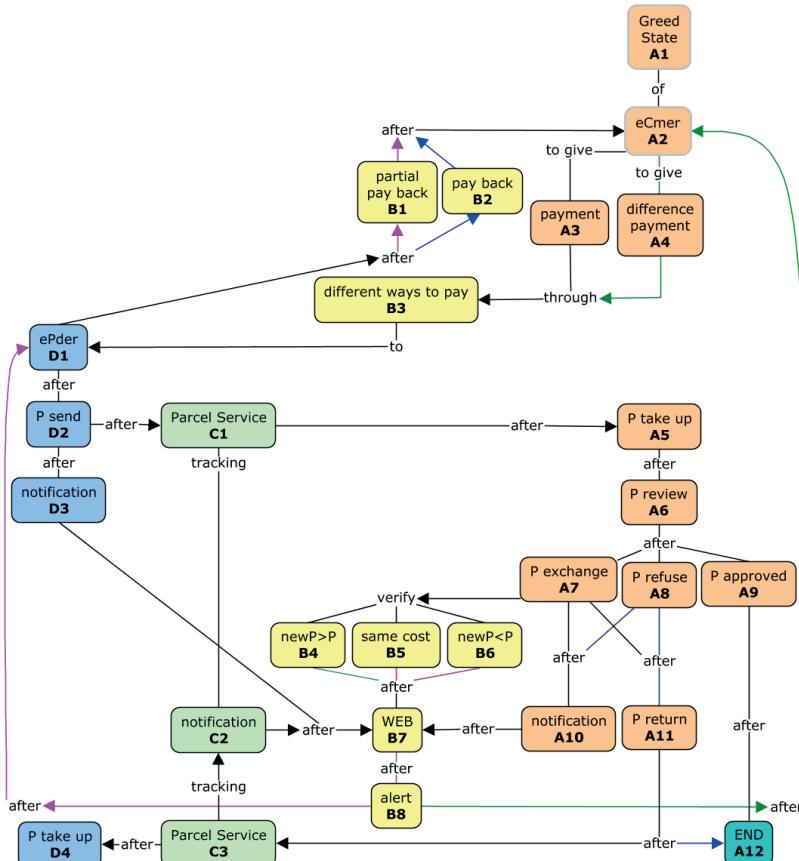


Figura 2. Mapa conceptual del ciclo del *dpst*. Fuente (González et al., 2022).

Tabla 1. Descripción del *dpst*.

Nodo	Descripción
A1	El <i>eCmer</i> tiene un estado <i>Gs</i>
A2	<i>eCmer</i> está listo a continuar o terminar el <i>dpst</i>
A3	<i>eCmer</i> inicia el pago al <i>ePder</i>
B3	El pago podría hacerse usando diferentes medios electrónicos
D1	Después de que <i>ePder</i> recibe el dinero y/o a recibido el <i>P</i> , el <i>ePder</i> toma las medidas necesarias para atender al <i>eCmer</i>
D2	Logística para enviar <i>P</i> al <i>eCmer</i> en un servicio de paquetería
D3	El <i>ePder</i> notifica a través del portal WEB que <i>P</i> es enviado
B7	Registro WEB
C1	Tránsito del Servicio de Paquetería
C2	El rastreo de <i>P</i> también involucra cuando es recibido: ...B7, A5...
A5	El <i>eCmer</i> recibe el <i>P</i>
A6	El <i>eCmer</i> revisa el <i>P</i> y toma una decisión: cambio, rechazo o aprobación
A9	El <i>eCmer</i> está satisfecho con <i>P</i> Notificación indirecta a <i>ePder</i> , que <i>eCmer</i> está satisfecho con <i>P</i> pero, no es mencionado aquí.
A12	El <i>dpst</i> ha terminado (FIN)
A8	<i>P</i> es rechazado
A10	Se notifica a <i>ePder</i> que <i>eCmer</i> ha rechazado <i>P</i> o que quiere un cambio ...B7, B8...
B8	La alerta es activada tras registrar en la WEB que <i>P</i> fue rechazado o que se cambiará
A11	Logística para enviar <i>P</i> a <i>ePder</i> a través del servicio de paquetería
C3	Tránsito del servicio de paquetería: ...C2, B7, D4...
D4	El <i>ePder</i> recibe el <i>P</i> : ...D1, B2...
B2	<i>ePder</i> regresa el pago al <i>eCmer</i> y el <i>dpst</i> termina: ...A2, A12
A7	<i>eCmer</i> quiere cambiar <i>P</i> y uno de tres casos puede presentarse (B4, B5, B6)
B4	El precio del nuevo <i>P</i> seleccionado es mayor <ul style="list-style-type: none"> • B7, B8: Notificación al <i>eCmer</i> que es necesario cubrir la diferencia de precio • A2: <i>eCmer</i> está listo para continuar con el <i>dpst</i> ...A4...
A4	<i>eCmer</i> paga la diferencia de precio al <i>ePder</i> <ul style="list-style-type: none"> • B3: El pago se puede hacer a través de diferentes medios • D4: <i>eCmer</i> retorna el <i>P</i> al <i>ePder</i> • D1: Despues de que <i>ePder</i> recibe el dinero y el <i>P</i>, <i>ePder</i> está en disposición de atender el requerimiento de cambio del <i>P</i> y el ciclo del <i>dpst</i> continua ...D2...
B5	El precio del <i>P</i> es el mismo que el del nuevo <i>P</i> seleccionado <ul style="list-style-type: none"> • B7, B8: Notificación al <i>ePder</i> que no hay movimiento de dinero • D4: <i>eCmer</i> regresa el <i>P</i> a <i>ePder</i> • D1: Despues de que <i>ePder</i> recibe el <i>P</i>, <i>ePder</i> procede a atender el requerimiento de cambio del <i>P</i> y el ciclo del <i>dpst</i> continua ...D2...
B6	El precio del nuevo <i>P</i> seleccionado es menor <ul style="list-style-type: none"> • B7, B8: Notificación al <i>ePder</i> que el precio del nuevo <i>P</i> seleccionado es menor • D4: <i>eCmer</i> regresa el <i>P</i> al <i>ePder</i> • D1: Despues de que <i>ePder</i> recibe el <i>P</i> y hace el reembolso parcial de dinero, <i>ePder</i> procede a atender el requerimiento de cambio del <i>P</i> y el ciclo del <i>dpst</i> continua ...D2...
B1	<i>ePder</i> hace un reembolso parcial de dinero al <i>eCmer</i> <ul style="list-style-type: none"> • Esto es un evento paralelo y asincrónico, y es necesario para terminar el <i>dpst</i> ...A2...

Fuente propia.

En la tabla 1, las viñetas (⁰) describen los nodos que continúan desde el nodo que se describe in situ. Los puntos sucesivos como prefijo de la etiqueta de un nodo significan que el ciclo de la transacción continúa hasta él. Los puntos sucesivos que son sufijos de la etiqueta de un nodo indican que el ciclo de la transacción continúa desde allí.

METODOLOGÍA

En esta sección se presenta el método para obtener un modelo de *dpst* con RP, primero se explica el proceso de transacción básico, luego el seguimiento del *P* en el *Parcel S*, el rechazo del *P*, el cambio del *P* (por otro del mismo precio, por otro más barato y por otro de mayo precio), seguido de la composición entre el inicio del *dpst* y el cambio de *P* (por otro más caro, por otro más y el aprobado, por otro más caro, aprobado y el precio del nuevo cuando menor, por otro más caro, aprobado, el precio del nuevo cuando menor y el precio nuevo cuando es igual, por otro más caro, aprobado, el precio del nuevo cuando menor, el precio nuevo cuando es igual y es rechazado).

Proceso de transacción básico

La figura 3 muestra el *dpst-básico*. Todos los *actores* están presentes. El proceso inicia cuando el *Cmer* alcanza un nivel de deseo (A1) que propicia hacer el requerimiento del producto, convirtiéndose así en un *eCmer* (A2). El *eCmer* hará el pago a través de diferentes opciones como transferencia bancaria, pago con tarjeta, etc., (B3). No se modelarán las diferentes opciones por simplicidad del esquema y porque existen diferentes configuraciones modificables de forma relativamente rápida ya que es parte de las acciones de la *WEB*. Si se quisiera ampliar el modelo, podrían agregarse más lugares *B1x* tal que $x=\{1,2,\dots\}$ y donde cada índice corresponde a un tipo de pago. Posterior al estado de pago (B3), el *ePder* (D1) tomará (PP) el *P* del almacén (store) dado que existe una confirmación (c1) de dicho pago. El *P* será enviado (C1) y se hará la notificación de dicho envío (D3) después de haber sido preparado (D2). En paralelo con dicho envío, se hace el registro del envío en la *web* (B7). El *Parcel S* hace la entrega del *P* al *eCmer* (A5). El *eCmer* revisa su compra (A6) y posterior a eso, lo aprueba (A9) con lo que termina el *dpst* (A12). La tabla 2 describe de manera formal, la evolución del marcado.

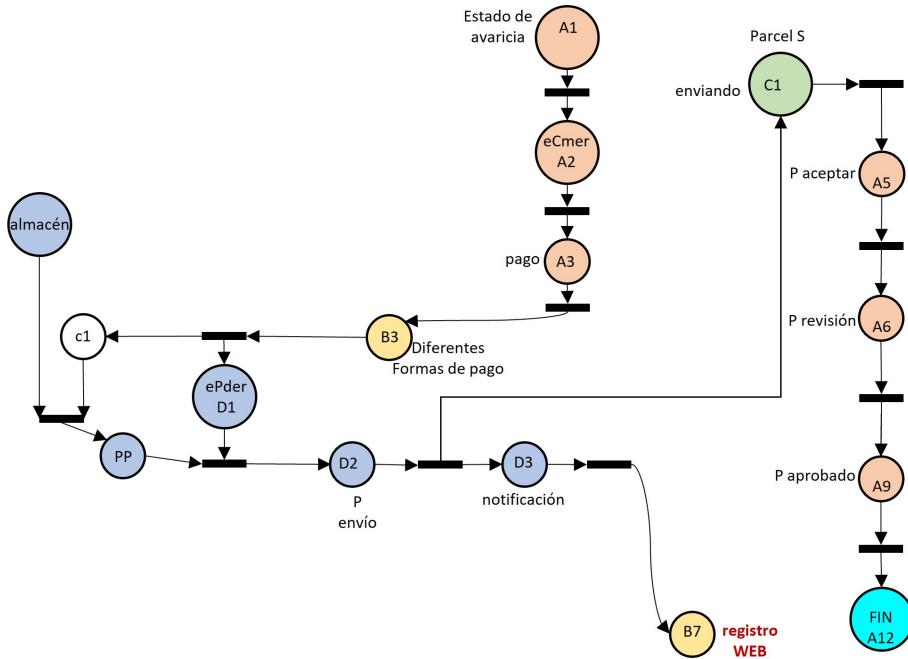


Figura 3. Proceso de transacción básica. Fuente propia.

Tabla 2. Evolución del marcado en el proceso de transacción básica.

Lugar	Descripción
<i>A1</i>	<i>A1</i> tiene una marca al empezar
<i>A2</i>	<i>A2</i> consigue una marca después de que $t \in A1^\bullet$ es disparada
<i>A3</i>	<i>A3</i> consigue una marca después de que $t \in A2^\bullet$ es disparada
<i>B3</i>	<i>B3</i> consigue una marca después de que $t \in A3^\bullet$ es disparada
<i>D1</i>	<i>D1, c1</i> consiguen una marca después de que $t \in B3^\bullet$ es disparada
<i>c1</i>	
<i>store</i>	The <i>store</i> always has marks
<i>PP</i>	Las siguientes expresiones son equivalentes, $t \in \text{store} \equiv t \in c1 \bullet \equiv t \in \text{PP} \equiv t \in (\text{store} \bullet \wedge C1) \equiv t \in (\text{store} \bullet \wedge \text{PP}) \equiv t \in (C1 \bullet \wedge \text{PP}) \equiv t \in (\text{store} \bullet \wedge C1 \bullet \wedge \text{PP})$ <i>PP</i> consigue una marca después de que $t \in (\text{store} \bullet \wedge C1)^\bullet$ es disparado
<i>D2</i>	Las siguientes expresiones son equivalentes, $t \in D1 \equiv t \in \text{PP} \bullet \equiv t \in D2 \equiv t \in (D2 \bullet \wedge \text{PP})^\bullet$ <i>D2</i> consigue una marca después de que $t \in (D2 \bullet \wedge \text{PP})^\bullet$ es disparada
<i>D3</i>	<i>D3, C1</i> consiguen una marca después de que $t \in D2^\bullet$ es disparada
<i>C1</i>	
<i>B7</i>	<i>B7</i> consigue una marca después de que $t \in D3^\bullet$ es disparada
<i>A5</i>	<i>A5</i> consigue una marca después de que $t \in C1^\bullet$ es disparada
<i>A6</i>	<i>A6</i> consigue una marca después de que $t \in A5^\bullet$ es disparada
<i>A9</i>	<i>A9</i> consigue una marca después de que $t \in A6^\bullet$ es disparada
<i>A12</i>	<i>A12</i> consigue una marca después de que $t \in A9^\bullet$ es disparada

Fuente propia.

Seguimiento del *P* en el *Parcel S*

En la figura 4 se amplía el detalle del *proceso de transacción básico* descrito anteriormente, agregando el seguimiento del *Parcel S*. Lo anterior hace referencia a lo que sucede entre el estado en que el *Parcel S* tiene el producto (*C1*) y la entrega al *eCmer* (*A5*). Se agregan dos transiciones y dos lugares de control (*c2*, *c3*) donde *c2* está marcado, inicialmente. Cuando *C1* tiene marca, significa que el *Parcel S* tiene un paquete para entrega. Se habilita la transición $t \in (C1 \cdot \Lambda C2 \cdot)$ que se dispara para colocar una marca en *C1* y *c3*. La marca en *c3* corresponde al reporte que hace el *Parcel S* en la trayectoria que se sigue, para la entrega del *P*. Esto se modela con el disparo de la transición $t \in (c3 \cdot \Lambda \cdot B7)$, que coloca una marca en *B7* y que corresponde al registro realizado en la *WEB*. Cualquiera, sea *eCmer*, *ePder* y/o *Parcel S*, podría revisar y/o ser notificado sobre los registros hechos en la *WEB*, sin embargo, eso no se ha considerado para este trabajo. Al llegar al destino de envío, se entrega el *P* al *eCmer* y esto se modela con el disparo de la transición $t \in C1^\circ \wedge c3^\circ$ que restaura la marca que tenía *c2* y coloca otra marca en *A5*. La Tabla 3 describe de manera formal, la evolución del marcado.

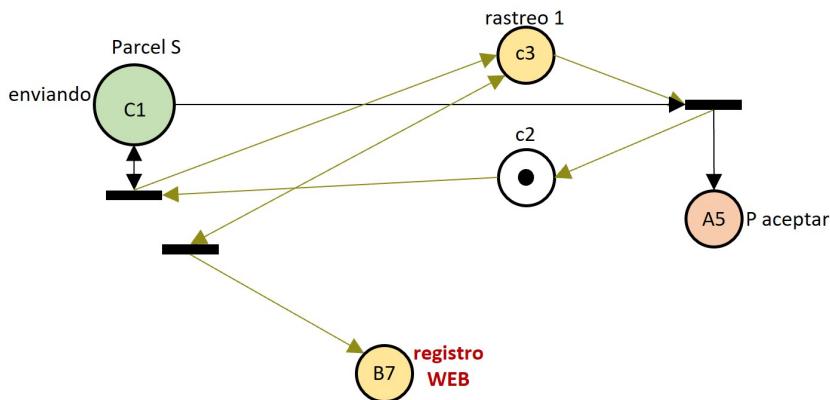


Figura 4. Seguimiento del *Parcel S*. Fuente propia.

Tabla 3. Evolución del marcado en el seguimiento de la entrega.

Lugar	Descripción
<i>C1</i>	<i>C1</i> tiene una marca La marca de este lugar es perdida y ganada con el disparo de $t \in (C1 \cdot \wedge c2 \cdot)$
<i>c2</i>	Inicialmente, <i>c2</i> tiene una marca y la pierde después de que $t \in (C1 \cdot \wedge c2 \cdot)$ es disparada Nota: Aquí, solo $t \in (C1 \cdot \wedge c2 \cdot)$ está habilitada
<i>c3</i>	<i>c3</i> consigue una marca después de que $t \in (C1 \cdot \wedge c2 \cdot)$ es disparada <i>c3</i> puede disparar $t \in (c3 \cdot \wedge \cdot B7)$ muchas veces hasta que el rastreo termine
<i>B7</i>	<i>B7</i> consigue una marca después de que $t \in (c3 \cdot \wedge \cdot B7)$ es disparada
<i>A5</i>	<i>C1</i> y <i>c3</i> pierden su marca y, <i>c2</i> y <i>A5</i> consiguen una marca después de que $t \in C1^\circ \wedge c3^\circ$ es disparada
...	...

Fuente propia.

Rechazo del P

Ahora, en la figura 5 se considera lo que sucede cuando el P es rechazado y/o no lo desea el $eCmer$. Una vez revisado el P por el $eCmer$, éste considera que no lo quiere y la razón puede ser de cualquier índole, por ejemplo, tamaño, color, acabados, etc. La marca de $A6$ dispara la transición $t \in A6^\circ$ que, referida junto con el proceso de transacción básico en la figura 3, es $t \in (A6 \wedge A10 \wedge A8 \wedge c6 \wedge C3)$. Despues del disparo se coloca una marca en $A8$, $A10$, $c6$ y $C3$. El lugar $A8$ es similar una bandera que indica que el P fue rechazado. El lugar $A10$ es un estado que habilita una notificación que se hará en la *WEB* ($B7$). La marca que tiene $C3$ indica que el *Parcel S* tiene el P y hará el retorno al *ePder*. En la evolución del marcado entre el lugar $C3$ y el lugar PP , se hace un seguimiento del *Parcel S* como el descrito anteriormente en la figura 4. El marcado previo del lugar $c6$ y la marca que ha adquirió del lugar PP , habilitan el disparo de la transición $t \in (PP \wedge c6^\bullet)$. Lo anterior se interpreta como que el P ha sido recibido por el *ePder* (marca en PP) y que se debió a un rechazo de dicho P (marca en $c6$). En este punto, es de notar que $c6$ y $c7$ son lugares de control que, junto a la transición $t \in (PP \wedge c6^\bullet)$, podrían ser eliminados de este esquema como se ve en figura. 5. Su presencia es a propósito de buscar reducir, en un siguiente trabajo, la RP, sin perder el poder de representación. Siguiendo, con el disparo de $t \in (PP \wedge c6^\bullet)$ se marca el lugar $c7$. Como el lugar $A8$ ya está marcado, se habilita el disparo de $t \in (A8 \wedge c7^\bullet)$. Una vez disparado $t \in (A8 \wedge c7^\bullet)$, se marca el lugar $B2$ que se interpreta como un estado donde el *ePder* devuelve el dinero a través de la *WEB*. Finalmente, con el disparo de la transición $t \in B2^\bullet$ se marca el lugar $A12$ que corresponde al fin del *dpst*. La tabla 4 describe de manera formal, la evolución del marcado.

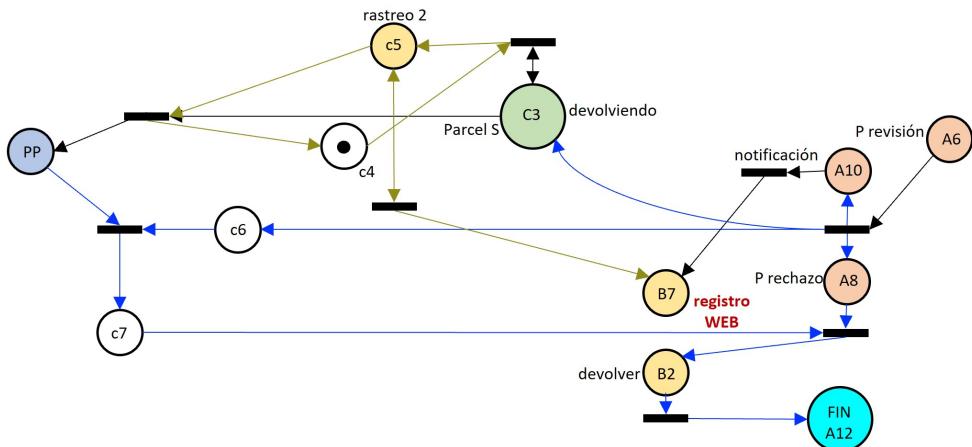


Figura 5. Rechazo del producto. Fuente propia.

Tabla 4. Evolución del marcado en el rechazo del P.

Lugar	Descripción
$A6$ $c4$	$A6$ y cc están marcados $A6$ es un lugar de decisión
$A10$ $A8$ $C3$ $c6$	$A10, A8, C3, c6$ consiguen una marca después de que $t \in A6^\bullet$ es disparada Después de esto, solo $t \in (C3 \wedge c4^\bullet)$ queda habilitada
$c5$	$c5$ consigue una marca después de que $t \in (C3 \wedge c4^\bullet)$ es disparada $c5$ puede disparar $t \in (c5 \wedge B7)$ muchas veces hasta que el rastreo termine
$B7$	$B7$ consigue una marca después de que $t \in (c5 \wedge B7)$ or $t \in (A10 \wedge B7)$ es disparada
PP $c4$	$PP, c4$ consigue una marca después de que $t \in (C3 \wedge c5^\bullet)$ es disparada Después de eso, solo $t \in (PP \wedge c6^\bullet)$ queda habilitada
$c7$	$c7$ consigue una marca después de que $t \in (PP \wedge c6^\bullet)$ es disparada Después de esto, solo $t \in (A8 \wedge c7^\bullet)$ queda habilitada
$B2$	$B2$ consigue una marca después de que $t \in (A8 \wedge c7^\bullet)$ es disparada
$A12$	$A12$ consigue una marca después de que $t \in B2^\bullet$ es disparada

Fuente propia.

Cambio del P por otro del mismo precio

La figura 6 muestra la evolución del marcado cuando se cambia el P por otro del mismo precio entendiéndose que puede ser incluso el mismo P originalmente adquirido, pero con una variante, tal vez de color, tamaño, etc. El $eCmer$, después de revisar el P ($A6$) decide hacer un cambio por otro P del mismo precio. Se dispara la transición $t \in (A7 \wedge A10 \wedge C3)$ que en la figura 6 es $t \in A6^\bullet$. Es necesario puntualizar lo anterior porque se debe recordar que $A6$ es parte del *proceso de transacción básico* de la figura 3, y/o del esquema del *rechazo del P* de la figura 5, y que, por lo tanto, en conjunción, tiene más de una transición de salida. Siguiendo, los lugares $A7$, $A10$ y $C3$ reciben una marca. El lugar $A10$ significa que se habilita hacer la notificación de cambio del P , en la *WEB*. El lugar $A7$ representa el estado de cambio de P . El lugar $C3$ representa el estado donde el *Parcel S* recibe el P y lo devolverá al *ePder*. La evolución de la devolución a partir del lugar $C3$, ya se explicó anteriormente en la figura 5. Siguiendo, la marca en $A7$ habilita el disparo de $t \in A7^\bullet$ con lo que adquirirán una marca los lugares $B5$ y $c8$. El lugar $B5$ es un estado que hará el registro en la *WEB* de que el nuevo P tiene el mismo precio que el P que se devolverá. El lugar $c8$ es un lugar de control, necesario para sincronizar que él envío del nuevo P se realice una vez que el P rechazado llegue al *ePder* (PP). El disparo de la transición $t \in (PP \wedge c8^\bullet)$ colocará una marca en $c1$ y $D1$. La marca del lugar $c1$ habilita que se tome un nuevo P del almacén (store). La marca en $D1$ representa el estado en el cual el *ePder* está en disposición de mandar el P . El lugar PP será marcado una vez se tome el nuevo P del almacén (store) y el lugar de control $c1$ indique que dicha acción es válida. El lugar PP es un estado que refleja que el *ePder* tiene un P a disposición de almacenarlo o

enviarlo, aunque, la acción de almacenamiento es transparente en el modelo y en su lugar se acentúa la reacción del *ePder*. Si se quisiera acentuar el retorno del *P* al almacén (store) se tendría que colocar un arco de $t \in (c5 \cdot \wedge C3 \cdot)$ al almacén (store) y en ese caso el lugar *PP* reflejaría solo el estado de disposición del *P* a ser enviado. Como *D1* y *PP* tienen marca, entonces se habilita la transición $t \in (PP \cdot \wedge D1 \cdot)$ cuyo disparo pondrá una marca en *D2* que significará que el nuevo *P* será enviado al *eCmer*. La tabla 5 describe de manera formal, la evolución del marcado.

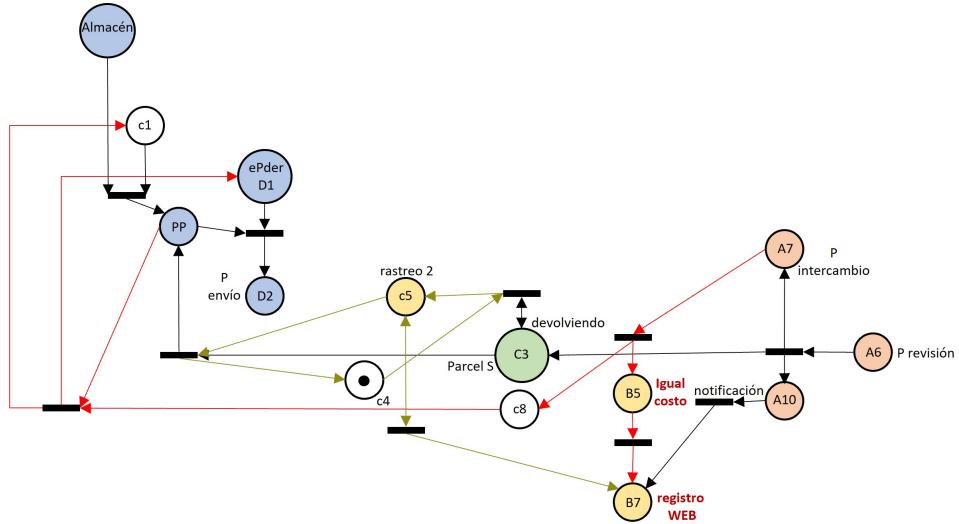


Figura 6. Cambio del P por otro del mismo precio. Fuente propia.

Tabla 5. Evolución del marcado para un cambio de P por otro del mismo precio.

Lugar	Descripción
$A6$ $c4$	$A6$ y $c4$ están marcados
Almacén	El <i>store</i> siempre tiene marcas
$A7$ $C3$ $A10$	$A7, C3, A10$ consiguen una marca después de que $t \in A6^\circ$ es disparada
$c5$	$c5$ consigue una marca después de que $t \in (C3 \bullet c4^\bullet)$ es disparada $c5$ puede disparar $t \in (c5^\bullet \wedge B7)$ muchas veces hasta que el rastreo termine
$B7$	$B7$ consigue una marca después de que $t \in (A10^\bullet \vee B5^\bullet \vee (c5^\bullet \wedge B7))$ es disparada
$B5$ $c8$	$B5, c8$ consiguen una marca después de que $t \in A7^\bullet$ es disparada
PP $c4$	$PP, c4$ consiguen una marca después de que $t \in (c5^\bullet \wedge C3^\bullet)$ es disparada Con $c8$ y P marcados, solo $t \in (P^\bullet \wedge c8^\bullet \circ)$ queda habilitada
$c1$ $D1$	$c1, D1$ consiguen una marca después de que $t \in (PP^\bullet \wedge c8^\bullet)$ es disparada $PP \mid PP$ consigue una marca después de que $t \in (c1^\bullet \wedge store^\bullet)$ es disparada
$D2$	$D2$ consigue una marca después de que $t \in (PP^\bullet \wedge D1^\bullet)$ es disparada
...	...

Fuente propia.

Cambio del P por otro más barato

El proceso de representación del caso donde se solicita un cambio de P por otro que es más barato, es más complejo y requiere un mayor número de lugares de control para regular la evolución del marcado de tal manera que se ajuste a la evolución de los lugares utilizados anteriormente en la figura 3, 5, y 6. La figura 7 modela el $dpst$ cuando se hace un cambio de un P por otro de menor precio, se toman muchos lugares que están en la RP de la figura 6 donde se modela el caso cuando se hace el cambio de P por otro del mismo precio. Por lo anterior, se omitirá explicar la evolución del marcado de los lugares $C3$ y $A10$. El marcado en el lugar $A7$ significa, al igual que en el caso del cambio del P por otro del mismo precio que se desea como en la figura 6. Después del disparo de la transición $t \in B6$, el lugar $B6$ toma una marca donde se representa que el nuevo producto P tiene menor precio que el que se está devolviendo. Una vez que el $ePder$ recibe el P devuelto (PP) entonces procede a hacer la devolución parcial de dinero y esto se representa con la habilitación y disparo de la transición $t \in (PP \wedge B6)$. Este disparo coloca una marca en $c9$ y $c1$. La marca en $c1$ habilita a que se tome un P del almacén para ser enviado (PP). La marca en $c9$ inicia la sincronización de las dos condiciones que se deben dar para validar que el $dpst$ evoluciona correctamente las cuales son 1) *envió del nuevo P* y 2) *devolución parcial de dinero*. El disparo de la transición $t \in c9$ colocará una marca en $D1$ y $c10$. La marca en $D1$ indica que el $ePder$ está en condiciones de enviar el nuevo P , una vez que se ha recibido el anterior (PP). El lugar PP tuvo una marca debido al retorno del P , que perdió para iniciar el proceso de devolución parcial de dinero y que vuelve a recuperar para indicar que un nuevo P se tomó del almacén (*store*) y está listo para que el $ePder$ tome la decisión de enviarlo. Una vez se tome la decisión de envío, el lugar $c11$ y $D2$ tomarán una marca. El lugar $c10$ indica que el $ePder$ está enterado de que se devolverá un P . El lugar $c11$ indica que el $ePder$ hará la devolución parcial de dinero. El lugar $c13$ es un lugar inicialmente marcado y es necesario para asegurar la evolución del marcado entre $D1$ y $D2$ debido a la regla que específica que el $ePder$ hará la devolución de dinero solo si ha recibido el P rechazado y que enviará el nuevo P una vez que ha realizado la devolución parcial de dinero y que no afectará la evolución normal del marcado si se diera el caso de cambio de P por otro del mismo precio como en la figura 6. Debido a que $c10$ y $c11$ tienen marca, entonces se puede disparar la transición $t \in (c10 \wedge c11)$ que colocará una marca en $B1$. El lugar $B1$ indica que se hace la devolución parcial de dinero. El marcado del lugar $B1$ puede disparar la transición $t \in B1$ que colocará una marca en el lugar $c12$. El lugar $c12$ y la transición $t \in B1$ podrían ser omitidos, pero se han dejado con el fin de hacer legible la presentación de la evolución del marcado. Dado que $D2$ y $c12$ están marcados, se puede disparar la transición $t \in (D2 \wedge c12)$ con lo que $c13$ recuperará su marcado inicial y $C1$ indicará que el nuevo P fue enviado. La tabla 6 describe de manera formal, la evolución del marcado.

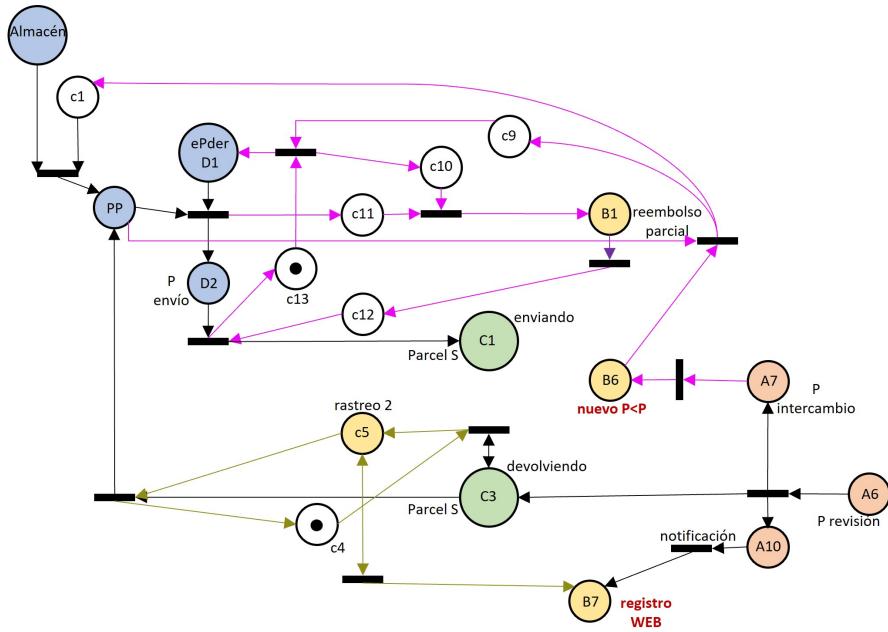


Figura 7. Cambio de P por otro más barato. Fuente propia.

Tabla 6. Evolución del mercado para un cambio de P por otro de menor precio.

Lugar	Descripción
$A6$ $c4$ $c13$	$A6$, $c4$ y $c13$ están marcados
Almacén	El store siempre tiene marcas
$A7$ $C3$ $A10$	$A7$, $C3$, $A10$ consiguen una marca después de que $t \in A6^\bullet$ es disparada
$c5$	$c5$ consigue una marca después de que $t \in (C3^\bullet \wedge c4^\bullet)$ es disparada Después de que $c5$ consigue una marca, $c5$ puede disparar $t \in (c5^\bullet \wedge B7)$ muchas veces hasta que el rastreo termine
$B7$	$B7$ consigue una marca después de que $t \in (A10 \vee (c5^\bullet \wedge B7))$ es disparada
PP $c4$	PP , $c4$ consiguen una marca después de que $t \in (c5^\bullet \wedge C3^\bullet)$ es disparada
$B6$	$B6$ consigue una marca después de que $t \in A7^\bullet$ es disparada Con PP marcado, solo $t \in (PP^\bullet \wedge B6^\bullet)$ queda habilitada
$c1$ $c9$	$c1$, $c9$ consiguen una marca después de que $t \in (PP^\bullet \wedge B6^\bullet)$ es disparada PP consigue una marca después de que $t \in (c1^\bullet \wedge store^\bullet)$ es disparada
$D1$ $c10$	$D1$, $c10$ consiguen una marca después de que $t \in (c9^\bullet \wedge c13^\bullet)$ es disparada
$D2$ $c11$	$D2$, $c11$ consiguen una marca después de que $t \in (PP^\bullet \wedge D1^\bullet)$ es disparada Después de esto, solo $t \in B1$ queda habilitada
$B1$	$B1$ consigue una marca después de que $t \in (c10^\bullet \wedge c11^\bullet)$ es disparada
$c12$	$c12$ consigue una marca después de que $t \in B1^\bullet$ es disparada
$C1$	$C1$ consigue una marca después de que $t \in (D2^\bullet \wedge c12^\bullet)$ es disparada
...	...

Fuente propia.

Cambio de P por otro de mayor precio

El modelo de RdP que modela el caso del cambio de P por otro de mayor precio, se muestra en la Figura 8. La evolución del marcado a partir del disparo de $t \in A6$ en los lugares $C3$ y $A10$, es igual a los casos ya vistos en la figura 6 y 7. El disparo de la transición $t \in B4$ coloca una marca en el lugar $B4$ que significa que se hará un cambio de P por otro de mayor precio. El marcado de $B4$ habilita el disparo de la transición $t \in A2$. El disparo de dicha transición colocará una marca en el lugar $A2$ que significa que el $eCmer$ es consciente de que debe realizar un pago de ajuste. El marcado de $A2$ habilita la transición $t \in A4$ cuyo disparo colocará una marca en $A4$. La marca en $A4$ indica que el $eCmer$ sabe el monto adicional a pagar. La transición $t \in B3$ se disparará cuando el PP este marcado lo que se interpreta con la regla de que se realizará el pago ($B3$) solo si el $ePder$ ha recibido el P para cambio. La evolución de la RP a partir del marcado de $B3$ es igual al descrito anteriormente en la figura 3. La tabla 7 describe de manera formal, la evolución del marcado.

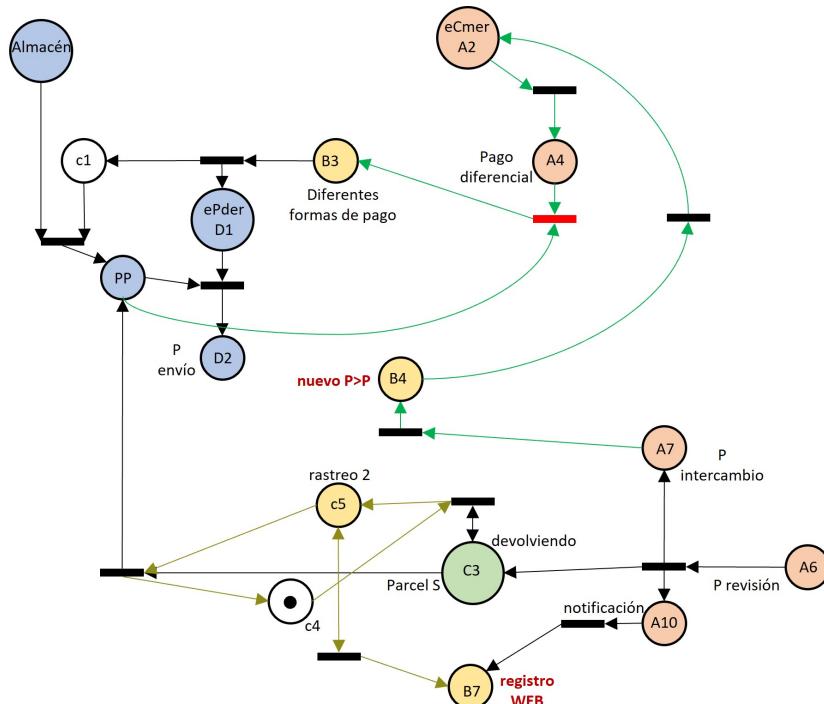


Figura 8. Cambio de P por otro de mayor precio. Fuente propia.

Tabla 7. Evolución del mercado para un cambio de P por otro de mayor precio.

Lugar	Descripción
$c4$ $A6$	$c4, A6$ están marcados
Almacen	El store siempre tiene marcas
$A7$ $C3$ $A10$	$A7, C3, A10$ consiguen una marca después de que $t \in A6^\bullet$ es disparada
$c5$	$c5$ consigue una marca después de que $t \in (C3^\bullet \wedge c4^\bullet)$ es disparada Después de que $c5$ consigue una marca, $c5$ puede disparar $t \in (c5^\bullet \wedge B7)$ muchas veces hasta que el rastreo termine
$B7$	$B7$ consigue una marca después de que $t \in (A10^\bullet \vee (c5^\bullet \wedge B7))$ es disparada
PP $c4$	$PP, c4$ consiguen una marca después de que $t \in (c5^\bullet \wedge C3^\bullet)$ es disparada $c4$ regresa a las condiciones iniciales Esto significa que el P rechazado por el $eCmer$ fue recibido por el $ePder$
$B4$	$B4$ consigue una marca después de que $t \in A7^\bullet$ es disparada
$A2$	$A2$ consigue una marca después de que $t \in B4^\bullet$ es disparada
$A4$	$A4$ consigue una marca después de que $t \in A2^\bullet$ es disparada
$B3$	Con PP marcado, $B3$ puede conseguir una marca después de que $t \in (A4^\bullet \wedge PP^\bullet)$ es disparada $t \in (A4^\bullet \wedge PP^\bullet)$ sincroniza dos condiciones antes de entregar el nuevo P
$D1$ $c1$	$D1, c1$ consiguen una marca después de que $t \in B3^\bullet$ es disparada
PP	PP consigue una marca después de que $t \in (store^\bullet \wedge c1^\bullet)$ es disparada Esto significa que el nuevo P será enviado
$D2$	$D2$ consigue una marca después de que $t \in (PP^\bullet \wedge D1^\bullet)$ es disparada
...	...

Fuente propia.

En la figura 9 se muestra un modelo simplificado del caso de cambio de P por otro de menor precio. El proceso AP implica el retorno de P a $eCmer$ y el proceso BP consiste en ajustar la transacción al nuevo precio de P . El proceso BP es más rápido que el proceso AP porque éste último contiene la evolución del *Parcel S*. Ambos procesos están sincronizados con la transición roja $t \in \bullet B3$.

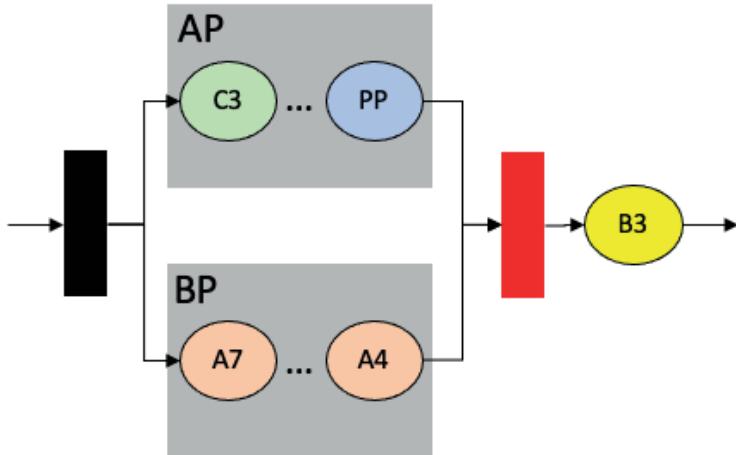


Figura 9. Modelo simplificado del caso de cambio de P por otro de mayor precio. Fuente propia.

Composición entre 1) el inicio del $dpst$ y 2) el cambio de P por otro más caro

La figura 10 muestra la composición entre la figura 3 y figura 8 que es referente a la evolución del marcado en el caso del 1) inicio del $dpst$ y 2) el cambio del P por otro más caro. Se pretende que a partir del marcado en $A2$, se marque $A3$ o $A4$, para lo cual se hacen necesarios los lugares de control $c14$ y $c15$. Cuando inicia el $dpst$ la marca solo puede pasar de $A2$ a $A3$ dado que $c15$ no tiene marca. La marca de $c14$ se quita y se devuelve con el disparo de las transiciones $t \in \bullet A3$ y $t \in A3 \bullet$ respectivamente.

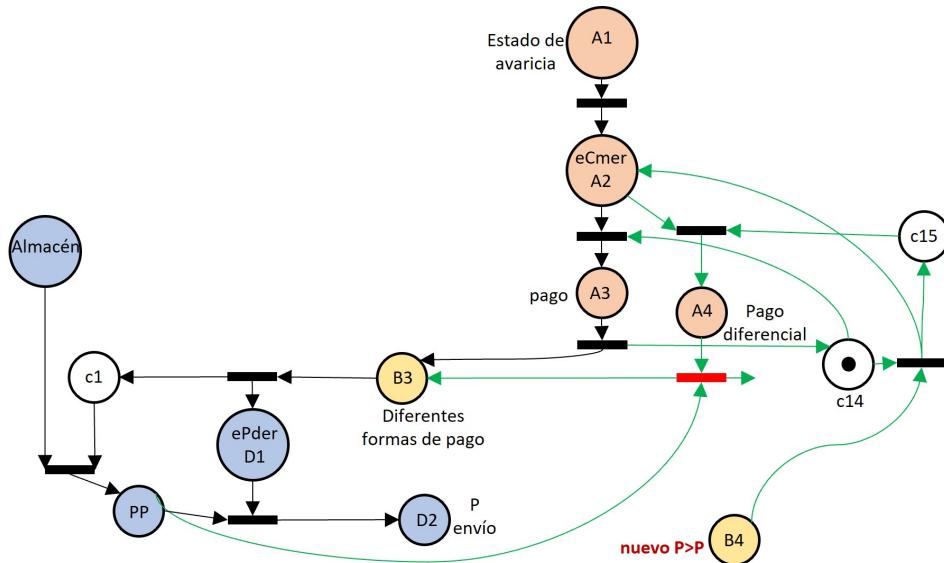


Figura 10. Composición del caso 1) del inicio del $dpst$ y 2) del cambio de P por otro más caro. Fuente propia.

Por otro lado, si se dispara la transición $t \in B4$ significa que existe un requerimiento para un cambio de P por otro más caro y por dicho disparo se retira la marca de $c14$. El disparo de $t \in B4$ coloca una marca en $c15$ y $A2$. La marca en $c15$ obliga a que el $eCmer$ reconozca que debe hacer un pago de la diferencia de precio, según se interpreta con la marca en el lugar $A4$. El disparo de la transición roja se dará solo si el $ePder$ ha recibido el P ; después de eso, se restaura la marca en el lugar $c14$ y se hace el pago, según se interpreta por el marcado en el lugar $B3$. La tabla 8 describe de manera formal la evolución del marcado.

Tabla 8. Evolución del marcado en la composición del caso de cambio de P por otro de más caro y el inicio del $dpst$.

lugar	Descripción
$A1$ $c14$	$A1$ y $c14$ inicialmente están marcados
$A2$	$A2$ consigue una marca después de que $t \in A1\bullet$ es disparada
$A3$	Solo $t \in (A2\bullet \wedge A3)$ esta habilitada $A3$ consigue una marca después de que $t \in (A2\bullet \wedge c14\bullet)$ es disparada
$c14$	El marcado de este lugar ayuda al flujo del proceso -Aquí, $c14$ recupera la marca después de que $t \in A3\bullet$ es disparada Después de iniciado el $dpst$ es posible que el $eCmer$ le guste un nuevo P el cual tiene un precio más elevado $new P > means Price(newP) > Price(P)$ El lugar PP tiene una marca y esto significa que el P fue retornado por el $eCmer$
$B4$	La marca en este lugar indica que el $eCmer$ cambia el P por otro, el cual es más caro
	- $t \in (c14\bullet \wedge B4\bullet)$ es habilitada
$c15$	Lugar de control que habilita la transición hacia el estado donde se paga la diferencia de precio $A4$ Este lugar es necesario porque solo cuando $t \in (c14\bullet \wedge B4\bullet)$ es disparada, $A4$ conseguirá una marca
	$c15$ y $A2$ consigue una marca después de que $t \in (c14\bullet \wedge B4\bullet) \equiv t \in (c15\bullet \wedge A2)$ es disparada
$A4$	$A4$ consigue una marca después de que $t \in (c15\bullet \wedge A2)$ es disparada <i>eCmer está listo para entregar la diferencia en el precio</i>
	$c14$ recupera la marca después de que $t \in (A4\bullet \wedge P\bullet)$ es disparada
$B3$	$B3$ consigue una marca después de que $t \in A3\bullet$ or $t \in A4\bullet$ es disparada Solo una transición es habilitada para dispararse
...	...

Fuente propia.

Composición de casos 1) el inicio del *dpst*, 2) el cambio de *P* por otro más caro y 3) el *P* es aprobado

La figura 11 es la RP que resulta de la combinación de las RP de la figura 3, 4, 8 y 10. La composición no implica mayor problema, una vez superado el escenario del control de marcado visto en la figura 10.

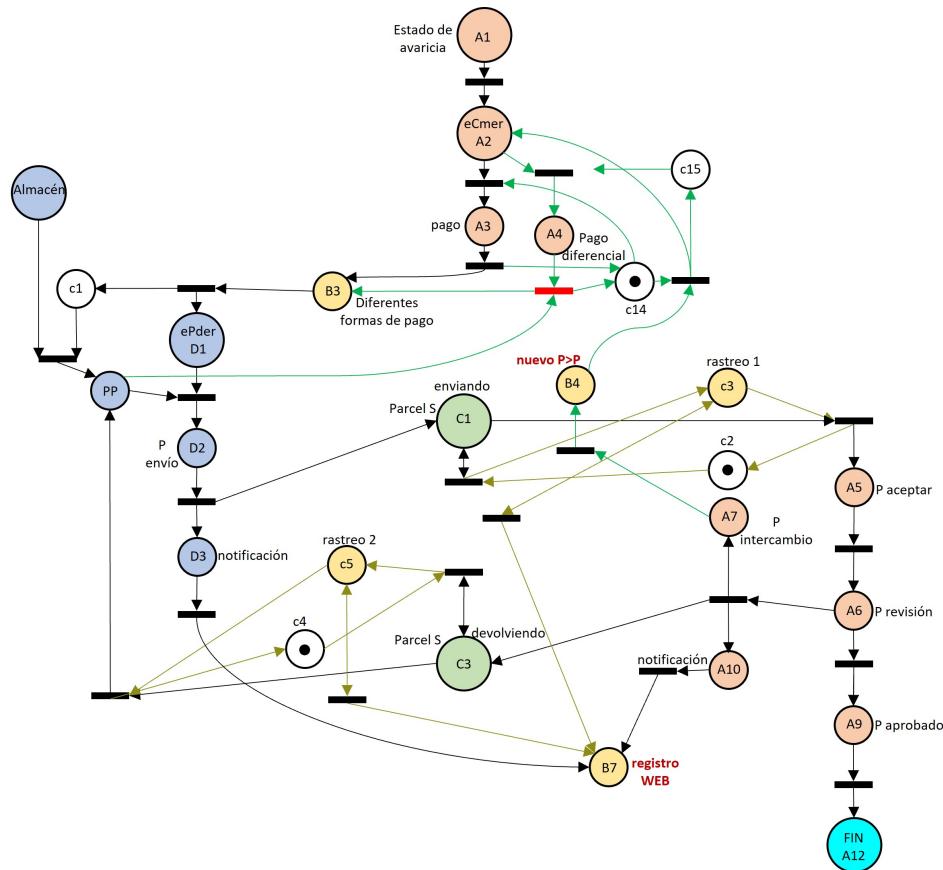


Figura 11. RP que resulta de la combinación de las figuras 3, 4, 8 y 10. Fuente propia.

Composición de casos 1) el inicio del *dpst*, 2) el cambio de *P* por otro más caro, 3) el *P* es aprobado y 4) el precio del nuevo *P* es menor

En el flujo inicial de *dpst*, el lugar *c11* y *D2* obtienen una marca después de que se disparó $t \in (D1 \wedge APP)$ como se visualiza en la figura 12. La red está bloqueada porque no hay transiciones habilitadas. Para resolver eso, *c11* necesita perder la marca y *c12* necesita obtener una marca. Entonces es necesaria una transición $t \in (c11 \wedge c12)$ como se muestra en la figura 13 con color rojo. Es necesario un arco de *c13* a $t \in (c11 \wedge c12)$ porque *c13* no puede tener más de una marca.

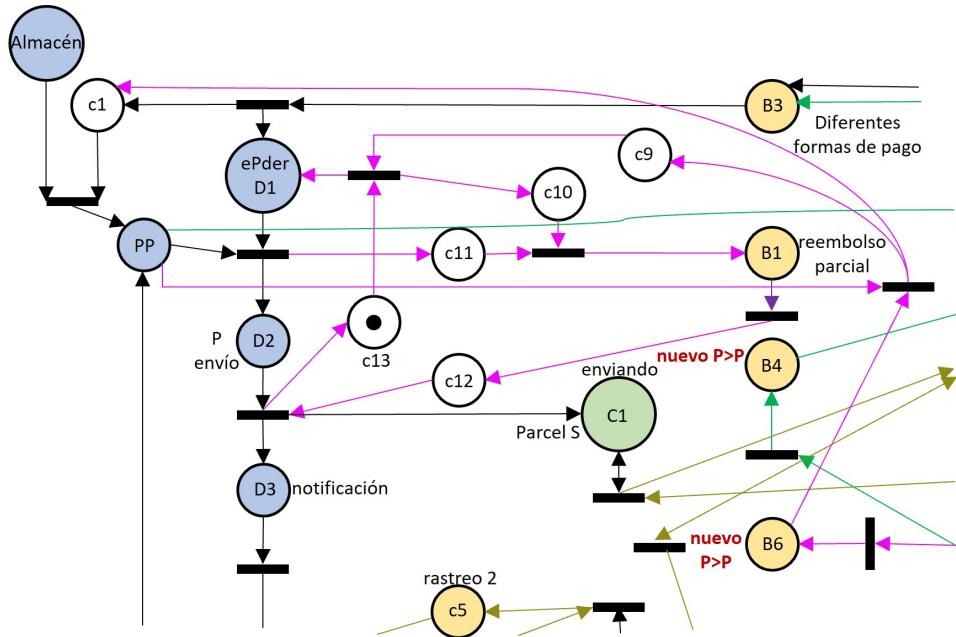


Figura 12. RP que resulta de la combinación de las figuras 3, 4, 7, 8 y 10. Fuente propia.

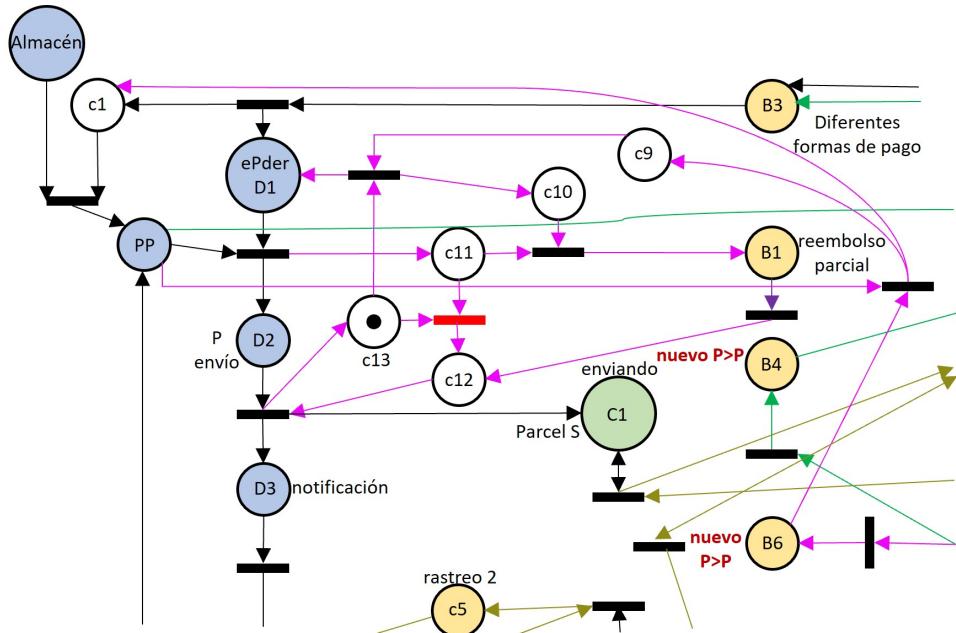


Figure 13. RP ajustada en la combinación de las figuras 3, 4, 7, 8 y 10. Fuente propia.

Composición de casos 1) el inicio del *dpst*, 2) el cambio de *P* por otro más caro, 3) el *P* es aprobado, 4) el precio del nuevo *P* es menor y 5) el precio del nuevo *P* es igual

Cada composición nueva es realizada sobre la base de la composición anterior por lo que resulta que en este caso no es necesario agregar algún lugar y/o transición para que la evolución del marcado sea acorde al *dpst* establecido como se muestra en la figura 14.

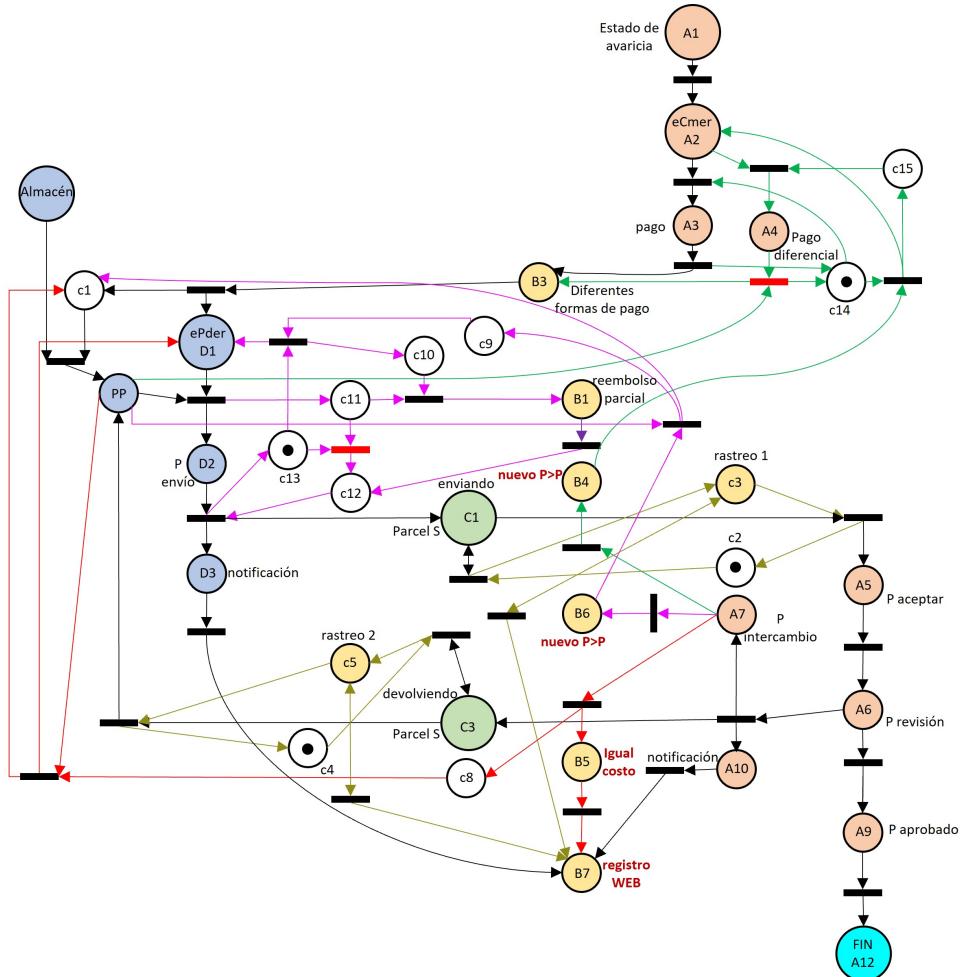


Figura 14. RP resultante de la combinación de las figuras 3, 4, 6, 7, 8 y 10. Fuente propia.

Composición de casos 1) el inicio del *dpst*, 2) el cambio de *P* por otro más caro, 3) el *P* es aprobado, 4) el precio del nuevo *P* es menor, 5) el precio del nuevo *P* es igual y 6) *P* rechazado

Finalmente, la figura 15 muestra la RP que resulta cuando se han integrado todos los casos expuestos y que, como se dijo anteriormente, se basó sobre la composición

anterior. En esta RP completa es necesario agregar lugares (c6, c7) y/o transiciones para que la evolución del marcado corresponda a la dinámica del *dpst*.

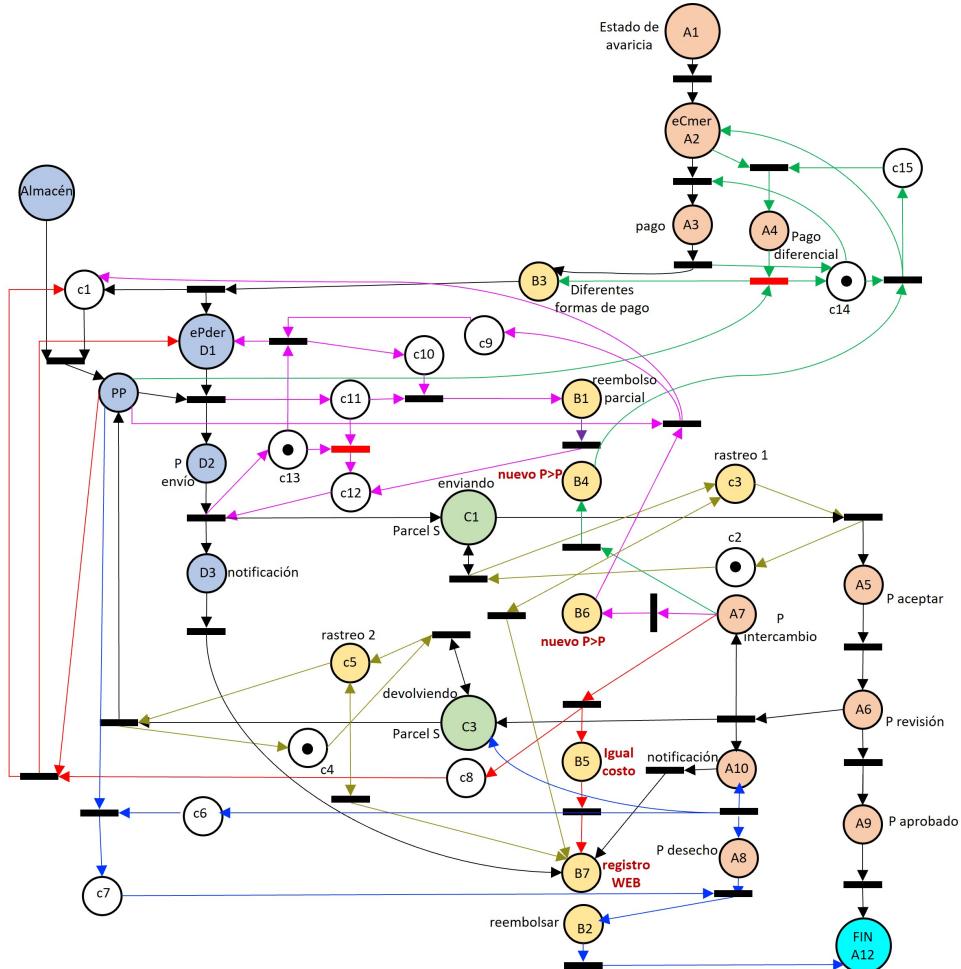


Figura 15. RP resultante de la combinación de las figuras 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 10. Fuente propia.

Cabe recordar que el *Parcel S* (C3) se utiliza cuando el *P* fue cambiado o cuando el *P* es rechazado. El lugar *PP* representa el estado en el que *ePder* tiene el *P*. El lugar *PP* podría tener una marca según los casos: 1) el *P* se obtuvo del almacén (store) y se enviará, 2) el *P* se obtuvo del envío de regreso que hizo el *eCmer*. Los lugares *c2*, *c4*, *c13* y *c14* están marcados desde antes del inicio del *dpst*.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La RPI modelada con lugares y transiciones etiquetadas se puede ver en la figura 16, esta es igual en su estructura a la de la figura 15. Las etiquetas asignadas son progresivas,

pero no siguen un orden y/o criterio de asignación ya que no es necesario para fines de análisis matricial si se obtuviera su tabla de estados. Como se puede apreciar, existen muchos lugares y transiciones, sin embargo, hacen una representación detallada del *dpst*. El detalle puede incrementarse y la complejidad de la RP se incrementaría en consecuencia, aunque no se precisa en qué orden ya que, si bien se pueden agregar lugares y transiciones, se debe cuidar que no se pierda la correcta evolución del marcado en el modelo previo. Se hace notar que los lugares tienen, a lo sumo, una marca con la excepción de los lugares *P16*, *P22* y *P31*. El *P16* y *P22* son lugares que solo reciben marcas. El lugar *almacén o store* (*P31*), por simplicidad, se considera que tiene un número de marcas indeterminado e inagotable.

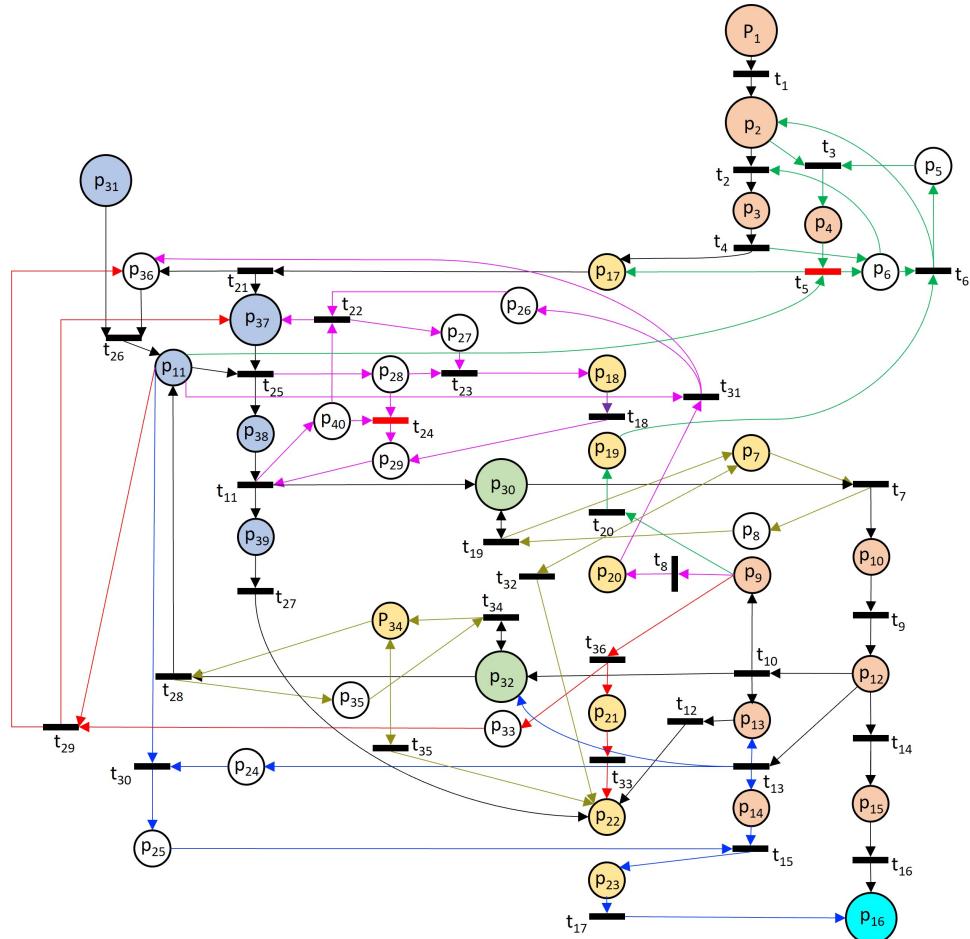


Figura 16. RP que modela el *dpst*. Fuente propia.

Por otro lado, la integración de módulos para obtener el modelo resultante no es inmediato ya que, en dicho modelo, aparecen lugares y/o transiciones que no existen en los módulos como se muestra en la figura 17.

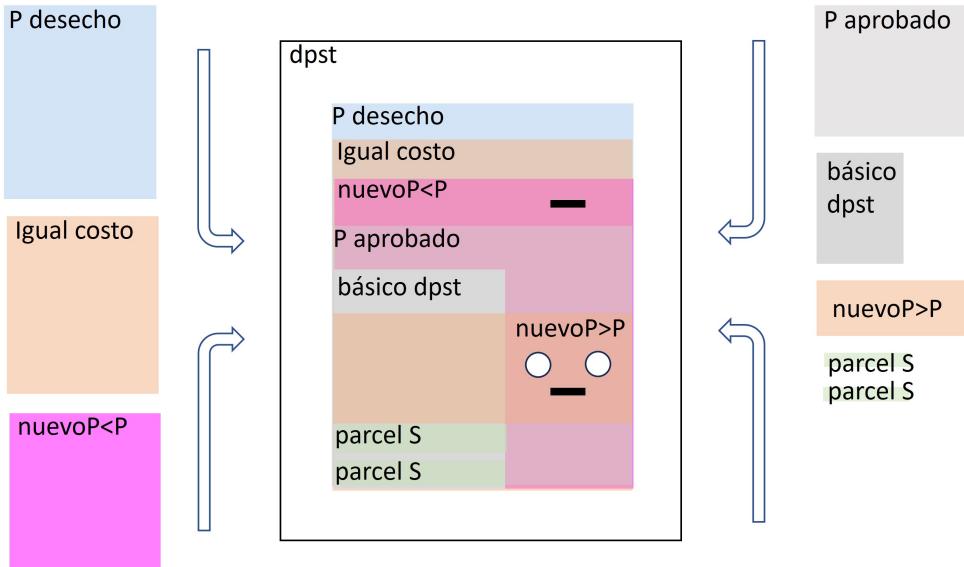


Figura 17. Composición de módulos. Fuente propia.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó el *dpst* en el *CE*. Como un primer acercamiento al modelo formal, se presentó la descripción del *dpst* con mapas conceptuales los cuales se ven limitados para profundizar un estudio, analizarlo y/o mejorarlo. Se utilizan las RPI como una herramienta de representación formal debido a que permite obtener un modelo gráfico y un modelo matemático. El alcance de este trabajo queda acotado a la parte gráfica. Como se pudo observar, para obtener al modelo final del *dpst* se desarrollaron casos. Los casos pueden ser vistos como módulos, sin embargo, el acoplamiento, superposición y/o composición de dichos módulos no resulta simple. Lo anterior se debe a que algunos de ellos requirieron adicionar algunos lugares y/o transiciones para asegurar que la evolución del marcado, en la composición, se diera como se da con en los módulos por separado. Algunas inquietudes quedan pendientes y es referente al estudio de los requerimientos que son necesarios para la composición, el desarrollo y modelado de módulos de acuerdo con especificaciones. También queda pendiente el proceso de simplificación de la RP sin perder poder de representación.

REFERENCIAS

- A., A., & D., H. (2002). Failure and safety assessment of systems using Petri nets. Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1919-1924. doi: <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2002.1014821>.
- AlSalem, T., & AlShamari, M. (2023). Assessing Interactive Web-Based Systems Using Behavioral Measurement Techniques. Future Internet, 15(11), 365. doi: <https://doi.org/10.3390/fi15110365>

- Aziz, R. M., Rajul, M., Kartik, G., Aryan, D., Pavan , K., & Akash , S. (2023). "Modified Genetic Algorithm with Deep Learning for Fraud Transactions of Ethereum Smart Contract. *Applied Sciences*, 13(2), 697. doi: <https://doi.org/10.3390/app13020697>
- B., Y., & H., H. (2023). "Robustness Analysis of Automated Manufacturing Systems With Uncontrollable Events Using Petri Nets. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 20(2), 775-788. doi: <https://doi.org/10.1109/TASE.2022.3169810>.
- Bause, F., & Kritzinger, P. (2002). *Stochastic Petri Nets -An Introduction to the Theory* (2 ed.). Vieweg Monographs. Recuperado el 22 de 04 de 2024, de chrome-extension://efaidnbmnnibpcajpcgkclefindmkaj/https://ls4-www.cs.tu-dortmund.de/download/typo3/de/home/bause_kritzinger_spn_book_screen.pdf
- Benarbia, T., Kyamakya, K., Al Machot, F., & Kambale, W. V. (2023). Modeling and Simulation of Shared Electric Automated and Connected Mobility Systems with Autonomous Repositioning: Performance Evaluation and Deployment. *Sustainability*, 15(1). doi: <https://doi.org/10.3390/su15010881>
- Bernemann, R., Cabrera, B., Heckel, R., & König, B. (2020). Uncertainty Reasoning for Probabilistic Petri Nets via Bayesian Networks. *Computer Science > Artificial Intelligence*. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.14817>
- Boca, L. L., Ciortea, E. M., Boghean, C., Begov-Ungu, A., Boghean, F., & Dădărlat, V. T. (2023). An IoT System Proposed for Higher Education: Approaches and Challenges in Economics, Computational Linguistics, and Engineering. *Sensors*, 23(14). doi: <https://doi.org/10.3390/s23146272>
- Capek, J., & Bata, R. (2007). Workflow Modelling within Selected Departments of the Public Administration focused on the regional office. *Revista de Gestão da Tecnologia e Sistemas de Informação*, 4(2), 113-126.
- Čapkovič, F. (2023). Dealing with Deadlocks in Industrial Multi Agent Systems. *Future Internet*, 15(3). doi: <https://doi.org/10.3390/fi15030107>
- Castellanos Contreras, J. U., & Rodríguez Urreg, L. (s.f.). Technological Developments in Control Models Using Petri Nets for Smart Grids: A Review. *Energies*, 16(8). doi: <https://doi.org/10.3390/en16083541>
- Chandler, B. A., & Davidrajuh, R. (2024). "Modeling and Analyzing the Strategy Game "Factorio" Using Modular Petri Nets and the General-Purpose Petri Net Simulator. *Electronics*, 13(7). doi: <https://doi.org/10.3390/electronics13071377>
- Corabi, G. (1999). Consecuencias tributarias del comercio electrónico. Recuperado el 18 de 04 de 2024, de Repositorio.uca.edu.ar.
- de Andrade Melan, A. H., de Carvalho Michalski, M. A., Murad, C., Caminada Netto, A., & Martha de Sousa, G. F. (2022). Generalized Stochastic Petri Nets for Planning and Optimizing Maintenance Logistics of Small Hydroelectric Power Plants. *Energies*, 15(8). doi: <https://doi.org/10.3390/en15082742>
- Domański, R., Wojciechowski, H., Lewandowicz, J., & Hadaś, Ł. (2023). Digitalization of Management Processes in Small and Medium-Sized Enterprises—An Overview of Low-Code and No-Code Platforms. *Applied Sciences*, 13(24). doi: <https://doi.org/10.3390/app132413078>
- Dongsheng, L., Jianmin, W., Stephen C.F., C., Jiaguang, S., & Li , Z. (2002). Modeling workflow processes with colored Petri nets. *Computers in Industry*, 49(3), 267-281. doi: [https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(02\)00099-4](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(02)00099-4).
- Fang, Y., Yu, J., Ding, Y., & Lin, X. (2023). Inferring Complementary and Substitutable Products Based on Knowledge Graph Reasoning. *Mathematics*, 11(22). doi: <https://doi.org/10.3390/math11224709>
- Fedorova, A., Beliautsou, V., & Zimmermann, A. (2022). Colored Petri Net Modelling and Evaluation of Drone Inspection Methods for Distribution Networks. *Sensors*, 22(9). doi: <https://doi.org/10.3390/s22093418>

Feng, T., Chen, T., & Gong, X. (2024). Formal Security Analysis of ISA100.11a Standard Protocol Based on Colored Petri Net Tool. *Information*, 15(2). doi: <https://doi.org/10.3390/info15020118>

Genés-Durán, R., Hernández-Serrano, J., Esparza, O., Bellés-Muñoz, M., & Muñoz-Tapia, J. L. (2021). Data Exchange with Free Sample Protocol. *Electronics*, 10(12). doi: <https://doi.org/10.3390/electronics10121455>

Gonçalves, E. M., Machado, R. A., Rodrigues, B. C., & Adamatti, D. (2022). CPN4M: Testing Multi-Agent Systems under Organizational Model M. *Applied Sciences*, 12(12). doi: <https://doi.org/10.3390/app12125857>

Grobelna, I., & Szcześniak, P. (2022). Interpreted Petri Nets Applied to Autonomous Components within Electric Power Systems. *Applied Sciences*, 12(9). doi: <https://doi.org/10.3390/app12094772>

Grupo del Banco Mundial y Organización Mundial del Comercio. (2018). Obtenido de Comercio y reducción de la pobreza: nuevas pruebas del impacto en los países en desarrollo. Organización Mundial del Comercio: https://www.wto.org/spanish/res_s/booksp_s/wto_wbjointpublication_s.pdf

H., Z., C., L., & Z., C. (2011). Petri Nets Based Modeling and Analysis of UPnP Security Ceremonies. 2011 Third Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System (PACCS), 1-4. doi:<https://doi.org/10.1109/PACCS.2011.5990235>.

Huacan , S., Xuhong, L., & Dawei , C. (2008). Application of Petri Net for Shortest Routes Selection in Multimodal Networks. Eighth International Conference of Chinese Logistics and Transportation Professionals (ICCLTP). doi: [https://doi.org/10.1061/40996\(330\)427](https://doi.org/10.1061/40996(330)427)

Huang, M., Cheng, D., Zhou, J., & Lu, Z. (2023). Reliability Evaluation Based on the Colored Petri Net Converted from AADL Models for the Wheel Brake System of Aircraft. *Aerospace*, 10(9). doi:<https://doi.org/10.3390/aerospace10090739>

Idel Mahjoub, Y., Chakir El-Alaoui, E., & Nait-Sidi-Moh, A. (2017). Modeling a bus network for passengers transportation management using colored Petri nets and (max, +) algebra. *Procedia Computer Science*, 576-583. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.344>

Kabashkin, I. (2023). Model of Multi Criteria Decision-Making for Selection of Transportation Alternatives on the Base of Transport Needs Hierarchy Framework and Application of Petri Net. *Sustainability*, 15(16). doi: <https://doi.org/10.3390/su151612444>

Kan, Z., Liang, Y., Zha, T., & Wang, X. (2023). Risk Assessment Model of Chemical Process Based on Interval Type-2 Fuzzy Petri Nets. *Processes*, 11(5). doi: <https://doi.org/10.3390/pr11051304>

Khan, M., Shams-E-Mofiz, M., & Sharmin, Z. (2020). Development of E-Commerce-Based Online Web Application for COVID-19 Pandemic. *iBusiness*, 12, 113-126. doi: <https://doi.org/10.4236/ib.2020.124008>.

Lefebvre, D., Thomas, P., Leclercq, E., & Druaux, F. (2005). FLOW CONTROL FOR CONTINUOUS PETRI NET MODELS OF HDS: STABILITY ISSUES. *IFAC Proceedings Volumes*, 38(1), 217-222. doi: <https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.00321>

Lelana, J., & Soepangkat, B. O. (2012). TIME PETRI NET METHOD APPLICATION TO MINIMIZE INVESTMENT COST OF BATCH PROCESS BASED PLANT DEVELOPMENT. *Journal Teknobisnis*, 7(1). doi: <https://doi.org/10.12962/j24609463.v7i1.2425>

Lenz, K., Mevius, M., & Oberweis, A. (2005). Process-oriented business performance management with Petri nets. *Proceedings. The 2005 IEEE International Conference on e-Technology, e-Commerce and e-Service*. doi: <https://doi.org/10.1109/EEE.2005.107>

Letia, T. S., Durla-Pasca, E. M., Al-Janabi, D., & Cuibus, O. P. (2022). Development of Evolutionary Systems Based on Quantum Petri Nets. *Mathematics*, 10(23). doi: <https://doi.org/10.3390/math10234404>

- Liu, Y., & Yan , W. (2023). Consumer Satisfaction with the Online Dispute Resolution on a Second-Hand Goods-Trading Platform. *Sustainability*, 15(4). doi: <https://doi.org/10.3390/su15043182>
- Lu, K., Fang, X., & Fang, N. (2022). PN-BBN: A Petri Net-Based Bayesian Network for Anomalous Behavior Detection. *Mathematics*, 10(20). doi: <https://doi.org/10.3390/math10203790>
- Manningham, D., Asseli, H., & Bourguignon, B. (2024). Be Direct! Restaurant Social Media Posts to Drive Customer Engagement in Times of Crisis and Beyond. *Tourism and Hospitality*, 5(2), 304-313. doi:<https://doi.org/10.3390/tourhosp5020020>
- Medina-Garcia, S., Medina-Marin, J., Montaño-Arango, O., Gonzalez-Hernande, M., & Hernandez-Gress, E. S. (2023). A Petri Net Approach for Business Process Modeling and Simulation. *Applied Sciences*, 13(20). doi: <https://doi.org/10.3390/app132011192>
- Mugarza, I., & Mugarza, J. C. (2021). A Coloured Petri Net- and D* Lite-Based Traffic Controller for Automated Guided Vehicles. A Coloured Petri Net- and D* Lite-Based Traffic Controller for Automated Guided Vehicles, 10(18). doi: <https://doi.org/10.3390/electronics10182235>
- Murata, T. (1989). Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4), 541-580. doi: <http://doi.org/10.1109/5.24143>
- Nosratabadi, S., Mosavi, A., Shamshirband, S., Kazimieras Zavadskas, E., Rakotonirainy, A., & Chau, K. W. (2019). Sustainable Business Models: A Review. *Sustainability*, 11(6). doi: <https://doi.org/10.3390/su11061663>
- Odrey, N. G. (2008). Error Recovery in Production Systems: A Petri Net Based Intelligent System Approach. doi: <https://doi.org/10.5772/5323>
- Pan, Y.-L., Tseng, C.-Y., & Chen, J.-C. (2023). Enhancement of Computational Efficiency for Deadlock Recovery of Flexible Manufacturing Systems Using Improved Generating and Comparing Aiding Matrix Algorithms. *Processes*, 11(10). doi: <https://doi.org/10.3390/pr11103026>
- Petrosov, D. A., Lomazov, V. A., & Petrosova, N. V. (2021). Model of an Artificial Neural Network for Solving the Problem of Controlling a Genetic Algorithm Using the Mathematical Apparatus of the Theory of Petri Nets. *Applied Sciences*, 11(9). doi: <https://doi.org/10.3390/app11093899>
- Ramírez, C. W. (2008). E-Cómerce & E-Business. *Revista de la Facultad de Derecho y Ciencia Política de la Universidad Alas Peruanas*, 6(5). doi:S/N
- Rybarczyk, A., Formanowicz, D., Radom, M., & Formanowicz, P. (2023). Cholesterol Metabolism Pathways Disturbances in Atherosclerosis—Analyses Using Stochastic Petri Net-Based Model. *Applied Sciences*, 13(10). doi: <https://doi.org/10.3390/app13106149>
- Sakalauskas, V., & Kriksciuniene, D. (2024). Personalized Advertising in E-Commerce: Using Clickstream Data to Target High-Value Customers. *Algorithms*, 17(1), 27. doi: <https://doi.org/10.3390/a17010027>
- Song, J., & Hao, W. (2012). Performance analysis for web service composition based on Queueing Petri Ne. *IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering*, 501-504. doi: <https://doi.org/10.1109/ICSESS.2012.6269514>.
- Strzeciwilk, D. (2023). Timed Petri Nets for Modeling and Performance Evaluation of a Priority Queueing System. *Energies*, 16(23). doi: <https://doi.org/10.3390/en16237690>
- Tkáčik, M., Jadlovský, J., Jadlovská, S., Jadlovská, A., & Tkáčik, T. (2024). Modeling and Analysis of Distributed Control Systems: Proposal of a Methodology. *Processes*, 12(1). doi: <https://doi.org/10.3390/pr12010005>
- Torres, D., Soto, I., Ontiveros, B., & Carrasco, A. R. (2008). Modelling digital signature for Electronic Commerce using automata cellular model. 2nd. International Conference on Wireless, Mobile and Multimedia Networks. doi: <https://doi.org/10.1049/cp:20081034>

Travassos Rosário, A., & Carmo Dias, J. (2023). Marketing Strategies on Social Media Platforms. *International Journal of E-Business Research*, 19(1), 1-25. doi: <https://doi.org/10.4018/IJEBR.316969>

Velingkar, H. S., Kulkarni, R., & Patavardhan, P. (2024). Neuroscience Empowering Society: BCI Insights and Application. *Engineering Proceedings*, 62(1). doi: <https://doi.org/10.3390/engproc2024062015>

Xiang, D., Zhao, F., & Liu, Y. (2021). DICER 2.0: A New Model Checker for Data-Flow Errors of Concurrent Software Systems. *Mathematics*, 9(9). doi: <https://doi.org/10.3390/math9090966>

Yu, W., Yan, C., Ding, Z., Jiang, C., & Zhou, M. (2014). Modeling and Validating E-Commerce Business Process Based on Petri Nets. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Systems*, 44(3), 327-341. doi: <https://doi.org/10.1109/TSMC.2013.2248358>

Zhang, R., Feng, Y., Yang, Y., & Li, X. (2023). Task Offloading with Data-Dependent Constraints in Satellite Edge Computing Networks: A Multi-Objective Approach. *Aerospac*, 10(9). doi: <https://doi.org/10.3390/aerospace10090804>

CONCLUSIONES

Las redes de Petri (RP) han evolucionado significativamente desde su introducción en los años 60, y se utilizan actualmente para modelar sistemas complejos que implican procesos y control. Estas son una herramienta matemática y gráfica utilizada para modelar, analizar y simular sistemas que exhiben comportamientos concurrentes y asincrónicos. Por otro lado, las Redes de Petri Interpretadas (RPI) son una extensión de las RP que incluyen señales de entrada y salida, asociadas con las transiciones y los lugares, respectivamente. Las RPI son especialmente útiles para modelar sistemas donde es necesario controlar y observar el comportamiento a través de eventos externos, como actuadores y sensores. Esto permite una mayor flexibilidad y precisión en el modelado de sistemas complejos, incluyendo aquellos que requieren interacción con el entorno.

Las RP tienen diversas aplicaciones y en particular, en este libro se examinan tres aplicaciones clave de las redes de Petri: el diagnóstico de fallas, la detección de especificaciones y el comercio electrónico. Algunos puntos importantes se señalan a continuación.

1. Diagnóstico de Faltas

- Las RPI son herramientas efectivas para identificar y diagnosticar faltas en sistemas complejos debido a su capacidad de modelar comportamientos concurrentes y asincrónicos.
- Permiten simular y analizar situaciones críticas, ayudando a predecir y mitigar problemas potenciales antes de que ocurran en el sistema real.
- La capacidad de las RPI para representar condiciones específicas y transiciones facilita la detección de errores y la implementación de estrategias de mitigación antes de que ocurran faltas críticas en el sistema real.

2. Detección de Especificaciones

- Las RPI son útiles para la detección de especificaciones incorrectas o incompletas en sistemas de eventos discretos.
- Proveen un método estructurado para verificar la conformidad de las especificaciones con los comportamientos esperados del sistema, asegurando que los requerimientos del sistema se cumplan adecuadamente.

3. Comercio Electrónico

- Las RP se pueden aplicar al modelado de transacciones en comercio electrónico, representando de manera precisa las interacciones y flujos de trabajo en plataformas de e-commerce.
- Facilitan el análisis de rendimiento y la optimización de procesos, mejorando la eficiencia y la experiencia del usuario en sistemas de comercio electrónico.

En general, las RP y su variante RPI ofrecen un marco robusto y flexible para el modelado, análisis y mejora de sistemas complejos en diversas aplicaciones, desde el diagnóstico de faltas hasta la optimización de transacciones en comercio electrónico.

CONCLUSIONS

Petri nets (PNs) have evolved significantly since their introduction in the 1960s and are currently used to model complex systems involving processes and control. They are a mathematical and graphical tool used to model, analyze, and simulate systems that exhibit concurrent and asynchronous behaviors. On the other hand, Interpreted Petri Nets (IPNs) are an extension of PNs that include input and output signals associated with transitions and places, respectively. IPNs are especially useful for modeling systems where it is necessary to control and observe behavior through external events, such as actuators and sensors. This allows for greater flexibility and accuracy in modeling complex systems, including those that require interaction with the environment.

PNs have diverse applications, and in particular, this book examines three key applications of Petri nets: fault diagnosis, specification detection, and e-commerce. Some important points are highlighted below.

1. Fault Diagnosis

- o IPNs are effective tools for identifying and diagnosing faults in complex systems due to their ability to model concurrent and asynchronous behaviors.
- o They allow for the simulation and analysis of critical situations, helping to predict and mitigate potential problems before they occur in the real system.
- o The ability of IPNs to represent specific conditions and transitions facilitates error detection and the implementation of mitigation strategies before critical faults occur in the real system.

2. Specification Detection

- o IPNs are useful for detecting incorrect or incomplete specifications in discrete event systems.
- o They provide a structured method to verify the compliance of specifications with the expected behaviors of the system, ensuring that system requirements are adequately met.

3. E-Commerce

- o PNs can be applied to modeling transactions in e-commerce, accurately representing interactions and workflows on e-commerce platforms.
- o They facilitate performance analysis and process optimization, improving efficiency and user experience in e-commerce systems.

Overall, PNs and their IPN variant offer a robust and flexible framework for modeling, analyzing, and improving complex systems in various applications, from fault diagnosis to transaction optimization in e-commerce.

REFERENCIAS

- Ávila Vázquez, A. (2019). Gestión del control interno a través de las Redes de Petri. *Trabajo de diploma presentada en opción al título de Ingeniero Industrial, Facultad Ciencias Empresariales y Administración Dpto. Ingeniería Industrial, Universidad de Holguín*.
- Batista Rodríguez. (2017). Evaluación del Control Interno a través de redes de Petri en instalaciones hospitalarias. *Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Industrial, Universidad de Holguín, Cuba*.
- Cabac, L., Haustermann, M., & Mosteller, D. (2018). Software development with Petri nets and agents: Approach, frameworks and tool set. *Science of Computer Programming*, 157, 56-70. <https://doi.org/10.1016/j.scico.2017.12.003>
- David, R., & Alla, H. (2005). *Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets*. Springer-Verlag.
- Guevara-Ortega, L. M., & Rodríguez-Urrego, L. (2017). Modelado de compras verdes mediante redes de Petri coloreadas. *Dyna*, 84(203), 177-183. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n203.65460>
- Hernández Pérez, G. D., Mantulak, M. J., & Abreu Ledón, R. (2019). Aplicación de redes de flujo de trabajo para determinar activos tecnológicos estratégicos en pequeñas empresas manufactureras. XVIII Congreso Latinolberoamericano de gestión tecnológica, Medellín, Colombia. <https://www.altecasociacion.org/memorias-provisionales>.
- Latorre-Biel, J. I., Jimenez, E., Martínez-Cámara, E., & Pérez de la Parte, M. M. (2022). Redes de Petri aplicadas a la simulación del comportamiento de consumidores en escenarios concurridos. In *XLIII Jornadas de Automática* (pp. 537-543). Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións.
- Mantulak, M. J., Nelli, S. S., & Bresciani, J. C. (2022). Validación de un procedimiento para determinar competencias tecnológicas distintivas—Aplicación de redes de Petri. *360: Revista de Ciencias de la Gestión*, (7). <https://doi.org/10.18800/360gestion.202207.010>
- Michalus, J. C., Sáez Mosquera, I., Hernández Pérez, G., & Sarache Castro, W. A. (2015). Comprobación de la factibilidad de ejecución de un procedimiento organizativo mediante redes de workflow. *Visión de futuro*, 19(2), 0-0.
- Morales Varela, A., Rojas Ramírez, J. A., Hernández Gómez, L. H., Morales González, Á., & Jiménez Reyes, M. Y. (2015). Modelo de un sistema de producción esbelto con redes de Petri para apoyar la toma de decisiones. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 23(2), 182-195. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052015000200004>
- Murata, T. (1989). Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. *Proceedings of the IEEE*, 77(4), pp. 541-580.
- Murillo-Soto, L. D. (2018). Diseño e implementación del sistema de diagnóstico de fallos usando redes de petri interpretadas y coloreadas. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 3-21. <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v31i1.3493>
- Petri, C. A. (1962). *Kommunikation mit Automaten*. Universidad de Bonn.
- Peterson, J. L. (1981). *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*. Prentice Hall.
- Ramchandani, C. (1974). Analysis of Asynchronous Concurrent Systems by Timed Petri Nets. MIT Press.
- Sreenivas, R. S., & Krogh, B. H. (1991). Application of Petri Nets to Modeling and Analysis of Communication Protocols. *IEEE Transactions on Communications*, 39(7), pp.1058-1067
- Vega-de la Cruz, L. O., Lao-León, Y. O., Marrero-Delgado, F., & Pérez-Pravia, M. C. (2020). Redes de Petri: una herramienta para la validación de procedimientos. *Ciencias Holguín*, 26(2), 1-16.
- Zurawski, R., & Zhou, M. (1994). Petri Nets and Industrial Applications: A Tutorial. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 41(6), pp. 567-583.

SOBRE LA COORDINADORA

KAREN HERNÁNDEZ RUEDA - Investigadora de la Universidad de Guadalajara en México. Doctora en Tecnologías de Información en el área de Modelado y Simulación de Sistemas. Maestra en Ingeniería Eléctrica en el área de Telecomunicaciones. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores y del Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP). Miembro del Comité Editorial en la revista Transdigital, en la Revista Iberoamericana de las Ciencias Computacionales e Informáticas (RECI) y en American Journal of Education and Information Technology. Miembro de la Red de Investigaciones sobre Educación en Latinoamérica (RIEL), de la red de investigación de Sistemas de Eventos Discretos e Híbridos (SEDH) y líder de la Red de Estudios y Desarrollo de las Organizaciones (RESDO). Miembro del Cuerpo Académico en Consolidación “Educación, Tecnologías e Innovación” registrado en la Secretaría de Educación Pública (SEP) de México con las líneas de investigación: Gestión y Desarrollo de las Tecnologías, y Educación, Accesibilidad y Responsabilidad Social. Con experiencia en proyectos institucionales para obtención de recursos federales, en procesos de evaluación de programas educativos y en la formación de recursos humanos de diversas áreas. Autora de publicaciones tanto en revistas como capítulos de libros en temas de Tecnologías de la Información, Redes de Datos, Diagnóstico de faltas, entre otros. Autora y coordinadora de libros académicos y de investigación. Revisora de artículos para eventos de investigación nacionales e internacionales. Algunas áreas de interés: Tecnología Educativa, Diagnóstico de Faltas e Inteligencia Artificial.

ABOUT THE COORDINATOR

KAREN HERNÁNDEZ RUEDA -Researcher at the University of Guadalajara, Mexico. PhD in Information Technologies specializing in System Modeling and Simulation. Master's degree in Electrical Engineering with a focus on Telecommunications. Member of the National System of Researchers and the Program for Professional Development of Teachers (PRODEP). Serves on the Editorial Board of Transdigital, the Ibero-American Journal of Computational and Informatic Sciences (RECI), and the American Journal of Education and Information Technology. Member of the Latin American Education Research Network (RIEL), the research network for Discrete and Hybrid Event Systems (SEDH), and leader of the Network for Studies and Development of Organizations (RESDO). She is a member of the Academic Body in Consolidation “Education, Technologies, and Innovation,” registered with the Mexican Ministry of Public Education (SEP), focusing on research areas such as Technology Management and Development, as well as Education, Accessibility, and Social Responsibility. Her experience includes managing institutional projects to secure federal funding, evaluating educational programs, and training human resources across various fields. Author of publications in journals and book chapters on topics like Information Technologies, Data Networks, and Fault Diagnosis, among others. She has also authored and coordinated academic and research books. Reviewer of articles in national and international research conferences. Research interests include Educational Technology, Fault Diagnosis, and Artificial Intelligence.

APLICACIONES DE LAS REDES DE PETRI: DIAGNÓSTICO DE FALTAS, DETECCIÓN DE ESPECIFICACIONES Y COMERCIO ELECTRÓNICO

Este libro es resultado de una colaboración conjunta entre el cuerpo académico *Educación Tecnologías e Innovación* con clave UDG-CA-931 y *e-World y Gestión del Conocimiento* con clave UDG-CA-649 de la Universidad de Guadalajara, Jalisco, México. Este ofrece una exploración detallada y práctica de las aplicaciones de las Redes de Petri en diversas áreas.

Los capítulos incluyen una introducción a los conceptos básicos de las RP, así como estudios específicos sobre su uso en el diagnóstico de faltas, la detección de especificaciones y el comercio electrónico.

Con una sólida base teórica y estudios de caso prácticos, este libro es una herramienta esencial para investigadores y profesionales interesados en el uso de las RP para mejorar la eficiencia y la fiabilidad de sistemas complejos.

APPLICATIONS OF PETRI NETS: FAULT DIAGNOSIS, SPECIFICATION DETECTION, AND E-COMMERCE

This book is the result of a collaboration between the academic groups *Education, Technologies, and Innovation* with code UDG-CA-931 and *e-World and Knowledge Management* with code UDG-CA-649 from the University of Guadalajara, Jalisco, Mexico. It offers detailed and practical exploration of the applications of Petri Nets in various fields.

The chapters include an introduction to the basic concepts of Petri Nets, as well as specific studies on their use in fault diagnosis, specification detection, and e-commerce.

With a solid theoretical foundation and practical case studies, this book serves as an essential tool for researchers and professionals interested in leveraging Petri Nets to enhance the efficiency and reliability of complex systems.

Aplicaciones de las **redes de Petri**

Diagnóstico de faltas, detección de
especificaciones y comercio electrónico

Applications of **Petri Nets**

Diagnosis, Specification
Detection and E-Commerce

- 🌐 www.atenaeditora.com.br
- ✉ contato@atenaeditora.com.br
- 📷 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
- ⬇ www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Aplicaciones de las **redes de Petri**

Diagnóstico de faltas, detección de
especificaciones y comercio electrónico

Applications of **Petri Nets**

Diagnosis, Specification
Detection and E-Commerce

- 🌐 www.atenaeditora.com.br
- ✉ contato@atenaeditora.com.br
- 📷 [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
- ⬇ www.facebook.com/atenaeditora.com.br