



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS  
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

UNIDAD ZACATENCO  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
SECCIÓN DE MECATRÓNICA

**“Control supervisor de celdas de manufactura flexible  
mediante redes de Petri”**

Tesis que presenta:  
**Iván González Lara**

Para obtener el grado de:  
**Maestro en Ciencias**

En la especialidad de:  
**Ingeniería Eléctrica**

Director de la Tesis:  
**Dr. Eduardo Aranda Bricaire**



# Agradecimientos

**A Dios:** *Por nunca dejarme solo, por prestarme vida, salud y entendimiento, por siempre ayudarme cuando más lo necesito y por brindarme la posibilidad de terminar este ciclo.*

**A mis padres:** *Por heredarme el tesoro mas valioso que puede darse a un hijo: Amor. Por sacrificar gran parte de su vida en formarme y educarme, para llevar acabo la ilusión de su vida, convertirme en una persona de provecho. A ustedes les dedico este logro, espero que se sientan orgullosos y parte indispensable de este, gracias por todo lo que han hecho por mí.*

**A mis hermanos:** *Por su apoyo y animos, espero que esto represente para ustedes un ejemplo de que con esfuerzo y dedicación todo se puede lograr.*

**Al Dr. Eduardo Aranda:** *Por sus consejos, su apoyo y sus críticas constructivas para lograr la culminación de este trabajo. Por darme la oportunidad de trabajar en su laboratorio y confiar en mí durante el desarrollo de este proyecto de tesis.*

**A los miembros del jurado:** *Por sus comentarios y las aportaciones que hicieron a este trabajo de tesis.*

**A mis amigos y compañeros del CINVESTAV:** *Por compartir buenos momentos conmigo, darme ánimos en momentos difíciles, aconsejarme y confiar en mí.*

**A los doctores de la Sección de Mecatrónica:** *Por su enseñanza, sus consejos y por compartir sus conocimientos y experiencias conmigo. Por confiar en mí y darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría en la Sección de Mecatrónica del Departamento de Ingeniería Eléctrica del CINVESTAV.*

**Al CONACYT:** *Por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de Maestría.*



# Resumen

Este trabajo presenta la aplicación de la teoría de redes de Petri, y su respectivo control supervisor, a un prototipo de celda de manufactura flexible. Primeramente, se muestra una pequeña descripción de los módulos que componen a la celda de manufactura, los cuales son: centro neumático, centro de maquinados, robot de 3 GDL y centro de prensado. Posteriormente, se exhibe el modelado y control de los cuatro módulos.

El modelado se realiza a partir de redes de Petri que modelan a los subsistemas presentes en cada módulo o en el caso del robot de 3 GDL, redes de Petri que representan tareas específicas; posteriormente se agrupa cada modelo individual en uno solo, considerando restricciones de secuencia y de marcados, obteniendo el modelo de la planta. Así mismo, en los modelos resultantes del centro neumático, del centro de maquinados y del centro de prensado, se consideran los sensores que los componen, permitiendo una representación cercana al sistema físico.

El diseño de los supervisores para cada módulo se obtiene a partir de la metodología de *lugares invariantes* o *P-invariantes*, lo que permite mediante especificaciones de seguridad representadas por desigualdades lineales, generar controladores que limiten mínimamente el comportamiento de la celda de manufactura; obteniendo finalmente una planta controlada.

La planta controlada resultante es simulada y analizada en el software PIPE, observando su correcto funcionamiento mediante la dinámica de sus respectivos lugares marcados; y analizando sus lugares y transiciones invariantes. Por otra parte, la traducción a lenguaje escalera (LAD) es realizado por medio de diagramas bien establecidos, permitiendo la implementación en un Controlador Lógico Programable (PLC). La implementación física se realiza únicamente al centro neumático.

Así mismo, se diseña y construye un gabinete de control en donde se alojan el PLC, elementos de protección y distribución. El gabinete permite interactuar con el prototipo de manera fácil y segura. La planta controlada del centro neumático es validada de forma experimental en esta plataforma. El resultado obtenido es satisfactorio y congruente con el objetivo del supervisor previamente diseñado.



## Abstract

This work presents the application of Petri nets theory, and its respective control supervisor, to a flexible manufacturing cell prototype. At first, the description of the modules that make up the manufacturing cell is shown, these are: pneumatic center, machining center, 3 GDL robot and pressing center. Subsequently, the modeling and control of the four modules are presented.

The modeling is made based on Petri nets that model the subsystems present in each module or in the case of the 3 GDL robot, Petri nets that model jobs specifics; each individual model is subsequently grouped into one, considering sequence and operating restrictions, obtaining the plant model. Likewise, in the models of the pneumatic center, the machining center and the pressing center, the sensors that these have are considered, allowing an approximate representation of the physical system.

The design of the supervisors for each module is made based on place invariants or P-invariants methodology, allowing by means of security specifications represented by linear inequalities, generate controllers that minimally limit the behavior of the manufacturing cell; finally obtaining a controlled plant.

The resulting controlled plant is simulated and analyzed in the PIPE software, observing its correct operation by means of the dynamics of their respective marked places; and analyzing their invariant places and transitions. Moreover, the translation to ladder language (LAD) is made by means of set diagrams, allowing the implementation in a Programmable Logic Controller (PLC). The translation and implementation is made only to the pneumatic center.

Likewise, a control cabinet is designed and built to house the PLC, protection and distribution elements. The cabinet allows easy and safe interaction with the prototype. The supervised plant of the pneumatic center is experimentally validated on this platform. The result obtained is satisfactory and congruent with the objective of the designed supervisor.



# Contenido

Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XVII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Sistemas de Manufactura Flexible . . . . .	2
1.2. Sistemas de eventos discretos . . . . .	2
1.3. Planteamiento del problema . . . . .	3
1.4. Objetivos de la tesis . . . . .	3
1.5. Aportaciones de la tesis . . . . .	4
1.6. Estado del arte . . . . .	4
1.7. Organización de la tesis . . . . .	5
<b>2. Fundamentos teóricos</b>	<b>7</b>
2.1. Redes de Petri . . . . .	7
2.1.1. Definición de una Red de Petri y notación . . . . .	8
2.1.2. Dinámica de las redes de Petri . . . . .	10
2.1.3. Representación matricial . . . . .	11
2.1.4. Ecuación de estado . . . . .	11
2.1.5. Transiciones y lugares invariantes . . . . .	11
2.1.6. Concurrencia . . . . .	12
2.1.7. Exclusión mútua . . . . .	12
2.2. Control supervisor . . . . .	13
<b>3. Plataforma experimental</b>	<b>17</b>
3.1. Diseño del gabinete de control . . . . .	17
3.1.1. Controlador lógico programable . . . . .	18
3.2. Módulo del centro neumático . . . . .	20
3.3. Módulo del centro de maquinados . . . . .	20
3.4. Módulo del robot de 3 GDL . . . . .	21
3.5. Módulo del centro de prensado . . . . .	22

<b>4. Modelado de la Celda de Manufactura Flexible</b>	<b>25</b>
4.1. Centro neumático . . . . .	25
4.1.1. Modelo del pistón No.1 ( $Pi.1$ ) . . . . .	25
4.1.2. Modelo de la mesa giratoria ( $Mg$ ) . . . . .	26
4.1.3. Modelo de la prensa No.1 ( $Pr.1$ ) . . . . .	26
4.1.4. Modelo del pistón No.2 ( $Pi.2$ ) . . . . .	27
4.1.5. Modelo del centro neumático . . . . .	27
4.2. Centro de Maquinados . . . . .	29
4.2.1. Modelo de la banda de entrada ( $B_E$ ) . . . . .	29
4.2.2. Modelo del empujador No.1 ( $Emp.1$ ) . . . . .	30
4.2.3. Modelo de la banda del torno ( $B_{Tr}$ ) . . . . .	30
4.2.4. Modelo del torno ( $T_r$ ) . . . . .	31
4.2.5. Modelo de la banda de la fresadora ( $B_{Fr}$ ) . . . . .	31
4.2.6. Modelo de la fresadora ( $F_r$ ) . . . . .	31
4.2.7. Modelo del empujador No.2 ( $Emp.2$ ) . . . . .	32
4.2.8. Modelo de la banda de salida ( $B_S$ ) . . . . .	32
4.2.9. Modelo del centro de maquinados . . . . .	32
4.3. Robot de 3 GDL . . . . .	34
4.3.1. Modelo del gripper ( $G_r$ ) . . . . .	35
4.3.2. Modelo de la tarea 1 ( $Ta_1$ ) . . . . .	35
4.3.3. Modelo de la tarea 2 ( $Ta_2$ ) . . . . .	35
4.3.4. Modelo de la tarea 3 ( $Ta_3$ ) . . . . .	36
4.3.5. Modelo de la tarea 4 ( $Ta_4$ ) . . . . .	36
4.3.6. Modelo de la tarea 5 ( $Ta_5$ ) . . . . .	36
4.3.7. Modelo del robot de 3 GDL . . . . .	37
4.4. Centro de prensado . . . . .	38
4.4.1. Modelo de la banda transportadora ( $B_{E/S}$ ) . . . . .	38
4.4.2. Modelo de la máquina de prensado No.2 ( $Pr.2$ ) . . . . .	39
4.4.3. Modelo del centro de prensado . . . . .	39
<b>5. Control Supervisor de la Celda de Manufactura Flexible</b>	<b>41</b>
5.1. Supervisor del centro neumático . . . . .	41
5.1.1. Definición de las especificaciones . . . . .	41
5.1.2. Representación de las especificaciones en desigualdades lineales	42
5.1.3. Marcado inicial de los lugares de control $P_{ci}$ para la red de Petri	
$G_1$ . . . . .	42
5.1.4. Conexiones de los lugares de control ( $P_{C_{1E1}}, P_{C_{1E2}}, P_{C_{1E3}}$ ) con	
la red de Petri $G_1$ . . . . .	43
5.1.5. Planta supervisada . . . . .	45
5.2. Supervisor del centro de maquinados . . . . .	45
5.2.1. Definición de las especificaciones . . . . .	45
5.2.2. Representación de las especificaciones en desigualdades lineales	46

5.2.3.	Marcado inicial de los lugares de control $P_{ci}$ para la red de Petri $G_2$ . . . . .	46
5.2.4.	Conexiones de los lugares de control con la red de Petri $G_2$ . . . . .	47
5.2.5.	Planta supervisada . . . . .	48
5.3.	Supervisor del robot de 3 GDL . . . . .	49
5.3.1.	Definición de las especificaciones . . . . .	49
5.3.2.	Representación de las especificaciones en desigualdades lineales . . . . .	50
5.3.3.	Marcado inicial de los lugares de control $P_{ci}$ para la red de Petri $G_3$ . . . . .	50
5.3.4.	Conexiones de los lugares de control con la red de Petri $G_3$ . . . . .	51
5.3.5.	Planta supervisada . . . . .	52
5.4.	Supervisor del centro de prensado . . . . .	53
5.4.1.	Definición de las especificaciones . . . . .	53
5.4.2.	Representación de las especificaciones en desigualdades lineales . . . . .	53
5.4.3.	Marcado inicial de los lugares de control $P_{ci}$ para la red de Petri $G_4$ . . . . .	54
5.4.4.	Conexiones de los lugares de control ( $P_{c4E1}$ y $P_{c4E2}$ ) con la red de Petri $G_4$ . . . . .	55
5.4.5.	Planta supervisada . . . . .	56
<b>6.</b>	<b>Análisis de las plantas controladas</b> . . . . .	<b>57</b>
6.1.	Planta controlada del centro neumático, $Sup(G_1)$ . . . . .	57
6.2.	Planta controlada del centro de maquinados, $Sup(G_2)$ . . . . .	63
6.3.	Planta controlada del robot de 3 GDL, $Sup(G_3)$ . . . . .	68
6.4.	Planta controlada del centro de prensado, $Sup(G_4)$ . . . . .	72
<b>7.</b>	<b>Traducción a lenguaje del PLC</b> . . . . .	<b>75</b>
7.1.	Traducción a lenguaje escalera (LAD) . . . . .	75
7.2.	Traducción de una planta supervisada . . . . .	78
7.2.1.	Marcado inicial de $Sup(G_4)$ . . . . .	78
7.2.2.	Disparo de transiciones de la planta supervisada del centro de prensado ( $Sup(G_4)$ ) . . . . .	80
7.3.	Bloques de programación . . . . .	83
<b>8.</b>	<b>Conclusiones y trabajo futuro</b> . . . . .	<b>85</b>
8.1.	Conclusiones . . . . .	85
8.2.	Trabajo futuro . . . . .	86
	<b>Bibliografía</b> . . . . .	<b>87</b>
	<b>A. Diagrama eléctrico</b> . . . . .	<b>91</b>



# Lista de figuras

2.1. Red de Petri. . . . .	7
2.2. Red de Petri con marcado $x_1$ . . . . .	9
2.3. Red de Petri con marcado $x_2$ . . . . .	9
2.4. Concurrencia en redes de Petri. . . . .	12
2.5. Exclusión mútua en redes de Petri. . . . .	13
3.1. Gabinete de control en CATIA V5. . . . .	18
3.2. Partes principales del PLC S7-1200. . . . .	19
3.3. Gabinete de control. . . . .	19
3.4. Centro neumático. . . . .	20
3.5. Centro de maquinados. . . . .	21
3.6. Robot de 3 GDL. . . . .	22
3.7. Centro de prensado. . . . .	22
4.1. Red de Petri del pistón No.1 ( $Pi.1$ ). . . . .	26
4.2. Red de Petri de la mesa giratoria ( $Mg$ ). . . . .	26
4.3. Red de Petri de la prensa No.1 ( $Pr.1$ ). . . . .	26
4.4. Red de Petri del pistón No.2 ( $Pi.2$ ). . . . .	27
4.5. Red de Petri del centro neumático ( $G_1$ ). . . . .	28
4.6. Red de Petri de la banda de entrada ( $B_E$ ). . . . .	30
4.7. Red de Petri del empujador No.1 ( $Emp.1$ ). . . . .	30
4.8. Red de Petri de la banda del torno ( $B_{Tr}$ ). . . . .	30
4.9. Red de Petri del torno ( $T_r$ ). . . . .	31
4.10. Red de Petri de la banda de la fresadora ( $B_{Fr}$ ). . . . .	31
4.11. Red de Petri de la fresadora ( $F_r$ ). . . . .	31
4.12. Red de Petri del empujador No.2 ( $Emp.2$ ). . . . .	32
4.13. Red de Petri de la banda de salida ( $B_S$ ). . . . .	32
4.14. Red de Petri del centro de maquinados ( $G_2$ ). . . . .	34
4.15. Red de Petri del gripper ( $G_r$ ). . . . .	35
4.16. Red de Petri de la tarea 1 ( $Ta_1$ ). . . . .	35
4.17. Red de Petri de la tarea 2 ( $Ta_2$ ). . . . .	35
4.18. Red de Petri de la tarea 3 ( $Ta_3$ ). . . . .	36
4.19. Red de Petri de la tarea 4 ( $Ta_4$ ). . . . .	36

4.20. Red de Petri de la tarea 5 ( $Ta_5$ ). . . . .	36
4.21. Red de Petri del robot de 3 GDL ( $G_3$ ). . . . .	38
4.22. Red de Petri de la banda transportadora ( $B_{E/S}$ ). . . . .	39
4.23. Red de Petri de la máquina de prensado No.2 ( $Pr.2$ ). . . . .	39
4.24. Red de Petri del centro de prensado ( $G_4$ ). . . . .	40
5.1. Red de Petri de la planta supervisada, $Sup(G_1)$ . . . . .	45
5.2. Red de Petri de la planta supervisada, $Sup(G_2)$ . . . . .	49
5.3. Red de Petri de la planta supervisada, $Sup(G_3)$ . . . . .	53
5.4. Red de Petri de la planta supervisada, $Sup(G_4)$ . . . . .	56
6.1. Análisis de los invariantes de la red $Sup(G_1)$ . . . . .	58
6.2. Pistón de entrada y mesa giratoria sin colisión (Especificación 1E1). . . . .	60
6.3. Prensa No.1 y mesa giratoria sin colisión (Especificación 1E2). . . . .	61
6.4. Pistón de salida y mesa giratoria sin colisión (Especificación 1E3). . . . .	62
6.5. P-invariantes de la red $Sup(G_2)$ . . . . .	63
6.6. Análisis de los T-invariantes de la red $Sup(G_2)$ . . . . .	63
6.7. Ecuaciones invariantes de la red $Sup(G_2)$ . . . . .	64
6.8. Banda del torno o torno activado (Especificación 2E2). . . . .	66
6.9. Banda de la fresadora o máquina fresadora activada (Especificación 2E6). . . . .	67
6.10. Análisis de los P-invariantes de la red $Sup(G_3)$ . . . . .	68
6.11. Análisis de los T-invariantes de la red $Sup(G_3)$ . . . . .	69
6.12. Tarea 2 o Tarea 3 activado (Especificación 3E3). . . . .	70
6.13. Tarea 3 o Tarea 5 activado (Especificación 3E5). . . . .	71
6.14. Análisis de los P-invariantes de la red $Sup(G_4)$ . . . . .	72
6.15. Análisis de los T-invariantes de la red $Sup(G_4)$ . . . . .	72
6.16. Banda transportadora gira hacia adelante o prensa No.2 activada (Especificación 4E1). . . . .	73
6.17. Banda transportadora gira hacia atrás o prensa No.2 activada (Especificación 4E2). . . . .	74
7.1. Marcado inicial en LAD. . . . .	75
7.2. Disparo de una transición en LAD. . . . .	76
7.3. Arco inhibidor en LAD. . . . .	76
7.4. Arcos bidireccionales en LAD. . . . .	77
7.5. Disparo de transiciones con plazas no binarias en LAD. . . . .	77
7.6. Planta controlada del centro de prensado, $Sup(G_4)$ . . . . .	78
7.7. Traducción a LAD del marcado inicial de $Sup(G_4)$ . . . . .	79
7.8. Transición $T_{200}$ en LAD. . . . .	80
7.9. Traducción a LAD del subsistema $B_{E/S}$ . . . . .	81
7.10. Traducción a LAD del subsistema $Pr.2$ . . . . .	82
7.11. Bloques de programación para el centro neumático. . . . .	83



---

# Lista de tablas

3.1. Dispositivos principales del gabinete de control. . . . .	18
4.1. Restricciones de funcionamiento del centro neumático. . . . .	27
4.2. Restricciones de secuencia y marcado del centro de maquinados. . . . .	33
4.3. Restricciones de secuencia del robot de 3 GDL. . . . .	37
4.4. Restricciones de secuencia del centro de prensado. . . . .	39
5.1. Marcado inicial de los lugares de control del centro neumático. . . . .	43
5.2. Arcos de entrada y salida de los lugares de control. . . . .	44
5.3. Marcado inicial de los lugares de control del centro de maquinados. . . . .	47
5.4. Arcos de entrada y salida de los lugares de control $P_{C_{2E1}}$ a $P_{C_{2E8}}$ . . . . .	48
5.5. Marcado inicial de los lugares de control del robot 3 GDL. . . . .	51
5.6. Arcos de entrada y salida de los lugares de control. . . . .	52
5.7. Marcado inicial de los lugares de control del centro de prensado. . . . .	54
5.8. Arcos de entrada y salida de los lugares de control $P_{C_{4E1}}$ y $P_{C_{4E2}}$ . . . . .	56
7.1. Lugares con marcado inicial en LAD. . . . .	79
7.2. Transiciones con sus lugares de entrada y salida. . . . .	80

# Capítulo 1

## Introducción

En este capítulo se presentan conceptos fundamentales para desarrollar el presente trabajo de tesis. El capítulo se encuentra organizado de la siguiente manera. En la Sección 1.1 se introduce el concepto de sistemas de manufactura flexible y sus características principales. En la Sección 1.2 se describen los conceptos de eventos discretos y formalismos de modelado. La Sección 1.3 plantea el problema que se busca resolver en este trabajo de tesis. En la Sección 1.4 se retoma el problema planteado anteriormente y se divide en los diversos objetivos a llevar a cabo. En la Sección 1.5 se describen las aportaciones que se espera obtener de este trabajo de tesis. En la Sección 1.6 se presenta el estado del arte en los sistemas de eventos discretos, redes de Petri y control supervisor. Por último en la Sección 1.7 se da una descripción de la organización de todo el contenido del documento.

## 1.1. Sistemas de Manufactura Flexible

En la actualidad la alta demanda de nuevos productos, ha resultado en un problema para el área industrial, buscando la implementación de nuevas tecnologías. En este sentido, las líneas de producción industrial requieren un sistema ágil y flexible. Esto corresponde a un Sistema de Manufactura Flexible (SMF). Flexibilidad significa que un sistema de manufactura es hábil para ajustarse a diferentes preferencias del cliente y ágil que el sistema es rápido en reconfigurarse a sí mismo para satisfacer las cambiantes demandas [1]. Así mismo, un SMF es un sistema controlado por computadora compuesto por un grupo de estaciones de trabajo automatizadas e interconectadas por sistemas automáticos de manejo y almacenamiento de materiales [2].

Debido a la flexibilidad de un SMF, los sistemas de manejo de materiales son muy importantes. Este sistema se controla mediante una computadora central y se ejecuta por medio de vehículos guiados automáticamente, bandas transportadoras y diversos mecanismos de transferencia. Tiene la capacidad de transportar materias primas, piezas en bruto y partes en diversas etapas de terminación a cualquier máquina y en cualquier momento [3]. Tomando en cuenta que un SMF es controlado por una computadora, el presente trabajo de tesis busca implementar un formalismo llamado redes de Petri, para traducirlo y programarlo en una computadora central y controlar un SMF.

## 1.2. Sistemas de eventos discretos

Los Sistemas de Eventos Discretos (DES) son sistemas dinámicos que evolucionan de acuerdo con la ocurrencia abrupta de eventos físicos [4]. Por ejemplo, señales de sensores, accionamiento de botones, fallas de equipos, etc. Por lo tanto, los SMF pueden ser modelados como sistemas de eventos discretos. La teoría de los DES proporciona un marco para describir y analizar el comportamiento de un SMF.

La coordinación de equipos de Sistemas de Manufactura Automatizados (SMA) entre ellos los SMF, ha sido ampliamente estudiada por la comunidad de sistemas de eventos discretos, debido a los comportamientos dinámicos asíncronos y concurrentes que pueden ser capturados por algunas estructuras matemáticas lógicas y temporales como autómatas de estado finito (FSA) o redes de Petri (PN) [5]. Así, los SMF pueden ser modelados empleando los formalismos antes mencionados. En este trabajo de tesis, emplearemos redes de Petri para modelar a los subsistemas presentes en cada módulo de un prototipo de Celda de Manufactura Flexible (CMF). Este modelo permite tener una rápida representación de los subsistemas de los módulos de la CMF. Sin embargo, para agrupar cada modelo individual en uno solo, se necesitan ciertas restricciones de secuencia y de marcados, lo cuál dificulta su elaboración. Por ello, se hace uso del software PIPE (Platform Independent Petri-net Editor) [7], [6], para visualizar el comportamiento de la red de Petri.

Por otra parte, existen ciertas ventajas de utilizar PN para modelar un SMF, como la visualización de los estados del sistema, número de lugares reducidos, concurrencia entre piezas de trabajo, así como observar su dinámica.

### 1.3. Planteamiento del problema

Los sistemas de manufactura flexible, cuentan con un conjunto de estaciones de trabajo que contienen varias máquinas, cada una de ellas ejecuta un proceso diferente de manufactura sobre la pieza o material. Así mismo, los SMF tienen la capacidad de trabajar con diferentes piezas o materiales al mismo tiempo, en cada una de las diferentes máquinas, evitando aglomeraciones de material. Para lograrlo, estos sistemas cuentan con una computadora central, que en su mayoría es un PLC, en el cuál se programa un cierto proceso de manufactura. Sin embargo, elaborar un programa para un sistema industrial requiere de cierta experiencia en el uso de la maquinaria, además de llevar tiempo en su elaboración. Es por ello, que en este trabajo de tesis se intenta abordar el problema de modelado y control de un SMF evitando aglomeraciones de material, a partir de la aplicación de formalismos como las redes de Petri; así mismo, con la obtención de una red de Petri que represente a los módulos de SMF controlada, nos permite la implementación a LAD (Ladder Logic) de manera sencilla, a partir de la traducción de esta red mediante gráficos bien establecidos.

### 1.4. Objetivos de la tesis

En este trabajo de tesis se plantea el siguiente objetivo general:

- Aplicar el formalismo de redes de Petri y su respectivo control supervisor para ser traducido e implementado a un prototipo de celda de manufactura flexible.

Para llevar a cabo el objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Integración de la plataforma experimental. La cual estará conformada por dos elementos esenciales, el prototipo de celda de manufactura flexible y el gabinete de control. El gabinete de control debe diseñarse y construirse, esto implica:
  - Realizar un diseño en CAD del gabinete y sus elementos.
  - Construir el gabinete de control, instalando los elementos de protección eléctricos, distribución y control.
  - Realizar las conexiones y cableado entre el gabinete de control y el prototipo de celda de manufactura flexible.
  - Pruebas para verificar el correcto funcionamiento de la plataforma experimental.
- Modelado de los módulos de la celda de manufactura flexible empleando redes de Petri para obtener su comportamiento.

- Definición de las especificaciones de seguridad y representación por medio de desigualdades lineales.
- Obtención del marcado inicial de los supervisores o lugares de control, así como sus respectivos arcos de entrada y de salida.
- Obtención de las plantas controladas.
- Análisis y simulación en el software PIPE de las plantas controladas para observar su correcto funcionamiento (cumplimiento de las especificaciones de seguridad y no bloqueo).
- Traducción de las plantas y sus respectivos lugares de control a lenguaje escalera (LAD) para su implementación en tiempo real en un PLC o en su defecto en una animación.

## 1.5. Aportaciones de la tesis

En este trabajo de tesis se trata de abordar los problemas de modelado y control de una CMF evitando aglomeraciones de material, además de la dificultad de implementación física. En la parte de modelado, se aplica el formalismo de redes de Petri, considerando los subsistemas o tareas presentes en cada módulo y obteniendo sus representaciones, de tal manera que puedan observarse la dinámica de los subsistemas y los materiales, mediante la incorporación de lugares a partir de restricciones de secuencia y funcionamiento. Así mismo, la aplicación de la teoría de control a las redes de Petri, permite contar con plantas controladas que restringen el comportamiento de los módulos evitando conflictos entre sus subsistemas.

Para la implementación en tiempo real o en animación, se presentan los elementos esenciales para la traducción de una red de Petri a LAD desarrollados en [17], de tal manera que las plantas controladas obtenidas puedan ser traducidas e implementadas de manera sencilla, ya que estas cuentan con un número pequeño de lugares, reduciendo el tiempo de implementación y de recursos computacionales.

## 1.6. Estado del arte

Las redes de Petri cuentan con aproximadamente 58 años de existencia desde su concepción en 1962, en este periodo se han desarrollado miles de publicaciones relacionadas con la teoría de PN, nuevas PN, ámbitos de aplicación y formas de implementación. Los trabajos sobre PN en SMF hasta 1989 eran muy pocos con once publicaciones [8]. Hasta ese momento la lógica de control y el modelo de la planta se realizaban simultáneamente, fue hasta [9] que se establece que el control y la planta pueden ser separados, introduciendo el concepto de lugares de control externos. En [10] se establece el control supervisor mediante una PN para un proceso industrial

por lotes, el método planteado se basa en el cálculo de los *lugares invariantes* o *P-invariantes*, traduciendo la PN controlada a SFC, que es un lenguaje estandarizado de programación de PLC definido en IEC 1131-3. Así mismo, en [16] se utiliza el método de lugares invariantes para construir un controlador retroalimentado para un DES modelado por PN.

Sin embargo, en los trabajos ya mencionados no se muestra como realizar la traducción de una PN a lenguaje escalera (LAD). En [17] se muestra una metodología para sintetizar rápidamente programas para PLC; se basa en un conjunto de reglas de traducción simples que producen LAD a partir de una PN, en especial de las redes de Petri Interpretadas Temporizadas (TIPN). En [18] se muestra la aplicación de la metodología anterior para traducir redes de Petri interpretadas, para implementarse en un PLC, con el objetivo de controlar un proceso de embotellado de agua purificada, así mismo, se observa que dicha metodología puede ser aplicable a PN puras, PN temporizadas y TIPN. Así mismo, en [11] se realiza la conversión de redes de Petri en aplicaciones en tiempo real aplicando la metodología de la lógica de paso de marcas (TPL por sus siglas en inglés), esta técnica ha sido desarrollada para PN normales, PN temporizadas en P, PN temporizadas en T y redes de Petri coloreadas; en la PN obtenida se incluyen los actuadores y sensores como estructuras formales dentro del controlador, la traducción se aplica a un SMF.

Ahora bien, en los trabajos anteriores, la traducción a LAD no se implementa físicamente, solo se muestra como traducir una PN a LAD y en el caso de [18] la traducción se simula en el programa TLP LogixPro Simulator de Rockwell Automation. En [12], [13] se modela y controla un SMF mediante PN, sin embargo el modelo y control no son separados por lugares de control externos. Por ende, en este trabajo de tesis se busca obtener un modelo mediante PN y controlarlo de manera separada usando lugares de control externos, utilizando la metodología de los P-invariantes, el cuál será implementado y comprobado físicamente o en animación, de tal manera que pueda observarse el correcto funcionamiento de cada módulo de la CMF.

## 1.7. Organización de la tesis

En el Capítulo 2 se presentan los fundamentos teóricos necesarios para abordar el problema del modelado y la obtención del control supervisor, también conocidos como lugares de control. Se define lo que es una red de Petri y su dinámica. También se presenta los fundamentos del control supervisor en redes de Petri, así como la obtención de los lugares de control.

En el Capítulo 3 se presenta la plataforma experimental, se describe el diseño y los elementos del gabinete de control. Así mismo, se describe los módulos del centro neumático, el centro de maquinados, el robot de 3 GDL y el centro de prensado.

En el Capítulo 4 se realiza el modelado de los cuatro módulos que componen a la

CMF. El modelado se obtiene a partir de subsistemas o tareas principales, representados mediante gráficos de redes de Petri. El modelo completo de cada módulo se obtiene a partir de la unión de los subsistemas o tareas mediante restricciones de secuencia y de marcados. Las redes de Petri obtenidas en este capítulo son la base para conseguir los lugares de control.

En el Capítulo 5, a partir de las redes de Petri obtenidas en el capítulo 4 y de la definición de las especificaciones de seguridad, se obtienen los lugares de control, marcas iniciales y arcos de entrada y salida, los cuales restringen el comportamiento de cada módulo.

En el Capítulo 6 se presenta el análisis y simulación de las plantas controladas obtenidas en el Capítulo 5 en el software PIPE, para observar el cumplimiento de las especificaciones de seguridad y la no existencia de bloqueos.

En el Capítulo 7 se presentan los gráficos para la traducción de una red de Petri a lenguaje de programación LAD. Además, se presentan los bloques de programación en los cuales se implemento el centro neumático en un PLC S7-1200 de la marca Siemens.

En el Capítulo 8 se enlistan las conclusiones obtenidas a partir del desarrollo del presente trabajo de tesis, así como posibles trabajos futuros. Además, en el apéndice A se muestra el diagrama eléctrico del gabinete de control.

## Capítulo 2

# Fundamentos teóricos

En este capítulo se presentan conceptos básicos sobre la teoría de redes de Petri (PN), los cuales se utilizarán para modelar los módulos del prototipo de celda de manufactura flexible (CMF). Así mismo, se presentan los fundamentos de los lugares invariantes para obtener el control supervisor mediante PN, los cuales serán utilizados para conseguir los lugares de control, para cada uno de los modelos presentados en este trabajo. Este capítulo se basa principalmente en [5], [14], [15] y [16].

### 2.1. Redes de Petri

Las **redes de Petri** (PN) proporcionan una alternativa de modelado para Sistemas de Eventos Discretos (DES). Así mismo, las redes de Petri son relacionadas con autómatas en el sentido de que también representan explícitamente la función de transición de DES. Como un autómata, una red de Petri es un dispositivo que manipula eventos de acuerdo con ciertas reglas [5]. Una de sus características es que incluye condiciones explícitas bajo las cuales un evento puede estar habilitado. Esta representación se describe gráficamente, resultando en gráficos de red de Petri, como el que se muestra a continuación (**Figura: 2.1**); dichos gráficos son intuitivos y capturan mucha información estructural sobre el sistema.

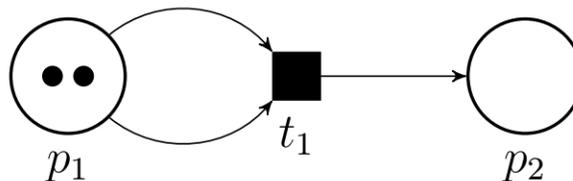


Figura 2.1: Red de Petri.

### 2.1.1. Definición de una Red de Petri y notación

**Definición 2.1 (Red de Petri).** Una Red de Petri es una cuádrupla

$$RP = \{P, T, \alpha, \beta\}$$

Donde,

- $P$  es un conjunto finito y no vacío de lugares.
- $T$  es un conjunto finito y no vacío de transiciones.
- $P \cap T = \emptyset$
- $\alpha : P \times T \rightarrow N$  es la función de incidencia previa.
- $\beta : T \times P \rightarrow N$  es la función de incidencia posterior.

Alternativamente, también es denotada como,

$$RP = \{P, T, A, \omega\}$$

Donde,

- $A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$  es el conjunto de todos los arcos en la gráfica.
- $\omega : A \rightarrow \{1, 2, 3, \dots\}$  i.e.  $N^+$  es la función de pesos en los arcos.

Para la representación gráfica se tiene,

- Arco de  $P_i$  a  $t_j \Leftrightarrow \alpha(p_i, t_j) \neq 0$
- Arco de  $t_k$  a  $p_i \Leftrightarrow \beta(t_k, p_i) \neq 0$
- Arcos etiquetados con un peso =  $\alpha(p_i, t_j)$  ó  $\beta(t_k, p_i)$

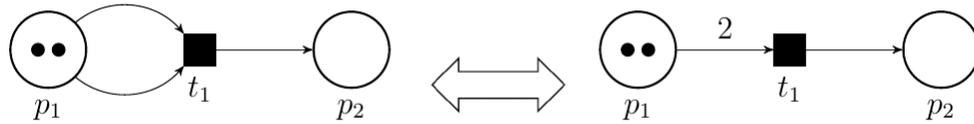
Ahora bien, se desea caracterizar ó clasificar a los lugares  $P$  en función de su relación con las transiciones  $T$  y viceversa.

1.  $I(t_j) := \{p_i \in P : (p_i, t_j) \in A\}$
2.  $O(t_j) := \{p_i \in P : (t_j, p_i) \in A\}$
3.  $Inp(p_i) := \{t_j \in T : (t_j, p_i) \in A\}$
4.  $Outp(p_i) := \{t_j \in T : (p_i, t_j) \in A\}$

Así mismo, los pesos de cada arco ó numero de arcos en una red de Petri, cumplen lo siguiente:

$$\begin{aligned} \omega(p_i, t_j) &= 0 \quad , \text{cuando } p_i \notin I(t_j) \\ \omega(t_j, p_i) &= 0 \quad , \text{cuando } p_i \notin O(t_j) \end{aligned}$$

En seguida, se muestra un ejemplo para poder comprender lo anteriormente mencionado:



$$P = \{p_1, p_2\}$$

$$T = \{t_1\}$$

$$A = \{(p_1, t_1), (t_1, p_2)\} \left. \begin{array}{l} \alpha(p_1, t_1) = 2 \\ \beta(t_1, p_2) = 1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \omega(p_1, t_1) = 2; \\ \omega(t_1, p_2) = 1 \end{array}$$

**Definición 2.2 (Red de Petri marcada).** Una Red de Petri marcada es una *quín-tupla*  $(P, T, A, \omega, x)$ , donde  $(P, T, A, \omega)$  es el gráfico de una red de Petri y  $x$  es un marcado de los lugares  $P$ ;  $x = [x(p_1), x(p_2), \dots, x(p_n)] \in N^n$  es el vector fila asociado con  $x$ .

Ejemplo:

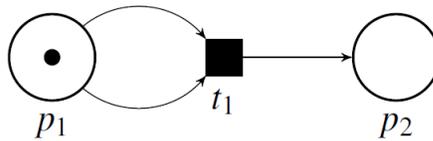


Figura 2.2: Red de Petri con marcado  $x_1$ .

$$x_1 = [1, 0]$$

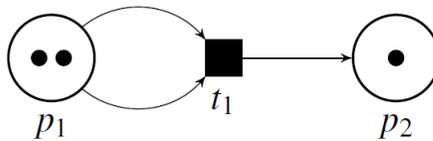


Figura 2.3: Red de Petri con marcado  $x_2$ .

$$x_2 = [2, 1]$$

El numero de marcas en un lugar corresponde al **estado**, sin embargo, se prefiere el termino **marcado**. En función del marcado de la red, se puede definir la habilitación de transiciones y, por lo tanto, el disparo de las mismas.

**Definición 2.3 (Transición habilitada).** *Una transición  $t_i \in T$  se dice habilitada si  $x(p_i) \geq \omega(p_i, t_j) \quad \forall \quad p_i \in I(t_j)$ .*

En palabras, la transición  $t_j$  en la red de Petri se habilita cuando el número de puntos (marcas) en  $p_i$  es mayor o igual que el peso del arco que conecta  $p_i$  con  $t_j$ , para todos los lugares  $p_i$  que son entradas a la transición  $t_j$ . Por ejemplo, en la figura 2.2 con marcado  $x_1$ ,  $x(p_1) = 1 < \omega(p_1, t_1) = 2$  y por lo tanto  $t_1$  no es habilitado; por otro lado, en la figura 2.3 con el marcado  $x_2$ , tenemos  $x(p_1) = 2 = \omega(p_1, t_1)$  y  $t_1$  es habilitado.

### 2.1.2. Dinámica de las redes de Petri

El mecanismo de transición de estado en las redes de Petri se genera moviendo los puntos (marcas) a través de la red y por lo tanto, cambiando el estado de la red de Petri. Cuando se habilita una transición, decimos que se puede disparar o que puede ocurrir. La función de transición de estado de una red de Petri se define a través del cambio en el estado de la red de Petri debido al disparo de una transición habilitada.

**Definición 2.4 (Dinámica de una red de Petri).** *La función de transición de estados  $f : N^n \times T \rightarrow N^n$  de la red  $(P, T, A, \omega, x)$  esta definida para la transición  $t_j$  si y solo si*

$$x(p_i) \geq \omega(p_i, t_j) \quad \forall \quad p_i \in I(t_j)$$

Si  $f(x, t_j)$  esta definida, entonces se tiene que la dinámica de la red esta dada por,

$$\dot{x} = f(x, t_j)$$

donde,

$$\dot{x}(p_i) = x(p_i) - \omega(p_i, t_j) + \omega(t_j, p_i) \quad \text{para } i = 1, \dots, n$$

Lo anterior se puede escribir de manera compacta como,

$$\dot{x}(p) = x(p) - \omega(p, t) + \omega(t, p)$$

donde,

$$\begin{aligned} x(p) & \text{ si } p \notin I(t) \wedge p \notin O(t) \\ x(p) - \omega(p, t) & \text{ si } p \in I(t) \wedge p \notin O(t) \\ x(p) - \omega(p, t) + \omega(t, p) & \text{ si } p \in I(t) \wedge p \in O(t) \\ x(p) + \omega(t, p) & \text{ si } p \notin I(t) \wedge p \in O(t) \end{aligned}$$

**Definición 2.5 (Estados alcanzables).** *Dada la red de Petri  $RP = (P, T, A, \omega, x)$ . Su conjunto de estados alcanzables esta dado por,*

$$R(RP) := \left\{ y \in N^{|P|} : \exists \quad s \in T^* (f(x_0, s) = y) \right\}$$

Tal que los lenguajes generado y marcado están dados por,

$$\begin{aligned}\mathcal{L}(N) &= \{l(s) \in E^* : (s \in T^*) \wedge (f(x_0, s) \text{ es definido})\} \\ \mathcal{L}_m(N) &= \{l(s) \in \mathcal{L}(N) : (s \in T^*) \wedge (f(x_0, s) \in X_m)\}\end{aligned}$$

### 2.1.3. Representación matricial

- Matriz de incidencia previa:  $C^- = [C_{ij}^-]$ , donde  $C_{ij}^- = \alpha(p_i, t_j)$
- Matriz de incidencia posterior:  $C^+ = [C_{ij}^+]$ , donde  $C_{ij}^+ = \beta(t_j, p_i)$
- Matriz de incidencia:  $C = C^+ - C^-$

### 2.1.4. Ecuación de estado

La matriz de incidencia  $C$  definida anteriormente, también se puede definir por entradas como,

$$C_{ij} = \omega(t_j, p_i) - \omega(p_i, t_j)$$

y definiendo el vector de disparo  $u \in R^m$  con  $m = |T|$ , tal que

$$[0 \dots 010 \dots 0]$$

donde, 1 aparece en la  $j$ -ésima posición, indicando que la  $j$ -ésima transición se está disparando.

Bajo esta definición la dinámica de la red está dada por,

$$\dot{x} = x + uC$$

donde,  $x \in R^{n=1 \times |P|}$ ,  $u \in R^{m=1 \times |T|}$ ,  $C \in R^{m \times n}$

### 2.1.5. Transiciones y lugares invariantes

Una de las propiedades estructurales de las redes de Petri, es decir, las propiedades que dependen solo de la estructura topológica de la red de Petri y no del marcado inicial de la red, son llamados *invariantes*. Una *transición invariante* (T-invariante) se define como un vector de disparo  $u$  que satisface

$$uC = 0 \tag{2.1}$$

Un T-invariante indica un posible bucle en la red de Petri, es decir, una secuencia de transiciones cuyo efecto neto es nulo, es decir, que devuelve a un marcado. Por lo tanto, si existe un bucle eso permite saber que hay una secuencia de transiciones que pueden ser disparadas infinitas veces, lo que indica que la red es no bloqueante.

Por otra parte, los *lugares invariantes* (P-invariantes) son conjuntos de lugares donde

su conteo de marcas permanece constante. Están representados por un vector  $l$  no nulo,  $l = [l_1, \dots, l_n]^T$ , donde  $n$  es el número de lugares de la red de Petri, cuyas entradas distintas de cero corresponden a los lugares que pertenecen a los invariantes y ceros en donde no. Un lugar invariante se define como cada vector entero  $l$  que satisface

$$xl = x_0l \quad (2.2)$$

Donde  $x_0$  es el marcado inicial de la red y  $x$  representa cualquier marcado posterior. La ecuación (2.2) implica que la suma ponderada de las marcas en los lugares invariantes permanece constante en todo marcado y esta suma está determinada por el marcado inicial de la red de Petri. El lugar invariante de una red se puede calcular encontrando las soluciones enteras para

$$Cl = 0 \quad (2.3)$$

Donde  $C$  es la matriz incidencia  $m \times n$  de la red de Petri con  $n$  siendo el número de lugares y  $m$  el número de transiciones de la red.

### 2.1.6. Concurrencia

La concurrencia hace referencia a la ejecución simultánea de procesos, dificultando la percepción del concepto de estado.

En las redes de Petri, la concurrencia se modela mediante *transiciones con mas lugares de salida que de entrada* (distribución) aumentando el número total de lugares marcados (**Figura 2.4**).

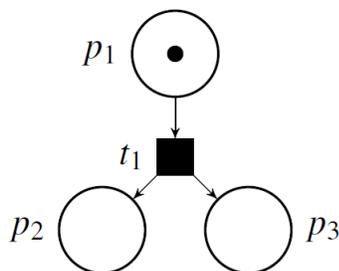


Figura 2.4: Concurrencia en redes de Petri.

Existen algunos problemas en el modelado con autómatas de estados finitos de sistemas con evoluciones paralelas (sistemas concurrentes), como son:

- Pueden obtenerse descripciones complejas (gran número de estados).
- No pueden realizarse modificaciones locales del comportamiento del sistema.

### 2.1.7. Exclusión mútua

La exclusión mútua es cuando existe recursos que solo pueden ser utilizados por un proceso o por un número limitado de procesos al mismo tiempo. En las redes de

Petri, la exclusión m utua se modela mediante *lugares marcados con mas transiciones de salida que de entrada* (selecci3n), como se muestra en la **Figura 2.5**.

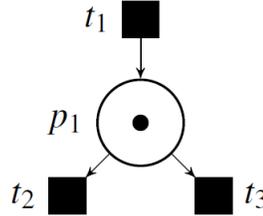


Figura 2.5: Exclusi3n m utua en redes de Petri.

## 2.2. Control supervisor

En un sistema modelado por una red de Petri, la teoría de control supervisor puede ser vista en términos del estado para un determinado sistema no controlado. Esto quiere decir, que las especificaciones sobre el sistema no controlado se establece en términos de estados prohibidos y el mecanismo de control es decidir cual de las transiciones habilitadas en el sistema debe permitir que el controlador se active. Por lo tanto, el controlador debe garantizar que no se alcance ninguno de los estados prohibidos, y debe realizarlo con una mínima intervenci3n en el comportamiento del sistema.

Considerando un sistema modelado por la red de Petri.

$$N = \{P, T, \alpha, \beta, x\}$$

Con su matriz de incidencia,

$$C = C^+ - C^-$$

Donde,

$C_{ij}^- = \alpha(p_i, t_j)$  es la matriz de incidencia previa.

$C_{ij}^+ = \beta(t_j, p_i)$  es la matriz de incidencia posterior

Recordando que  $C$  es de dimensi3n  $m \times n$ , donde  $m = |T|$  y  $n = |P|$ . Considerando que la especificaci3n para el comportamiento de  $N$  bajo un control se expresa en términos de una desigualdad lineal en el estado  $x$  de la red, la cual debe mantenerse para todos los estados alcanzables, entonces

$$xl \leq b \quad \forall \quad x \in R(N) \quad (2.4)$$

El vector columna  $l$  es de dimensi3n  $n$ ; la constante  $b$  y las entradas de  $l$  son enteros. Las desigualdades lineales de la forma (2.4) a menudo son denominadas **condiciones generalizadas de exclusi3n mutua**.

Para llevar a cabo la especificación (2.4) se introduce un nuevo lugar  $Pc$ , el cuál puede ser considerado como un **lugar de control** que realiza una política de control dada para  $N$ . Para conocer cuales son los arcos de entradas y salidas de  $Pc$ , se relacionan la especificación en (2.4) con la propiedad de conservación e invarianza de lugares, ecuación (2.3).

Si  $l$  es un lugar invariante, entonces

$$\begin{aligned} xl &= x_0l + vCl \\ &= x_0l \end{aligned}$$

Para todos los estados alcanzables  $x \in R(N)$ .

Puede reescribirse la desigualdad lineal (2.4) como una igualdad para agregar el lugar de control  $Pc$ .

$$xl + x(Pc) = b \quad (2.5)$$

La introducción del lugar  $Pc$  significa que la nueva matriz de incidencia para modificar el gráfico de la red de Petri es de la forma,

$$C_{new} = [C \quad Cc]$$

Donde  $Cc$  es un vector columna de dimensión  $m$ , el cual describe la conectividad de el nuevo lugar  $Pc$  a las transiciones de  $N$ . Si podemos encontrar un lugar invariante para  $C_{new}$ , denotado por  $l_{new}$ , de la forma

$$l_{new}^T = [l^T \quad 1]$$

Es decir,

$$C_{new}l_{new} = [C \quad Cc] \begin{bmatrix} l \\ 1 \end{bmatrix} = 0$$

Entonces se consigue,

$$x_{new}l_{new} = constante \quad (2.6)$$

$$\Rightarrow xl + x(Pc) = constante$$

Para todo  $x \in R(N)$  y para todas las opciones de  $x_0$  en  $N$ .

Por lo tanto, el  $Cc$  deseado esta dado por

$$Cc = -Cl \quad (2.7)$$

El marcado inicial en el lugar  $Pc$  se elige en función de  $x_0$  para forzar la **constante** en (2.6) a ser igual a  $b$

$$x_0(Pc) = b - x_0l \quad (2.8)$$

Si resulta (2.8) en una entrada negativa para  $x_0(Pc)$ , entonces concluimos que no existe solución al problema original.

Con  $Cc$  y  $x_0(Pc)$  determinado por (2.7) y (2.8), respectivamente, se concluye que

$$xl + x(Pc) = b$$

Para todo estado alcanzable  $x \in R(N)$ , que satisface la especificación original en (2.4).



## Capítulo 3

# Plataforma experimental

En este capítulo se presenta la descripción de la plataforma experimental, la cuál cuenta con dos partes esenciales, el gabinete de control y el prototipo de Celda de Manufactura Flexible (CMF) marca Fishertechnik. Primeramente se muestra el diseño y la construcción del gabinete de control en el cual se aloja el PLC S7-1200 de la marca SIEMENS, además de las características del PLC. Por otra parte, en esta sección se describe a la CMF y los módulos que la conforman.

### 3.1. Diseño del gabinete de control

Un gabinete de control es un tablero donde se almacenan y organizan los dispositivos de seguridad y los mecanismos de control que realizan funciones específicas en un proceso de automatización.

El diseño del gabinete de control fue realizado en *CATIA V5*, el cuál tiene las siguientes tres funciones principales:

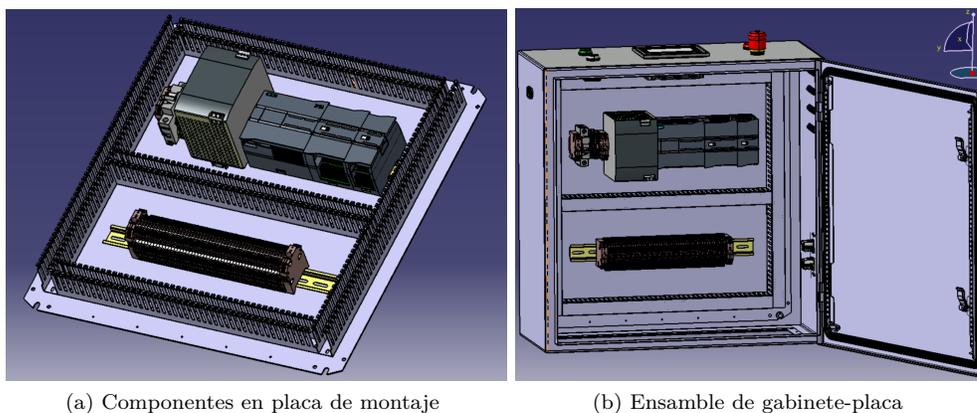
- Mantener una buena distribución y organización de los dispositivos eléctricos y electrónicos, así como de las entradas y salidas discretas del PLC.
- Protección del dispositivo de alimentación (Fuente de alimentación) y control (PLC).
- Inicio y control del prototipo de CMF.

Por lo tanto, para llevar a cabo las funciones mencionadas anteriormente, se utilizaron los dispositivos principales mostrados en la tabla 3.1.

El gabinete de control cuenta con una placa de montaje (removible) en el cuál fueron fijados algunos componentes de la tabla 3.1 y los cuales se muestran en la figura 3.1.

It.	Cant.	Descripción	Marca
1	1	Conector IEC320 C14 Macho	N/A
2	1	Clema portafusible con LED WSI 6/LD 60-150V	Weidmuller
3	1	PSL6-C3-MW, interruptor riel 1, polo 3 A	Moeller
4	1	Fuente ABB CP-S 24/10 A (24 V fijos a 10 A)	ABB
5	1	Pulsador no iluminado verde	Eaton
6	4	Conector macho DB37	Conec
7	1	SIMATIC S7-1200, CPU S7-1200 1214C AC/DC/RLY	Siemens
8	1	SIMATIC S7-1200, E/S digitales SM 1223, 16 DI/DO, 16 DI DC 24 V, 16 DO, relé 2 A	Siemens
9	1	SIMATIC S7-1200, E/S digitales SM 1223, 8 DI/DO, 8 DI DC 24 V, 8 DO DC 24 V	Siemens

Tabla 3.1: Dispositivos principales del gabinete de control.



(a) Componentes en placa de montaje

(b) Ensamble de gabinete-placa

Figura 3.1: Gabinete de control en CATIA V5.

### 3.1.1. Controlador lógico programable

Un controlador lógico programable (PLC) es un sistema especialmente diseñado para el entorno industrial, con el objetivo de reemplazar los bancos de relevadores electromagnéticos. Mediante un monitoreo continuo de los estados de los elementos de entrada, el PLC toma decisiones basadas en código programado para controlar el estado de los elementos de salida [21].

Los PLC fueron diseñados para ser sistemas que trabajen en condiciones adversas en el área industrial, ya que deben operar correctamente en ambientes con altas temperaturas, humedad, suciedad y vibraciones.

Como se mencionó anteriormente, el PLC utilizado para el control de la CMF es el S7-1200 de la marca SIEMENS, el cuál está conformado por las siguientes partes principales (figura 3.2):

1. Conexiones de corriente ( $L+$ ,  $N$ ,  $Tierrafísica$ ).
2. Entradas ( $I$ ) discretas.
3. Conector PROFINET (en el lado inferior del CPU).
4. Salidas ( $Q$ ) discretas de réle.
5. LED's de estado para las entradas discretas.
6. LED's de estado para las salidas discretas.

Para mayor información técnica sobre el PLC S7-1200 consultar [22].

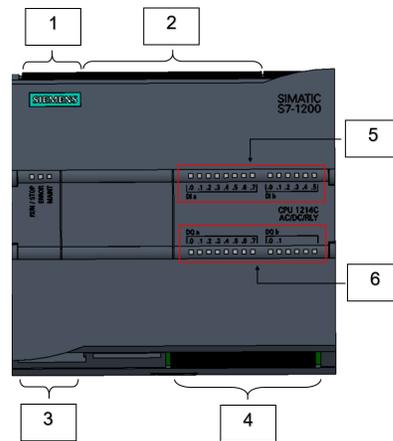


Figura 3.2: Partes principales del PLC S7-1200.

Para finalizar la presente sección, se muestra el gabinete de control elaborado, con su respectivo sistema de control PLC incorporado (figura 3.3), así mismo, en el apéndice A se presenta su diagrama eléctrico. Cabe resaltar que actualmente la mayoría de las líneas de producción y máquinas industriales incluyen como sistema de control un PLC.



Figura 3.3: Gabinete de control.

### 3.2. Módulo del centro neumático

El centro neumático, figura 3.4, cuenta con su propio compresor neumático encargado de alimentar con aire a las electroválvulas, la cuales controlan los pistones. Así mismo, cuenta con una mesa giratoria, una banda transportadora, tres electroválvulas, dos sensores de presencia ( $s_{A_i}$  y  $s_5$ ) y tres sensores de contacto ( $s_{M_g}$ ,  $s_{Pr.1}$  y  $s_{Pi.2}$ ). La pieza de trabajo se introduce manualmente en la canastilla (Almacén), el sensor  $s_{A_i}$  se encarga de su detección y es trasladado a una mesa giratoria ( $Mg$ ), si esta se encuentra en posición de carga, es decir, el sensor  $s_{M_g}$  se encuentra activado, esto se realiza mediante la primer electroválvula que acciona al primer pistón ( $Pi.1$ ). Con la pieza en la mesa giratoria, se realiza un traslado de  $90^\circ$  hacia la operación de troquelado ( $Pr.1$ ), accionado por el sensor  $s_{Pr.1}$  y llevado a cabo por la segunda electroválvula. Al término de este proceso, la pieza se traslada otros  $90^\circ$  para ser expulsada hacia la banda transportadora mediante un pistón ( $Pi.2$ ) accionado por el sensor  $s_{Pi.2}$ . Finalmente, terminando el recorrido se encuentra el sensor  $s_{BSCN}$  que accionará al siguiente modulo (centro de maquinados).

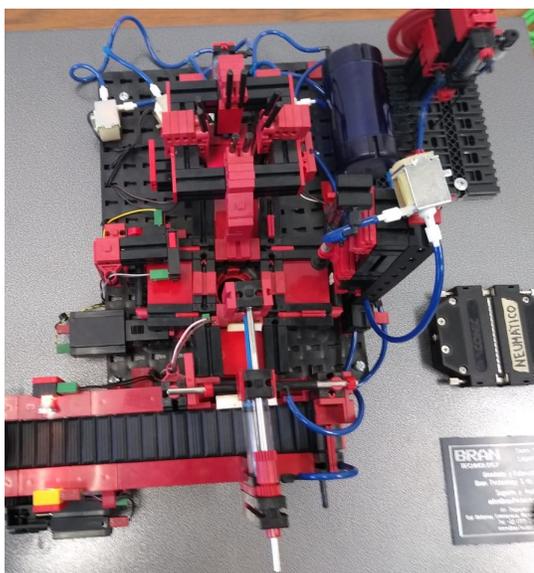


Figura 3.4: Centro neumático.

### 3.3. Módulo del centro de maquinados

El módulo del centro de maquinado, figura 3.5, simula una estación de manufactura, en la cual, se cuenta con cuatro bandas transportadoras, dos empujadores y dos máquinas, las cuales simulan un torno ( $T_r$ ) y una fresadora ( $F_r$ ). La pieza de trabajo se introduce a este módulo a través de una banda transportadora ( $B_E$ ), la cual cuenta con dos sensores ópticos, uno de entrada ( $s_{BEe}$ ) y otro de salida ( $s_{BEs}$ ); por medio de un mecanismo de empuje ( $Emp.1$ ) la pieza es enviada hacia la entrada de la siguiente

banda transportadora ( $B_{T_r}$ ) y con ello llegar a la primera área de trabajo (Torno  $T_r$ ), y comenzar la operación de torneado, para llevar acabo dicha tarea, se necesita un posicionamiento correcto de la pieza de trabajo, lo cual se logra con el sensor  $s_{T_r}$ . Terminado el maquinado anterior, mediante dos bandas transportadoras ( $B_{T_r}$  y la banda de la fresadora  $B_{F_r}$ ), se envía la pieza a la máquina de fresado ( $F_r$ ), que de manera similar un sensor óptico  $s_{F_r}$  posiciona dicha pieza, para realizar el proceso de fresado. Finalmente, despues de realizar el maquinado correspondiente, la banda transportadora ( $B_{F_r}$ ) lleva la pieza hasta la banda de salida ( $B_S$ ) por medio de un segundo mecanismo de empuje ( $Emp.2$ ), cambiando de dirección  $90^\circ$  para detener la pieza maquinada por medio del ultimo sensor óptico  $S_{B_S}$ , y con ello salir del centro de maquinados.

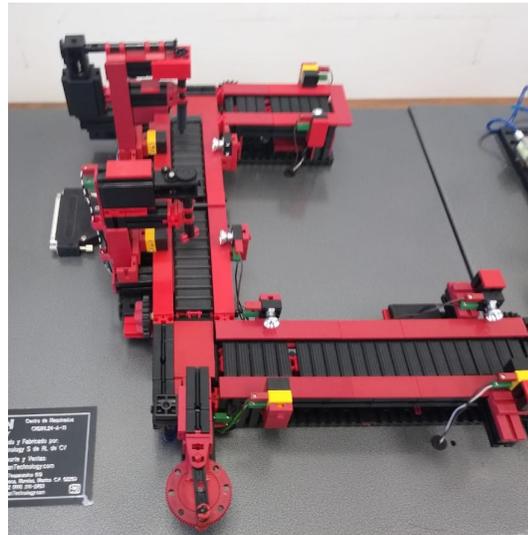


Figura 3.5: Centro de maquinados.

### 3.4. Módulo del robot de 3 GDL

El robot de 3 GDL, figura 3.6, se encarga de transportar las piezas de trabajo hacia otras operaciones subsecuentes de la CMF y finalmente, llevarla a almacén. El primer grado de libertad ( $1^\circ$ ) permite tener una rotación de  $340^\circ$ . El segundo grado de libertad ( $2^\circ$ ) permite un desplazamiento vertical de 120 mm. El tercer grado de libertad ( $3^\circ$ ) permite que el gripper tenga un alcance de 125 mm. El gripper sujeta y libera las piezas de trabajo, en alguna de las estaciones de trabajo.

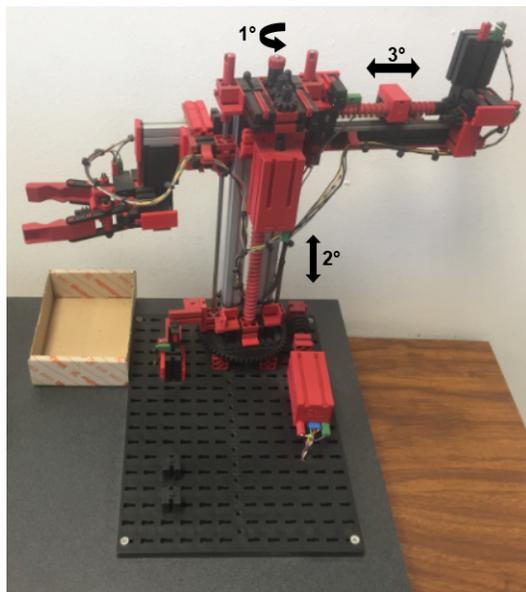


Figura 3.6: Robot de 3 GDL.

### 3.5. Módulo del centro de prensado

El módulo del centro de prensado, figura 3.7, cuenta con una banda transportadora ( $B_{E/S}$ ) y un pistón neumático ( $Pr.2$ ), que simula la máquina de prensado; los cuales inician detenidos. Así mismo, cuenta con dos sensores de presencia ( $s_{E/S}$  y  $s_{Pr.2}$ ). El ciclo de trabajo comienza cuando la pieza de trabajo es colocada en la banda transportadora y el  $s_{E/S}$  es activado. Cuando  $s_{Pr.2}$  es activado, la pieza se encuentra posicionada en la máquina de prensado. Al término del prensado, la banda transportadora es activada nuevamente y envía la pieza a su lugar inicial, en espera de ser retirada.



Figura 3.7: Centro de prensado.

Los elementos de los módulos antes mencionados se encuentran cableados hacia una terminal DB37 macho por módulo. Esta disposición permite conectarlos hacia el gabinete de control (figura 3.3).



## Capítulo 4

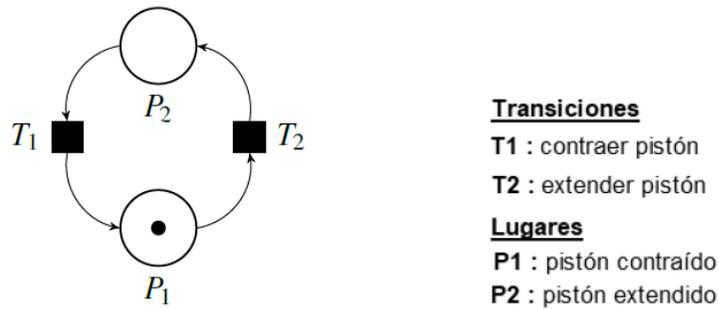
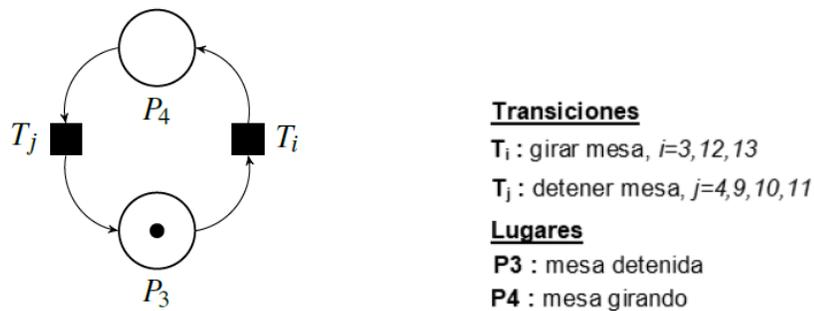
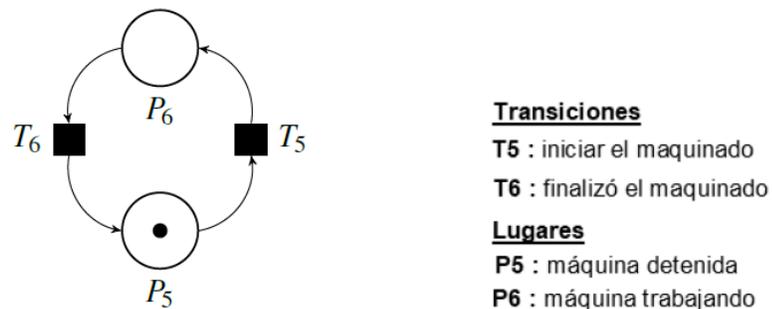
# Modelado de la Celda de Manufactura Flexible

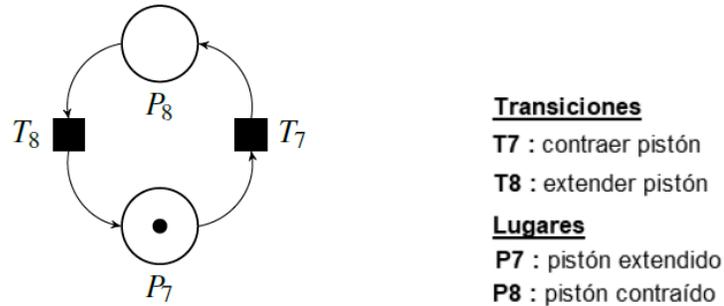
En este capítulo se presenta el modelado del prototipo de celda de manufactura flexible (CMF) mediante redes de Petri (PN). Se muestran los modelos de los subsistemas que conforman a cada uno de los módulos de la CMF. Mediante restricciones de secuencia y de marcados se lleva a cabo la unión de los subsistemas que componen a los módulos del centro neumático, maquinados, prensado y el robot de 3 GDL. El modelo obtenido permite una representación simple del comportamiento de cada uno de los módulos. En los gráficos de las redes de Petri, se establece que las **transiciones del sistema y las transiciones de los sensores** se representan con barras negras y blancas, respectivamente. Vale la pena mencionar que estos módulos fueron previamente trabajados en [19] y [20] mediante autómatas de estados finitos.

### 4.1. Centro neumático

El módulo del centro neumático cuenta con seis subsistemas: compresor, pistón No.1 (figura 4.1), mesa giratoria (figura 4.2), prensa No.1 (figura 4.3), pistón No.2 (figura 4.4) y banda de salida. De los cuales, el compresor y la banda de salida no se modelaron ya que estos siempre estarán activos en todo el proceso. Las redes de Petri de los subsistemas modelados se presentan a continuación.

#### 4.1.1. Modelo del pistón No.1 (*Pi.1*)

Figura 4.1: Red de Petri del pistón No.1 ( $Pi.1$ ).4.1.2. Modelo de la mesa giratoria ( $Mg$ )Figura 4.2: Red de Petri de la mesa giratoria ( $Mg$ ).4.1.3. Modelo de la prensa No.1 ( $Pr.1$ )Figura 4.3: Red de Petri de la prensa No.1 ( $Pr.1$ ).

4.1.4. Modelo del pistón No.2 (*Pi.2*)Figura 4.4: Red de Petri del pistón No.2 (*Pi.2*).

## 4.1.5. Modelo del centro neumático

Para obtener el modelo del centro neumático ( $G_1$ ) deben unirse los modelos de los subsistemas mostrados anteriormente, una forma de realizarlo es considerar algunas restricciones de secuencia que correspondan al funcionamiento general de este centro, las cuales se muestran en la **tabla 4.1**.

N°	Restricción
1	El pistón No.1 ( <i>Pi.1</i> ) se extiende, cuando exista pieza en el almacén de entrada ( $s_{A_i}$ activado) y la mesa giratoria ( <i>Mg</i> ) este en posición de carga ( $s_{M_g}$ activado). Así mismo, el pistón no se vuelve a extender hasta que la mesa gire $90^\circ$ .
2	La mesa giratoria ( <i>Mg</i> ) se activa, sí la transición $T_1$ que contrae a <i>Pi.1</i> es disparada. Además, existe prioridad en la activación de <i>Pi.1</i> sobre <i>Mg</i> , al iniciar el proceso. Por otra parte, <i>Mg</i> se detiene si $s_{A_i}$ y $s_{M_g}$ se encuentran activos y <i>Mg</i> se encuentre en la siguiente posición de carga o $s_{Pr.1}$ esta activo o $s_{Pi.2}$ esta activo y existe pieza en mesa o no existan piezas en <i>Mg</i> .
3	La prensa No.1 ( <i>Pr.1</i> ) se activa, sí la transición $T_{10}$ que detiene a <i>Mg</i> es disparada. Así mismo, <i>Pr.1</i> se activa una vez por cada pieza. Además, existe prioridad en la activación de <i>Mg</i> sobre <i>Pr.1</i> , al iniciar el proceso.
4	El pistón No.2 ( <i>Pi.2</i> ) se contrae, sí la transición $T_{11}$ que detiene a <i>Mg</i> es disparada. Así mismo, al contraerse <i>Pi.2</i> se extrae una pieza de <i>Mg</i> . Además existe prioridad en la activación de <i>Mg</i> sobre <i>Pi.2</i> , al iniciar el proceso.

Tabla 4.1: Restricciones de funcionamiento del centro neumático.

Considerando las cuatro restricciones mostradas en la tabla 4.1 se consigue un modelo que representa un comportamiento simple del funcionamiento del centro neumático (figura 4.5). Así mismo, debe aclararse que el modelo mostrado expresa marcados no deseados, los cuales deben ser deshabilitados por el **supervisor**, considerando las especificaciones de seguridad.



$$C_{G_1}^+ = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

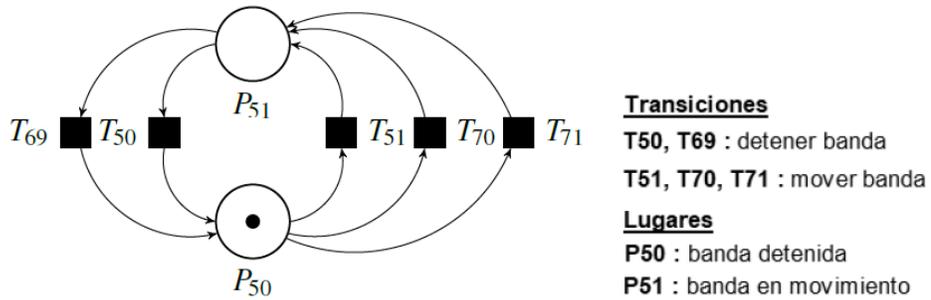
Por lo tanto,

$$C_{G_1} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

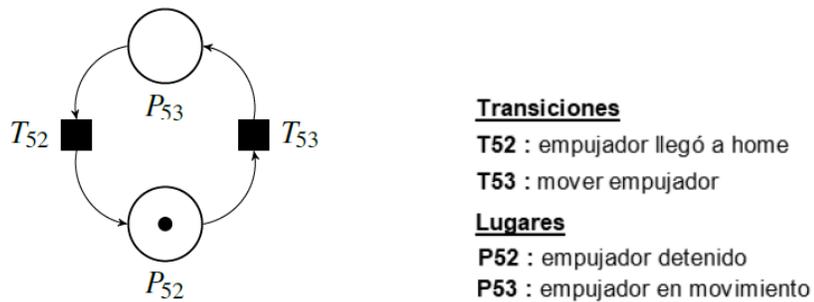
## 4.2. Centro de Maquinados

El módulo del centro de maquinados se conforma por ocho subsistemas: banda de entrada (figura 4.6), empujador No.1 (figura 4.7), banda del torno (figura 4.8), torno (figura 4.9), banda de la fresadora (figura 4.10), fresadora (figura 4.11), empujador No.2 (figura 4.12) y banda de salida (figura 4.13). Las redes de Petri de los subsistemas modelados se presentan a continuación.

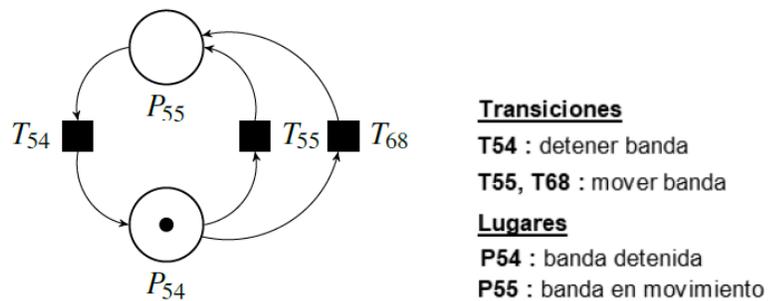
### 4.2.1. Modelo de la banda de entrada ( $B_E$ )

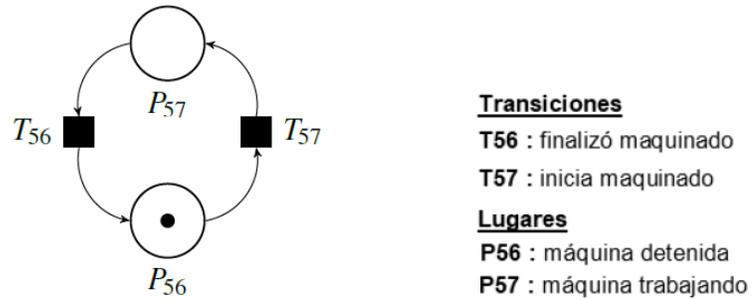
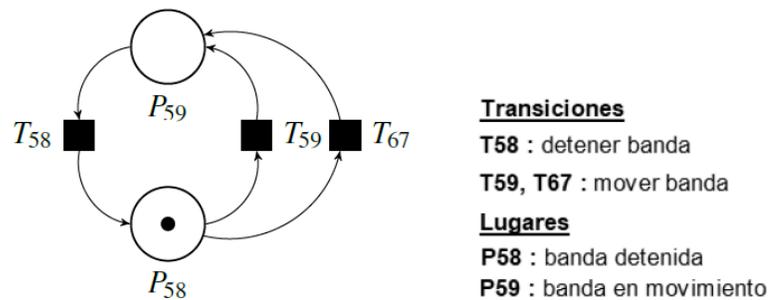
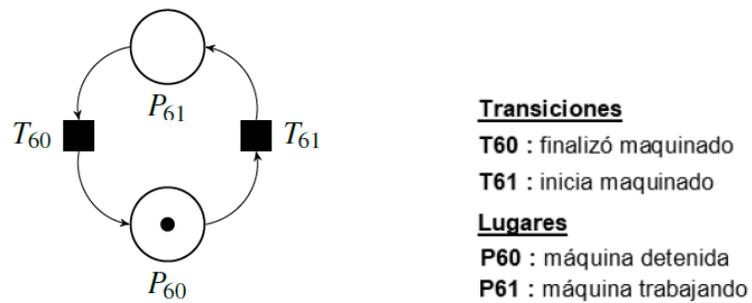
Figura 4.6: Red de Petri de la banda de entrada ( $B_E$ ).

#### 4.2.2. Modelo del empujador No.1 ( $Emp.1$ )

Figura 4.7: Red de Petri del empujador No.1 ( $Emp.1$ ).

#### 4.2.3. Modelo de la banda del torno ( $B_{Tr}$ )

Figura 4.8: Red de Petri de la banda del torno ( $B_{Tr}$ ).

4.2.4. Modelo del torno ( $T_r$ )Figura 4.9: Red de Petri del torno ( $T_r$ ).4.2.5. Modelo de la banda de la fresadora ( $B_{Fr}$ )Figura 4.10: Red de Petri de la banda de la fresadora ( $B_{Fr}$ ).4.2.6. Modelo de la fresadora ( $F_r$ )Figura 4.11: Red de Petri de la fresadora ( $F_r$ ).

#### 4.2.7. Modelo del empujador No.2 ( $Emp.2$ )

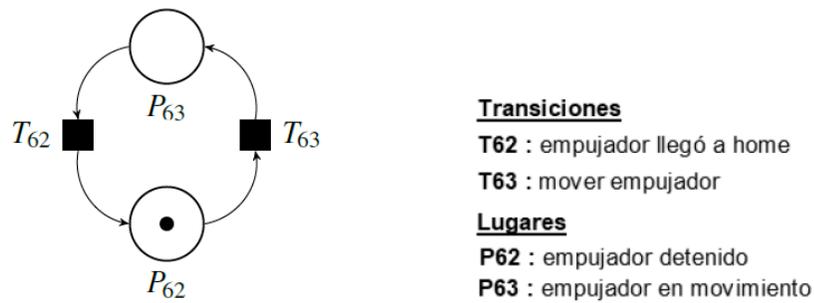


Figura 4.12: Red de Petri del empujador No.2 ( $Emp.2$ ).

#### 4.2.8. Modelo de la banda de salida ( $B_S$ )

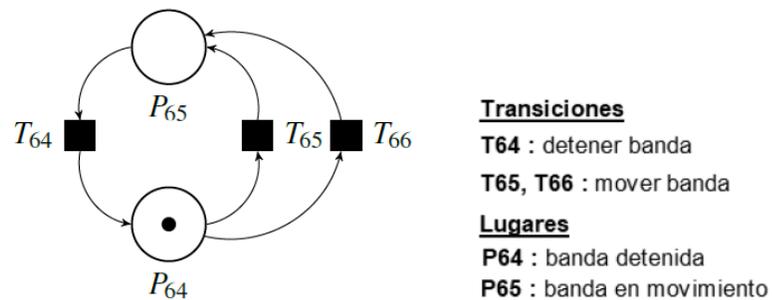


Figura 4.13: Red de Petri de la banda de salida ( $B_S$ ).

#### 4.2.9. Modelo del centro de maquinados

Para obtener el modelo del centro de maquinados ( $G_2$ ) deben unirse los modelos de los subsistemas mostrados anteriormente, una forma de realizarlo es considerar algunas restricciones de secuencia y de marcados que correspondan al funcionamiento general de este centro, las cuales se muestran en la **tabla 4.2**.

N°	Restricción
1	Todas las bandas transportadoras ( $B_E$ , $B_{Tr}$ , $B_{Fr}$ y $B_S$ ) de este módulo se activan inicialmente por medio del sensor de salida del centro neumático ( $s_{BSCN}$ ), disparo de las transiciones $T_{51}$ , $T_{55}$ , $T_{59}$ y $T_{65}$ .
2	La banda de salida ( $B_S$ ) se detiene cuando el sensor $s_{B_s}$ detecta una pieza (disparo de $T_{64}$ ) y $B_S$ continua su movimiento cuando se retira la pieza (disparo de $T_{66}$ ).
3	El empujador No.2 ( $Emp.2$ ) se activa (disparo de $T_{63}$ ) cuando la banda de la fresadora ( $B_{Fr}$ ) expulsa una pieza. Por otra parte, $Emp.2$ se detiene cuando regresa a su posición de home, sensor $s_{Emp.2}$ activado (disparo de $T_{62}$ ).
4	$B_{Fr}$ se detiene (disparo de $T_{58}$ ) cuando la banda del torno ( $B_{Tr}$ ) expulsa una pieza y el sensor $s_{Fr}$ la detecta, permitiendo la activación de la máquina fresadora, disparo de $T_{61}$ ; el disparo de esta transición admite la reanudación del movimiento de $B_{Fr}$ (disparo de $T_{67}$ ). Por otro lado, $Fr$ se detiene después de terminar el maquinado de la pieza (disparo de $T_{60}$ ).
5	$B_{Tr}$ se detiene (disparo de $T_{54}$ ) cuando el empujador No.1 ( $Emp.1$ ) expulsa una pieza y el sensor $s_{Tr}$ la detecta, permitiendo la activación de la máquina de torneado, disparo de $T_{57}$ ; el disparo de esta transición admite la reanudación del movimiento de $B_{Tr}$ (disparo de $T_{68}$ ) siempre y cuando $B_{Fr}$ no tenga una pieza almacenada ( $P_{67} < 1$ marca). Por otra parte, $Tr$ se detiene después de terminar el maquinado de la pieza (disparo de $T_{56}$ ).
6	La banda de entrada ( $B_E$ ) se detiene (disparo de $T_{50}$ ) cuando, $s_{BEs/time}$ , es activado y $Emp.1$ ha enviado menos de cuatro piezas a los subsistemas siguientes ( $P_{81} < 4$ ), permitiendo la activación de $Emp.1$ (disparo de $T_{53}$ ); $s_{BEs/time}$ se activa cuando el sensor de salida de $B_E$ ( $s_{BEs}$ ) es activado y la pieza de entrada se encuentra en la posición del $Emp.1$ . Ahora bien, el disparo de la transición $T_{53}$ admite la reanudación del movimiento de $B_E$ (disparo de $T_{70}$ ). Por otra parte, $B_E$ se detiene (disparo de $T_{69}$ ) cuando su sensor de entrada, $s_{BEe}$ , es activado y $Emp.1$ ha enviado cuatro piezas a los subsistemas subsecuentes ( $P_{81} = 4$ ). $B_E$ reanuda su movimiento (disparo de $T_{71}$ ) cuando $B_S$ no tenga pieza almacenada y la transición $T_{69}$ sea disparada previamente.
7	$Emp.1$ se activa (disparo de $T_{53}$ ) cuando $B_E$ expulsa una pieza. Por otra parte, $Emp.1$ se detiene cuando regresa a su posición de home, sensor $s_{Emp.1}$ activado (disparo de $T_{52}$ ).

Tabla 4.2: Restricciones de secuencia y marcado del centro de maquinados.

Considerando las siete restricciones mostradas en la tabla 4.2 se consigue un modelo que representa un comportamiento simple del funcionamiento del centro de maquinados (figura 4.14). Así mismo, debe aclararse que el modelo mostrado expresa marcados no deseados, los cuales deben ser deshabilitados por el **supervisor**, considerando las especificaciones de seguridad.

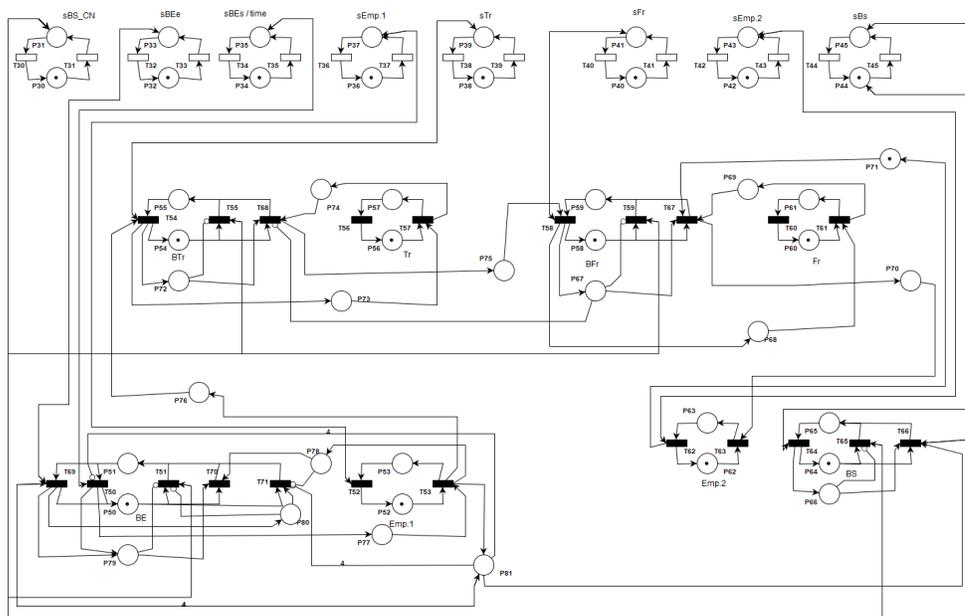


Figura 4.14: Red de Petri del centro de maquinados ( $G_2$ ).

La red de Petri cuenta con la matriz de incidencia  $C_{G_2}$ , la cuál no considera las transiciones y lugares de los sensores. Dicha matriz es de dimensión  $22 \times 32$ , debido a su tamaño no se presenta. Por otra parte, su vector de marcado inicial  $x_{0_{G_2}}$  se muestra a continuación.

$$x_{0_{G_2}} = [ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 ]$$

### 4.3. Robot de 3 GDL

Para llevar acabo el modelado de este módulo, se consideró que el robot cuenta con cinco tareas bien establecidas y un gripper (figura 4.15). Las tareas tienen el objetivo de reducir el numero de lugares obtenidos si se modelara por medio de las posibles trayectorias de desplazamiento conseguidas por el robot. Las cinco tareas definidas para ser realizadas por el robot se enlistan a continuación.

- Tarea 1: Ir a home (figura 4.16).
- Tarea 2: Ir de home a salida del centro de maquinados (figura 4.17).
- Tarea 3: Ir de salida de centro de maquinados a salida del centro de prensado (figura 4.18).
- Tarea 4: Ir de salida del centro de prensado a almacén final (figura 4.19).
- Tarea 5: Ir de almacén final a salida de centro de maquinados (figura 4.20).

A continuación se presentan los grafos de redes de Petri de las tareas y el gripper.

#### 4.3.1. Modelo del gripper ( $G_r$ )

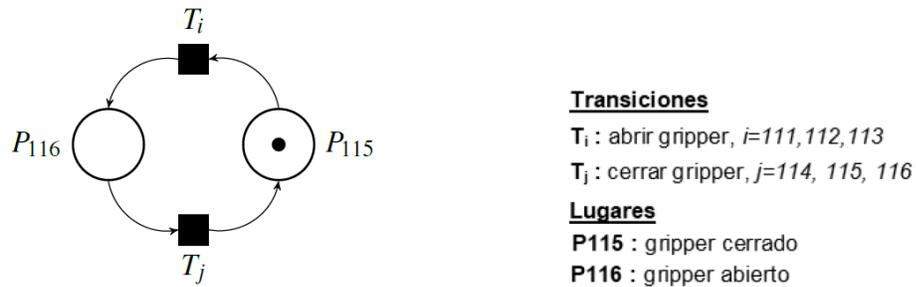


Figura 4.15: Red de Petri del gripper ( $G_r$ ).

#### 4.3.2. Modelo de la tarea 1 ( $Ta_1$ )

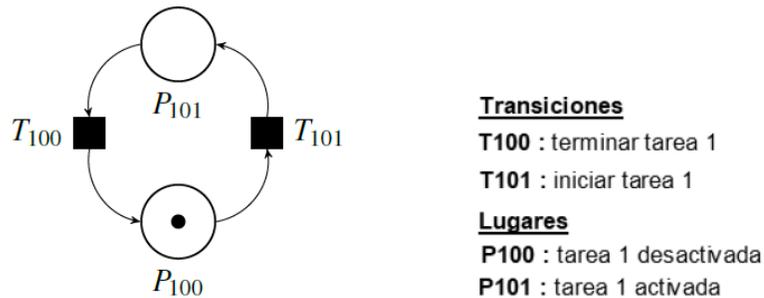


Figura 4.16: Red de Petri de la tarea 1 ( $Ta_1$ ).

#### 4.3.3. Modelo de la tarea 2 ( $Ta_2$ )

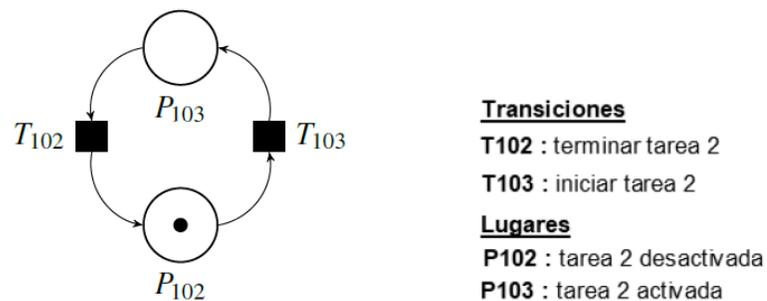
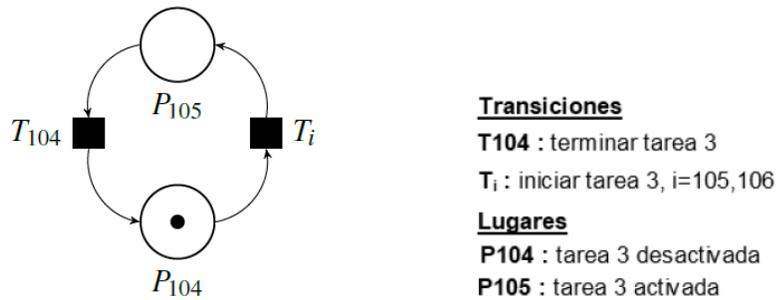
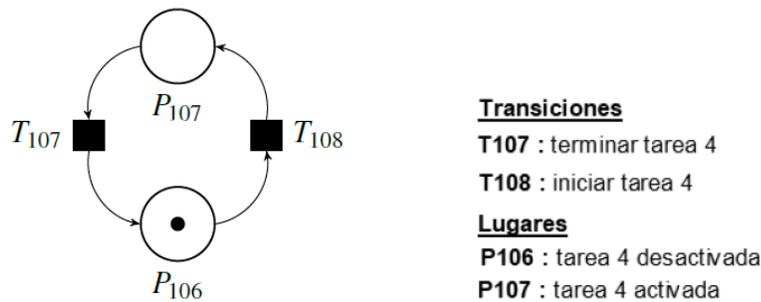
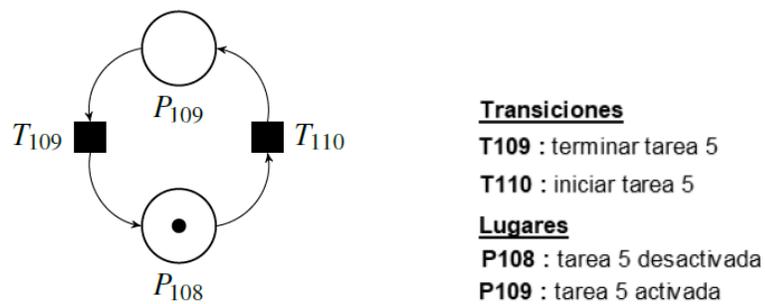


Figura 4.17: Red de Petri de la tarea 2 ( $Ta_2$ ).

4.3.4. Modelo de la tarea 3 ( $Ta_3$ )Figura 4.18: Red de Petri de la tarea 3 ( $Ta_3$ ).4.3.5. Modelo de la tarea 4 ( $Ta_4$ )Figura 4.19: Red de Petri de la tarea 4 ( $Ta_4$ ).4.3.6. Modelo de la tarea 5 ( $Ta_5$ )Figura 4.20: Red de Petri de la tarea 5 ( $Ta_5$ ).

### 4.3.7. Modelo del robot de 3 GDL

Para obtener el modelo del robot de 3 GDL ( $G_3$ ) deben unirse los modelos de las tareas y el gripper mostrados anteriormente, una forma de realizarlo es considerar algunas restricciones de secuencia que correspondan al funcionamiento general de este módulo, las cuales se muestran en la **tabla 4.3**.

N°	Restricción de secuencia
1	Al iniciar la tarea 1 (disparo de $T_{101}$ ) el gripper comienza a abrirse (disparo de $T_{111}$ ); al dispararse la transición $T_{100}$ se envía una marca para que posteriormente $T_{103}$ pueda ser disparada.
2	Al dispararse la transición $T_{103}$ se envía una marca para que posteriormente pueda iniciar la tarea 3 (disparo de $T_{105}$ ), donde el gripper debe estar cerrado; así mismo, el disparo de la transición $T_{102}$ envía una marca para que el gripper comience a cerrarse (disparo de $T_{114}$ ).
3	La tarea 1 y 2 sólo se llevan acabo una vez, al iniciar el proceso.
4	La transición $T_{106}$ recibe marca de $T_{110}$ y su disparo depende de que el gripper este cerrado; por otra parte, al dispararse la transición $T_{104}$ se envía una marca para que posteriormente el gripper comience a abrirse (disparo de $T_{112}$ ) y envía una marca para activar $T_{108}$ , la cuál también depende de que el gripper este cerrado.
5	Al dispararse la transición $T_{107}$ se envía una marca para que el gripper comience a abrirse (disparo de $T_{113}$ ) y envía una marca para que $T_{110}$ pueda ser disparado, la cuál también depende de que el gripper este abierto.
6	Al dispararse la transición $T_{110}$ se envía una marca para que $T_{106}$ pueda ser disparado. Por otra parte, el disparo de $T_{109}$ envía una marca para que el gripper comience a cerrarse (disparo de $T_{116}$ ).

Tabla 4.3: Restricciones de secuencia del robot de 3 GDL.

Considerando las seis restricciones mostradas en la tabla 4.3 se consigue un modelo que representa un comportamiento simple del funcionamiento del robot de 3 GDL (figura 4.21). Así mismo, debe aclararse que el modelo mostrado expresa marcados no deseados, los cuales deben ser deshabilitados por el **supervisor**, considerando las especificaciones de seguridad.

Dicha red de Petri cuenta con el siguiente marcado inicial  $x_{0_{G_3}}$  y su respectiva matriz de incidencia  $C_{G_3}$  de dimensión  $17 \times 27$ .

$$x_{0_{G_3}} = [ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 ]$$

$$C_{G_3} = C_{G_3}^+ - C_{G_3}^- =$$



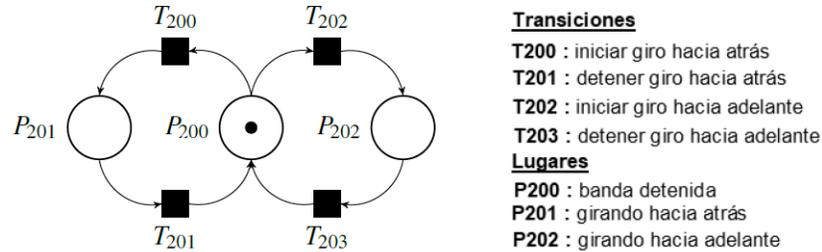


Figura 4.22: Red de Petri de la banda transportadora ( $B_{E/S}$ ).

#### 4.4.2. Modelo de la máquina de prensado No.2 ( $Pr.2$ )

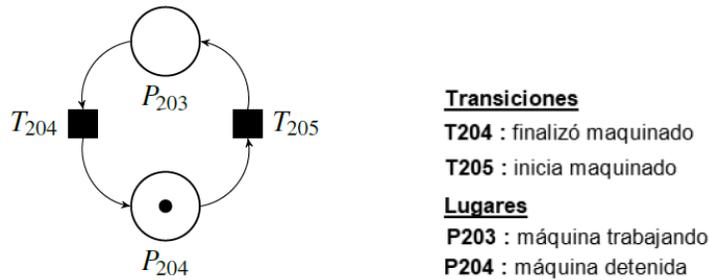


Figura 4.23: Red de Petri de la máquina de prensado No.2 ( $Pr.2$ ).

#### 4.4.3. Modelo del centro de prensado

Para obtener el modelo del centro de prensado ( $G_4$ ) deben unirse los modelos de los subsistemas mostrados anteriormente, una forma de realizarlo es considerar algunas restricciones de secuencia que correspondan al funcionamiento general de este centro, las cuales se muestran en la **tabla 4.4**.

N°	Restricción de secuencia
1	La transición $T_{202}$ es la primera en dispararse, permitiendo que la banda transportadora ( $B_{E/S}$ ) gire hacia adelante mediante la llegada de la pieza de trabajo por medio del robot de 3 GDL ( $Ta_3$ y $Gr(A)$ ); al dispararse $T_{202}$ se envía una marca para que posteriormente $T_{205}$ pueda ser disparada.
2	Al dispararse $T_{205}$ se envía una marca para que posteriormente $T_{200}$ pueda ser disparada.
3	La transición $T_{203}$ se dispara mediante la activación del sensor $s_{Pr.2}$ . Así mismo, $T_{201}$ puede dispararse mediante la activación del sensor $s_{E/S}$ ; al dispararse $T_{201}$ se envía una marca para que posteriormente $T_{202}$ pueda ser disparada.

Tabla 4.4: Restricciones de secuencia del centro de prensado.

Considerando las tres restricciones mostradas en la tabla 4.4 se consigue un modelo que representa un comportamiento simple del funcionamiento del centro de prensado (figura 4.24). Así mismo, debe aclararse que el modelo mostrado expresa marcados no deseados, los cuales deben ser deshabilitados por el **supervisor**, considerando las especificaciones de seguridad.

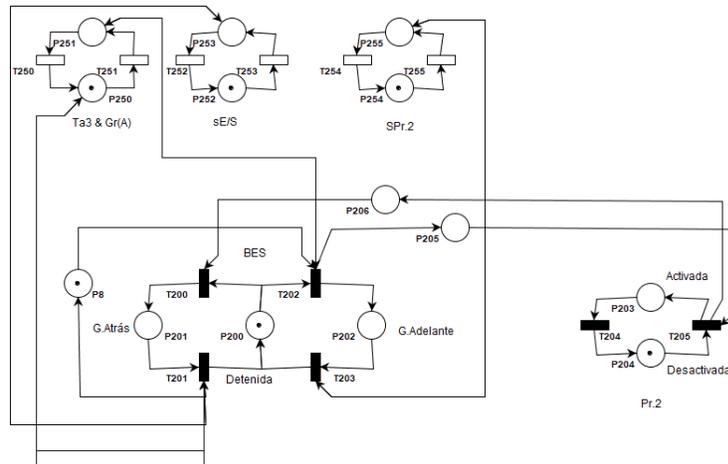


Figura 4.24: Red de Petri del centro de prensado ( $G_4$ ).

La red de Petri cuenta con la siguiente matriz de incidencia  $C_{G_4}$ , la cuál no considera las transiciones y lugares de los sensores.

$$C_{G_4} = C_{G_4}^+ - C_{G_4}^-$$

Donde,  $C_{G_4}$  es de dimensión  $6 \times 8$ .

$$C_{G_4} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

## Capítulo 5

# Control Supervisor de la Celda de Manufactura Flexible

En este capítulo se muestra el diseño de los supervisores, también conocidos en PN como lugares de control, su objetivo es restringir el comportamiento de los módulos de la celda de manufactura flexible de manera que cumpla con ciertas condiciones, con la finalidad de mantener la integridad de sus componentes, esto se consigue por medio de las especificaciones de seguridad. El enfoque del supervisor puede ser vista en términos del estado, por lo tanto, el mecanismo de control es decidir cual de las transiciones habilitadas en la planta debe permitir que el controlador se active [5]. Por ende, las especificaciones sobre el sistema no controlado se establece en términos de estados prohibidos. Por lo tanto, el controlador debe garantizar que no se alcance ninguno de los estados prohibidos.

### 5.1. Supervisor del centro neumático

En esta sección se definen las especificaciones de seguridad que restringen el comportamiento del centro neumático, las cuales son representadas por medio de desigualdades lineales. Posteriormente, se obtendrá el marcado inicial de los lugares de control que cumplen con las especificaciones, además de sus respectivos arcos de entrada y salida. Finalmente, se modela la planta supervisada empleando el modelo de la planta, los lugares de control y sus arcos de entrada y salida.

#### 5.1.1. Definición de las especificaciones

Las especificaciones de seguridad definidas para el centro neumático son las siguientes:

- **Especificación No.1.** (1E1) La mesa giratoria ( $Mg$ ) no se activa mientras el pistón No.1 ( $Pi.1$ ) este extendido.
- **Especificación No.2.** (1E2) La prensa No.1 ( $Pr.1$ ) no se activa cuando la mesa giratoria ( $Mg$ ) este activa.
- **Especificación No.3.** (1E3) El pistón No.2 ( $Pi.2$ ) no se contrae mientras la mesa giratoria ( $Mg$ ) este activada.

### 5.1.2. Representación de las especificaciones en desigualdades lineales

Las especificaciones definidas anteriormente, pueden ser representadas por medio de desigualdades lineales, considerando los lugares implicados en la red de Petri  $G_1$ , las cuales se muestran a continuación.

**Especificación 1E1    Especificación 1E2    Especificación 1E3**

$$x(P_2) + x(P_4) \leq 1 \quad x(P_4) + x(P_6) \leq 1 \quad x(P_4) + x(P_8) \leq 1$$

### 5.1.3. Marcado inicial de los lugares de control $P_{ci}$ para la red de Petri $G_1$

A continuación se presenta la obtención del marcado inicial de los lugares de control  $P_{ci} \quad \forall \quad i = 1, \dots, k$ , donde  $k$  es la ultima especificación.

- *Marcado inicial de  $P_{c1E1}$*

El numero inicial de marcas en  $P_{c1E1}$  se determina aumentando la desigualdad lineal de **1E1** a una ecuación lineal con  $P_{c1E1}$  como nueva variable, como se menciono en (2.5).

$$x(P_2) + x(P_4) + x(P_{c1E1}) = 1 \tag{5.1}$$

Por lo tanto, observando cuidadosamente la red de Petri  $G_1$  puede notarse que  $P_2$  y  $P_4$  no cuentan con marcado inicial, en otras palabras, el pistón No.1 ( $Pi.1$ ) y la mesa giratoria ( $Mg$ ) inician contraído y detenida, respectivamente, por ende, para satisfacer la ecuación (5.1),  $P_{c1E1}$  debe contener una marca inicial, es decir,  $x(P_{c1E1}) = 1$ .

- *Marcado inicial de  $P_{c1E2}$*

De manera similar que en el caso anterior, la desigualdad de **1E2** se transforma a la siguiente ecuación lineal.

$$x(P_4) + x(P_6) + x(P_{c1E2}) = 1 \tag{5.2}$$

Como  $P_4$  y  $P_6$  no cuentan con marcado inicial, es decir, la mesa ( $Mg$ ) y la prensa No.1 ( $Pr.1$ ) comienzan detenidos, por lo tanto  $x(P_{C_{1E2}}) = 1$ , de tal manera que se satisface la ecuación (5.2).

■ *Marcado inicial de  $P_{C_{1E3}}$*

La desigualdad de **1E3** se transforma a la siguiente ecuación lineal.

$$x(P_4) + x(P_8) + x(P_{1E2}) = 1 \quad (5.3)$$

Donde,  $P_4$  y  $P_8$  no cuentan con marcado inicial, es decir, la mesa ( $Mg$ ) y el pistón No.2 ( $Pi.2$ ) comienzan detenida y extendido, respectivamente, por lo tanto  $x(P_{C_{1E3}}) = 1$ , de tal manera que se satisface la ecuación (5.3).

Por lo tanto, el marcado inicial de los lugares de control  $P_{C_{1E1}}$ ,  $P_{C_{1E2}}$  y  $P_{C_{1E3}}$ , se resume en la tabla 5.1.

Lugares de control	Marcado inicial
$P_{C_{1E1}}$	1
$P_{C_{1E2}}$	1
$P_{C_{1E3}}$	1

Tabla 5.1: Marcado inicial de los lugares de control del centro neumático.

#### 5.1.4. Conexiones de los lugares de control ( $P_{C_{1E1}}$ , $P_{C_{1E2}}$ , $P_{C_{1E3}}$ ) con la red de Petri $G_1$

Para obtener las conexiones de los lugares de control con las transiciones de la planta ( $G_1$ ), de tal manera que se satisfagan las desigualdades  $1E1$ ,  $1E2$  y  $1E3$  para todos los estados alcanzables, se utiliza la ecuación (2.7).

$$Cc_i = -C_{G_1}l_i \quad \forall \quad i = 1, \dots, k$$

Donde,  $l_i$  es un vector columna de dimensión  $n = |P|$  y  $Cc_i$  es un vector columna de dimensión  $m = |T|$ .

■ Arcos de entrada y salida del lugar  $P_{C_{1E1}}$

$$Cc_{1E1} = -C_{G_1}l_{1E1} \quad (5.4)$$

Donde,  $l_{1E1}$  representa los lugares que se encuentran en la restricción  $1E1$ , la cual se muestra a continuación

$$l_{1E1} = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación (5.4) se tiene

$$Cc_{1E1} = [0 \ 1 \ -1 \ -1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

Es decir, el lugar  $PC_{1E1}$  tiene arcos de entrada de  $T_1, T_4, T_9, T_{10}$  y  $T_{11}$ , además de arcos de salida de  $T_2, T_3, T_{12}$  y  $T_{13}$ .

- Arcos de entrada y salida del lugar  $PC_{1E2}$

$$CC_{1E2} = -C_{G1}l_{1E2} \quad (5.5)$$

Donde,  $l_{1E2}$  representa los lugares que se encuentran en la restricción  $1E2$ , la cual se muestra a continuación

$$l_{1E2} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación (5.5) se tiene

$$CC_{1E2} = [0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 1 \ -1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

Es decir, el lugar  $PC_{1E2}$  tiene arcos de entrada de  $T_4, T_6, T_9, T_{10}$  y  $T_{11}$ , además de arcos de salida de  $T_3, T_5, T_{12}$  y  $T_{13}$ .

- Arcos de entrada y salida del lugar  $PC_{1E3}$

$$CC_{1E3} = -C_{G1}l_{1E3} \quad (5.6)$$

Donde,  $l_{1E3}$  representa los lugares que se encuentran en la restricción  $1E3$ , la cual se muestra a continuación

$$l_{1E3} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación (5.6) se tiene

$$CC_{1E3} = [0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 1 \ 0 \ 0 \ -1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ -1 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

Es decir, el lugar  $PC_{1E3}$  tiene arcos de entrada de  $T_4, T_8, T_9, T_{10}$  y  $T_{11}$ , además de arcos de salida de  $T_3, T_7, T_{12}$  y  $T_{13}$ .

Los arcos de entrada y salida para los lugares de control  $PC_{1E1}$ ,  $PC_{1E2}$  y  $PC_{1E3}$  se resumen en la tabla 5.2.

Lugares de control	Arcos de entrada	Arcos de salida
$PC_{1E1}$	$T_1, T_4, T_9, T_{10}$ y $T_{11}$	$T_2, T_3, T_{12}$ y $T_{13}$
$PC_{1E2}$	$T_4, T_6, T_9, T_{10}$ y $T_{11}$	$T_3, T_5, T_{12}$ y $T_{13}$
$PC_{1E3}$	$T_4, T_8, T_9, T_{10}$ y $T_{11}$	$T_3, T_7, T_{12}$ y $T_{13}$

Tabla 5.2: Arcos de entrada y salida de los lugares de control.

### 5.1.5. Planta supervisada

A continuación se presenta la red de Petri de la planta supervisada,  $Sup(G_1)$ , la cual fue generada a partir del marcado inicial (Ver tabla 5.1) y las conexiones de los lugares de control ( $P_{c1E1}$ ,  $P_{c1E2}$  y  $P_{c1E3}$ ) con la planta ( $G_1$ ) (Ver tabla 5.2). Dicha red de Petri se muestra en la figura 5.1.

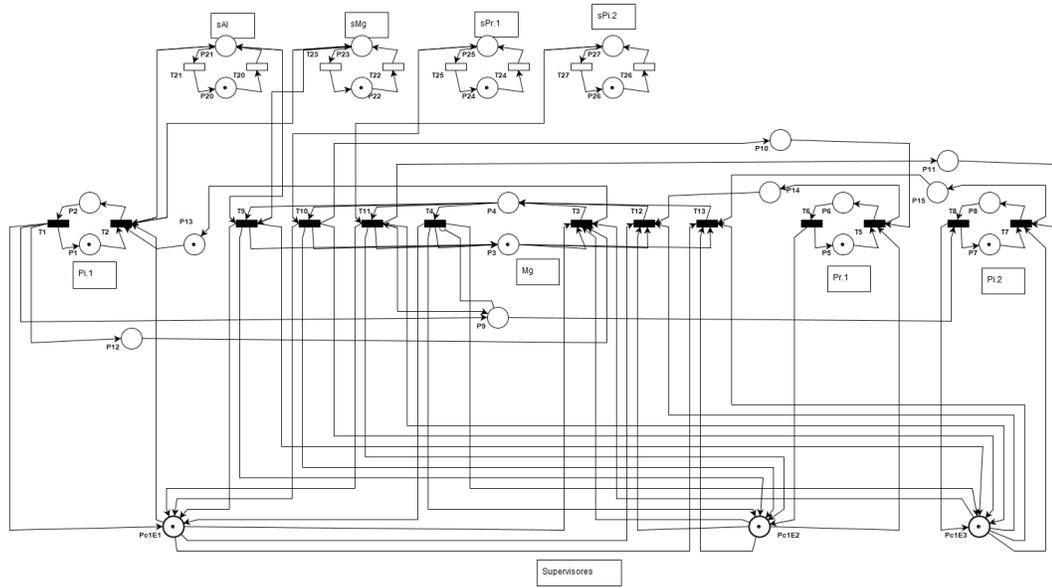


Figura 5.1: Red de Petri de la planta supervisada,  $Sup(G_1)$ .

## 5.2. Supervisor del centro de maquinados

En esta sección se definen las especificaciones de seguridad que restringen el comportamiento del centro de maquinados, las cuales son representadas por medio de desigualdades lineales. Posteriormente, se obtendrá el marcado inicial de los lugares de control que cumplen con las especificaciones, además de sus respectivos arcos de entrada y salida. Finalmente, se modela la planta supervisada empleando el modelo de la planta, los lugares de control y sus arcos de entrada y salida.

### 5.2.1. Definición de las especificaciones

Las especificaciones de seguridad definidas para el centro de maquinados son las siguientes:

- **Especificación No.1.** ( $2E1$ ) La banda de entrada ( $B_E$ ) no se activa mientras el empujador No.1 ( $Emp.1$ ) se encuentre en movimiento.

- **Especificación No.2.** (2E2) La banda del torno ( $B_{Tr}$ ) no se activa mientras el torno ( $T_r$ ) se encuentre trabajando.
- **Especificación No.3.** (2E3) El lugar  $P_{72}$  debe contener máximo una marca durante todo el proceso.
- **Especificación No.4.** (2E4) La banda del torno ( $B_{Tr}$ ) solo debe enviar una pieza a la vez a la siguiente estación.
- **Especificación No.5.** (2E5) El lugar  $P_{67}$  debe contener máximo una marca durante todo el proceso.
- **Especificación No.6.** (2E6) La banda de la fresadora ( $B_{Fr}$ ) no se activa mientras la fresadora ( $F_r$ ) se encuentre trabajando.
- **Especificación No.7.** (2E7) En la posición del empujador No.2 ( $Emp.2$ ) no debe de haber almacenada más de una pieza.
- **Especificación No.8.** (2E8) Sí la banda de salida ( $B_S$ ) cuenta con una pieza almacenada, el empujador No.2 ( $Emp.2$ ) no puede iniciar su movimiento.

### 5.2.2. Representación de las especificaciones en desigualdades lineales

Las especificaciones definidas anteriormente, pueden ser representadas por medio de desigualdades lineales, considerando los lugares implicados en la red de Petri  $G_2$ , las cuales se muestran a continuación.

**Especificación 2E1    Especificación 2E2    Especificación 2E3**

$$x(P_{51}) + x(P_{53}) \leq 1 \quad x(P_{55}) + x(P_{57}) \leq 1 \quad x(P_{72}) \leq 1$$

**Especificación 2E4    Especificación 2E5    Especificación 2E6**

$$x(P_{75}) \leq 1 \quad x(P_{67}) \leq 1 \quad x(P_{59}) + x(P_{61}) \leq 1$$

**Especificación 2E7    Especificación 2E8**

$$x(P_{70}) \leq 1 \quad x(P_{63}) + x(P_{66}) \leq 1$$

### 5.2.3. Marcado inicial de los lugares de control $P_{ci}$ para la red de Petri $G_2$

Para obtener el marcado inicial de los lugares de control de  $G_2$  se utiliza la ecuación (2.8), con pequeñas modificaciones,  $b$  ahora es un vector fila de dimensión  $k$  y  $l$  es una



Donde,  $C_{CG_2}$  es de dimensión  $m \times k$  ( $22 \times 8$ ) y la cuál se muestra a continuación

$$C_{CG_2} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Por lo tanto, los arcos de entrada y salida para los lugares de control  $PC_{2E1}$  a  $PC_{2E8}$  se resumen en la tabla 5.4.

Lugares de control	Arcos de entrada	Arcos de salida
$PC_{2E1}$	$T_{50}, T_{52}$ y $T_{69}$	$T_{51}, T_{53}, T_{70}$ y $T_{71}$
$PC_{2E2}$	$T_{54}$ y $T_{56}$	$T_{55}, T_{57}$ y $T_{68}$
$PC_{2E3}$	$T_{68}$	$T_{54}$
$PC_{2E4}$	$T_{58}$	$T_{68}$
$PC_{2E5}$	$T_{67}$	$T_{58}$
$PC_{2E6}$	$T_{58}$ y $T_{60}$	$T_{59}, T_{61}$ y $T_{67}$
$PC_{2E7}$	$T_{63}$	$T_{67}$
$PC_{2E8}$	$T_{62}$ y $T_{66}$	$T_{63}$ y $T_{64}$

Tabla 5.4: Arcos de entrada y salida de los lugares de control  $PC_{2E1}$  a  $PC_{2E8}$ .

### 5.2.5. Planta supervisada

A continuación se presenta la red de Petri de la planta supervisada,  $Sup(G_2)$ , la cual fue generada a partir del marcado inicial (Ver tabla 5.3) y las conexiones de los lugares de control ( $PC_{2E1}$ - $PC_{2E8}$ ) con la planta ( $G_2$ ) (Ver tabla 5.4). Dicha red de Petri se muestra en la figura 5.2.

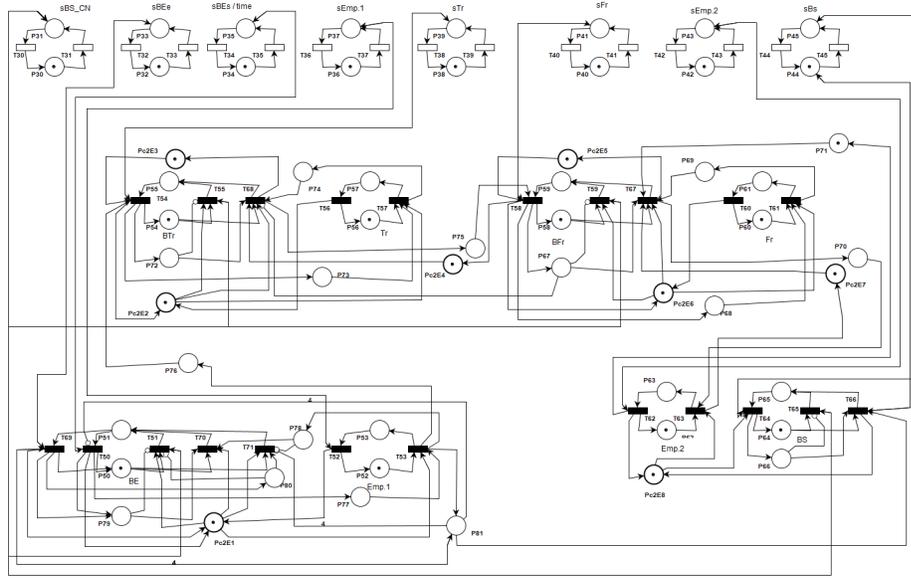


Figura 5.2: Red de Petri de la planta supervisada,  $Sup(G_2)$ .

### 5.3. Supervisor del robot de 3 GDL

En esta sección se definen las especificaciones de seguridad que restringen el comportamiento del robot de 3 GDL, las cuales son representadas por medio de desigualdades lineales. Posteriormente, se obtendrá el marcado inicial de los lugares de control que cumplen con las especificaciones, además de sus respectivos arcos de entrada y salida. Finalmente, se modela la planta supervisada empleando el modelo de la planta, los lugares de control y sus arcos de entrada y salida.

#### 5.3.1. Definición de las especificaciones

Las especificaciones de seguridad definidas para el robot de 3 GDL son las siguientes:

- **Especificación No.1.** (3E1) La tarea 1 ( $Ta_1$ ) no se activa mientras el lugar  $P_{114}$  tenga una marca.
- **Especificación No.2.** (3E2) La tarea 1 ( $Ta_1$ ) no se activa mientras el lugar  $P_{110}$  tenga una marca.
- **Especificación No.3.** (3E3) La tarea 2 ( $Ta_2$ ) no se activa mientras la tarea 3 ( $Ta_3$ ) se encuentre activa.
- **Especificación No.4.** (3E4) La tarea 1 ( $Ta_1$ ) no se activa mientras el lugar  $P_{111}$  tenga una marca.
- **Especificación No.5.** (3E5) La tarea 3 ( $Ta_3$ ) no se activa mientras la tarea 5 ( $Ta_5$ ) se encuentre activa.

- **Especificación No.6.** (3E6) La tarea 1 ( $Ta_1$ ) no se activa mientras la tarea 3 ( $Ta_3$ ) se encuentre activa.
- **Especificación No.7.** (3E7) La tarea 1 ( $Ta_1$ ) no se activa mientras el lugar  $P_{112}$  tenga una marca.
- **Especificación No.8.** (3E8) La tarea 1 ( $Ta_1$ ) no se activa mientras la tarea 4 ( $Ta_4$ ) se encuentre activa.
- **Especificación No.9.** (3E7) La tarea 1 ( $Ta_1$ ) no se activa mientras el lugar  $P_{113}$  tenga una marca.

### 5.3.2. Representación de las especificaciones en desigualdades lineales

Las especificaciones definidas anteriormente, pueden ser representadas por medio de desigualdades lineales, considerando los lugares implicados en la red de Petri  $G_3$ , las cuales se muestran a continuación.

**Especificación 3E1    Especificación 3E2    Especificación 3E3**

$$x(P_{101}) + x(P_{114}) \leq 1 \quad x(P_{101}) + x(P_{110}) \leq 1 \quad x(P_{103}) + x(P_{105}) \leq 1$$

**Especificación 3E4    Especificación 3E5    Especificación 3E6**

$$x(P_{101}) + x(P_{111}) \leq 1 \quad x(P_{105}) + x(P_{109}) \leq 1 \quad x(P_{101}) + x(P_{105}) \leq 1$$

**Especificación 3E7    Especificación 3E8    Especificación 3E9**

$$x(P_{101}) + x(P_{112}) \leq 1 \quad x(P_{101}) + x(P_{107}) \leq 1 \quad x(P_{101}) + x(P_{113}) \leq 1$$

### 5.3.3. Marcado inicial de los lugares de control $P_{ci}$ para la red de Petri $G_3$

De manera similar a la Subsección 5.2.3, el marcado inicial de los lugares de control para  $G_3$  se obtiene a partir de la ecuación (2.8), considerando a  $b$  un vector fila de dimensión  $k$  y  $l$  una matriz de dimensión  $n \times k$ , donde  $k$  es la última especificación. Con lo cual  $x_0(P_c)$  es ahora un vector fila de dimensión  $k$ ; en donde se muestra el marcado inicial de los  $k$ -ésimos lugares de control. A continuación se presenta la obtención del marcado inicial de los lugares de control  $P_{ci}$  de la red de Petri  $G_3$ .

$$x_0(P_{c_{3Ei}}) = b - x_{0_{G_3}} l \quad (5.8)$$



$$C_{CG3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, los arcos de entrada y salida para los lugares de control  $P_{C_{3E1}}$  a  $P_{C_{3E12}}$  se resumen en la tabla 5.6.

Lugares de control	Arcos de entrada	Arcos de salida
$P_{C_{3E1}}$	$T_{100}$ y $T_{106}$	$T_{101}$ y $T_{110}$
$P_{C_{3E2}}$	$T_{103}$	$T_{101}$
$P_{C_{3E3}}$	$T_{102}$ y $T_{104}$	$T_{103}, T_{105}$ y $T_{106}$
$P_{C_{3E4}}$	$T_{100}$ y $T_{105}$	$T_{101}$ y $T_{103}$
$P_{C_{3E5}}$	$T_{104}$ y $T_{109}$	$T_{105}$ , $T_{106}$ y $T_{110}$
$P_{C_{3E6}}$	$T_{100}$ y $T_{104}$	$T_{101}$ , $T_{105}$ y $T_{106}$
$P_{C_{3E7}}$	$T_{100}$ y $T_{108}$	$T_{101}$ y $T_{104}$
$P_{C_{3E8}}$	$T_{100}$ y $T_{107}$	$T_{101}$ y $T_{108}$
$P_{C_{3E9}}$	$T_{100}$ y $T_{110}$	$T_{101}$ y $T_{107}$

Tabla 5.6: Arcos de entrada y salida de los lugares de control.

### 5.3.5. Planta supervisada

A continuación se presenta la red de Petri de la planta supervisada,  $Sup(G_3)$ , la cual fue generada a partir del marcado inicial (Ver tabla 5.5) y las conexiones de los lugares de control ( $P_{C_{3E1}}-P_{C_{3E12}}$ ) con la planta ( $G_3$ ) (Ver tabla 5.6). Dicha red de Petri se muestra en la figura 5.3.

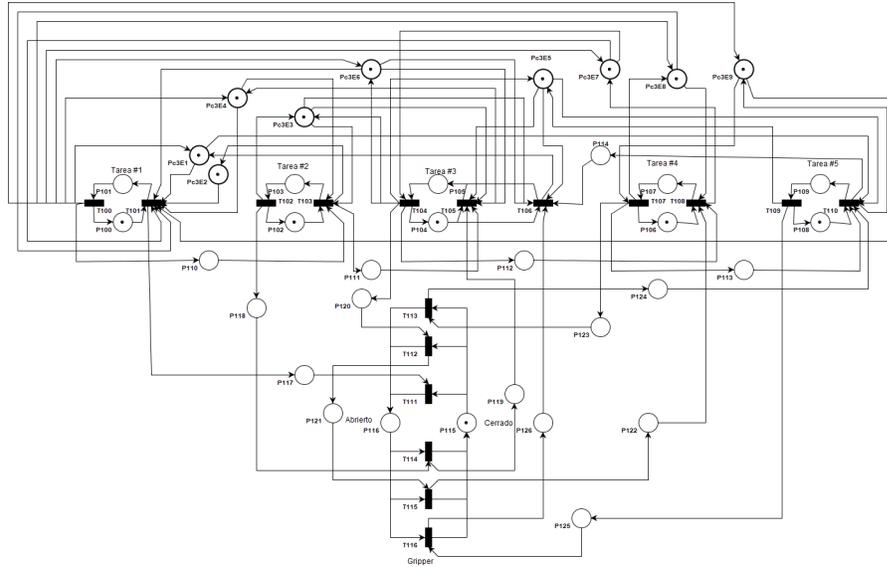


Figura 5.3: Red de Petri de la planta supervisada,  $Sup(G_3)$ .

## 5.4. Supervisor del centro de prensado

En esta sección se definen las especificaciones de seguridad que restringen el comportamiento del centro de prensado, las cuales son representadas por medio de desigualdades lineales. Posteriormente, se obtendrá el marcado inicial de los lugares de control que cumplen con las especificaciones, además de sus respectivos arcos de entrada y salida. Finalmente, se modela la planta supervisada empleando el modelo de la planta, los lugares de control y sus arcos de entrada y salida.

### 5.4.1. Definición de las especificaciones

Las especificaciones de seguridad definidas para el centro de prensado son las siguientes:

- **Especificación No.1.** (4E1) La banda transportadora ( $B_{E/S}$ ) no puede girar hacia adelante mientras la máquina de prensado ( $Pr.2$ ) este trabajando.
- **Especificación No.2.** (4E2) La banda transportadora ( $B_{E/S}$ ) no puede girar hacia atrás mientras la máquina de prensado ( $Pr.2$ ) este trabajando.

### 5.4.2. Representación de las especificaciones en desigualdades lineales

Las especificaciones definidas anteriormente, pueden ser representadas por medio de desigualdades lineales, considerando los lugares implicados en la red de Petri  $G_4$ , las cuales se muestran a continuación.

**Especificación 4E1**

$$x(P_{202}) + x(P_{203}) \leq 1$$

**Especificación 4E2**

$$x(P_{201}) + x(P_{203}) \leq 1$$

**5.4.3. Marcado inicial de los lugares de control  $P_{ci}$  para la red de Petri** $G_4$ 

A continuación se presenta la obtención del marcado inicial de los lugares de control  $P_{c_i} \quad \forall \quad i = 1, \dots, k$ , donde  $k$  es la última especificación.

- *Marcado inicial de  $P_{c_{4E1}}$*

El número inicial de marcas en  $P_{c_{4E1}}$  se determina aumentando la desigualdad lineal de **4E1** a una ecuación lineal con  $P_{c_{4E1}}$  como nueva variable, como se menciona en (2.5).

$$x(P_{202}) + x(P_{203}) + x(P_{c_{4E1}}) = 1 \quad (5.9)$$

Por lo tanto, observando cuidadosamente la red de Petri  $G_4$  puede notarse que  $P_{202}$  y  $P_{203}$  no cuentan con marcado inicial, en otras palabras, la banda transportadora ( $B_{E/S}$ ) y la máquina de prensado ( $Pr.2$ ) inician detenidos, por ende, para satisfacer la ecuación (5.9),  $P_{c_{4E1}}$  debe contener una marca inicial, es decir,  $x(P_{c_{4E1}}) = 1$ .

- *Marcado inicial de  $P_{c_{4E2}}$*

De manera similar que en el caso anterior, la desigualdad de **4E2** se transforma a la siguiente ecuación lineal.

$$x(P_{201}) + x(P_{203}) + x(P_{c_{4E2}}) = 1 \quad (5.10)$$

Como  $P_{201}$  y  $P_{203}$  no cuentan con marcado inicial, es decir, la banda transportadora ( $B_{E/S}$ ) y la máquina de prensado ( $Pr.2$ ) inician detenidos, por lo tanto  $x(P_{c_{4E2}}) = 1$ , de tal manera que se satisface la ecuación (5.10).

Por lo tanto, el marcado inicial de los lugares de control  $P_{c_{4E1}}$  y  $P_{c_{4E2}}$ , se resume en la tabla 5.7.

Lugares de control	Marcado inicial
$P_{c_{4E1}}$	1
$P_{c_{4E2}}$	1

Tabla 5.7: Marcado inicial de los lugares de control del centro de prensado.

#### 5.4.4. Conexiones de los lugares de control ( $P_{C_{4E1}}$ y $P_{C_{4E2}}$ ) con la red de Petri $G_4$

Para obtener las conexiones de los lugares de control con las transiciones de la planta ( $G_4$ ), de tal manera que se satisfagan las desigualdades  $4E1$  y  $4E2$  para todos los estados alcanzables, se utiliza la ecuación (2.7).

$$Cc_i = -C_{G_4}l_i \quad \forall \quad i = 1, \dots, k$$

Donde,  $l_i$  es un vector columna de dimensión  $n = |P|$  y  $Cc_i$  es un vector columna de dimensión  $m = |T|$ .

- Arcos de entrada y salida del lugar  $P_{C_{4E1}}$

$$Cc_{4E1} = -C_{G_4}l_{4E1} \quad (5.11)$$

Donde,  $l_{4E1}$  representa los lugares que se encuentran en la restricción  $4E1$ , la cual se muestra a continuación

$$l_{4E1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación (5.11) se tiene

$$Cc_{4E1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}^T$$

Es decir, el lugar  $P_{C_{4E1}}$  tiene arcos de entrada de  $T_{203}$  y  $T_{204}$ , además de arcos de salida de  $T_{202}$  y  $T_{205}$ .

- Arcos de entrada y salida del lugar  $P_{C_{4E2}}$

$$Cc_{4E2} = -C_{G_4}l_{4E2} \quad (5.12)$$

Donde,  $l_{4E2}$  representa los lugares que se encuentran en la restricción  $4E2$ , la cual se muestra a continuación

$$l_{4E2} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Por lo tanto, sustituyendo en la ecuación (5.12) se tiene

$$Cc_{4E2} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}^T$$

Es decir, el lugar  $P_{C_{4E2}}$  tiene arcos de entrada de  $T_{201}$  y  $T_{204}$ , además de arcos de salida de  $T_{200}$  y  $T_{205}$ .

Los arcos de entrada y salida para los lugares de control  $P_{C4E1}$  y  $P_{C4E2}$  se resumen en la tabla 5.8.

Lugares de control	Arcos de entrada	Arcos de salida
$P_{C4E1}$	$T_{203}$ y $T_{204}$	$T_{202}$ y $T_{205}$
$P_{C4E2}$	$T_{201}$ y $T_{204}$	$T_{200}$ y $T_{205}$

Tabla 5.8: Arcos de entrada y salida de los lugares de control  $P_{C4E1}$  y  $P_{C4E2}$ .

### 5.4.5. Planta supervisada

A continuación se presenta la red de Petri de la planta supervisada,  $Sup(G_4)$ , la cual fue generada a partir del marcado inicial (Ver tabla 5.7) y las conexiones de los lugares de control ( $P_{C4E1}$  y  $P_{C4E2}$ ) con la planta ( $G_4$ ) (Ver tabla 5.8). Dicha red de Petri se muestra en la figura 5.4.

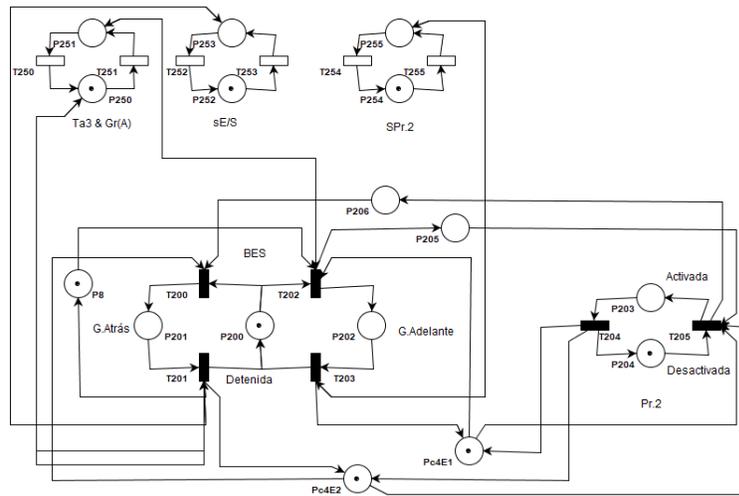


Figura 5.4: Red de Petri de la planta supervisada,  $Sup(G_4)$ .

Con esta última planta supervisada se finaliza el diseño de los supervisores para los cuatro módulos de la CMF, vistos en este trabajo de investigación.

## Capítulo 6

# Análisis de las plantas controladas

En este capítulo se presenta el análisis de las plantas controladas obtenidas en el Capítulo 5, para ello se hace uso del software PIPE, en el cual se pueda observar como las redes controladas cumplen con sus respectivas especificaciones de seguridad, por lo tanto se utiliza el paquete de analisis de invariantes. Así mismo, con este paquete se tiene la capacidad de mostrar si la red es viva (indica la posible existencia de un bucle), es decir, una secuencia de transiciones cuyo efecto neto es nulo, en otras palabras, que conduce de nuevo a la marca en la que comienza. Así mismo, las transiciones de las plantas controladas son representadas con barras blancas para evitar problemas con el software, además PIPE muestra las transiciones habilitadas como barras con contornos rojos.

### 6.1. Planta controlada del centro neumático, $Sup(G_1)$

En la figura 6.1, puede observarse que en el análisis de los P-invariantes, se obtiene las ecuaciones de los P-invariantes en las cuales se encuentran las especificaciones de seguridad definidas en el Capítulo 5, Sección 5.1, Subsección 5.1.1, en forma de ecuaciones lineales. Por lo tanto, la planta controlada sí se encuentra restringida por las especificaciones de seguridad, definidas anteriormente. El cumplimiento de las especificaciones 1E1, 1E2 y 1E3, se muestra en las figuras 6.2, 6.3 y 6.4, respectivamente. Ahora bien, aunque este análisis nos muestra que la red es no acotada, esto puede ser descartado, debido a que el lugar  $P_9$  se encarga de contabilizar el número de piezas que se encuentra en la mesa giratoria ( $Mg$ ), sin embargo, las marcas de este lugar no pueden ser mayor a tres ( $x(P_{81}) \leq 3$ ), ya que dichas marcas son retiradas por la activación del pistón de salida ( $Pi.2$ ), en otras palabras, físicamente la  $Mg$  no puede contener mas de tres piezas a la vez y esto se logra a partir de la activación de los pistones de entrada y salida ( $Pi.1$  y  $Pi.2$ ) mediante sus sensores correspondientes, los cuales están incluidos en la planta controlada. Por ende, se puede concluir que la

planta controlada es acotada ( $k = 3$ ) considerando el sistema físico, permitiendo una correcta implementación y funcionamiento del sistema.

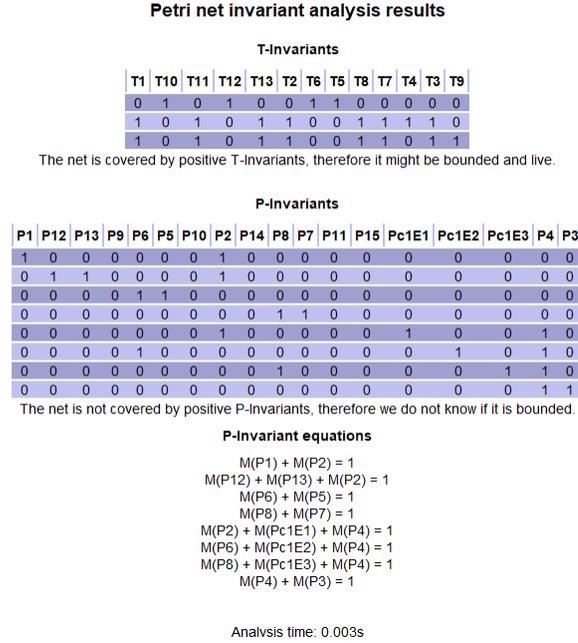


Figura 6.1: Análisis de los invariantes de la red  $Sup(G_1)$

Por otra parte, el análisis de los T-invariantes (ver figura 6.1) nos indica la existencia de bucles los cuales son representados en los siguientes vectores de disparos

$$u_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

$$u_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$$u_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

A continuación se describe cada uno de ellos:

- Para el caso de " $u_1$ "

En este caso, se trata el recorrido llevado a cabo por una pieza introducida al almacén de entrada. Considerando la secuencia de disparos permitidos por la red de Petri controlada, se puede presentar a  $u_1$  como la secuencia siguiente:  $T_2T_1T_3T_{11}T_7T_8T_{13}T_4$ .

Es decir,  $Pi.1$  se extiende (disparo de  $T_2$ ) enviando una pieza a  $Mg$ , después  $Pi.1$  se contrae (disparo de  $T_1$ ), en seguida  $Mg$  empieza a girar (disparo de  $T_3$ ), cuando la pieza llegó a la posición de salida (activación del sensor  $s_{Pi.2}$ ) la mesa se detiene (disparo de  $T_{11}$ ), a continuación  $Pi.2$  se contrae (disparo de  $T_7$ ) y la pieza es extraída de  $Mg$ , después el pistón se extiende (disparo de  $T_8$ ). Finalmente,  $Mg$  gira nuevamente (disparo de  $T_{13}$ ) y es detenida sí no se cuenta con alguna pieza almacenada en ella (disparo de  $T_4$ ).

- Para el caso de " $u_2$ "

En este caso, se trata el recorrido llevado a cabo por dos o más piezas introducidas al almacén de entrada. Considerando la secuencia de disparos permitidos por la red de Petri controlada, se puede presentar a  $u_2$  como la secuencia siguiente:  $T_2T_1T_3T_9 \Rightarrow \{T_2T_1T_3\}T_{11}T_7T_8T_{13}$ .

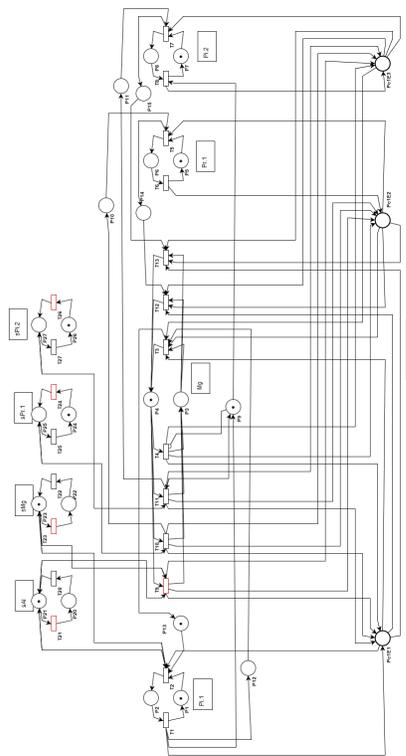
Es decir,  $Pi.1$  se extiende (disparo de  $T_2$ ) enviando una pieza a  $Mg$ , después  $Pi.1$  se contrae (disparo de  $T_1$ ), en seguida  $Mg$  empieza a girar (disparo de  $T_3$ ), cuando  $Mg$  llegará a una posición de carga (activación del sensor  $s_{Mg}$ ) y existe alguna pieza en el almacén de entrada (activación del sensor  $s_{Al}$ )  $Mg$  se detiene (disparo de  $T_9$ ), permitiendo que  $Pi.1$  se extienda (disparo de  $T_2$ ) enviando una nueva pieza a  $Mg$ , continuando con la contracción de  $Pi.1$  (disparo de  $T_1$ ) y permitiendo el giro de  $Mg$  (disparo de  $T_3$ ); cuando la primera pieza introducida a  $Mg$  llegará a la posición de salida (activación del sensor  $s_{Pi.2}$ )  $Mg$  se detiene (disparo de  $T_{11}$ ), a continuación  $Pi.2$  se contrae (disparo de  $T_7$ ) y la pieza es extraída de  $Mg$ , después  $Pi.2$  se extiende (disparo de  $T_8$ ). Finalmente,  $Mg$  gira nuevamente (disparo de  $T_{13}$ ) y permitiendo el reinicio del ciclo (disparo de  $T_9$ ).

- Para el caso de " $u_3$ "

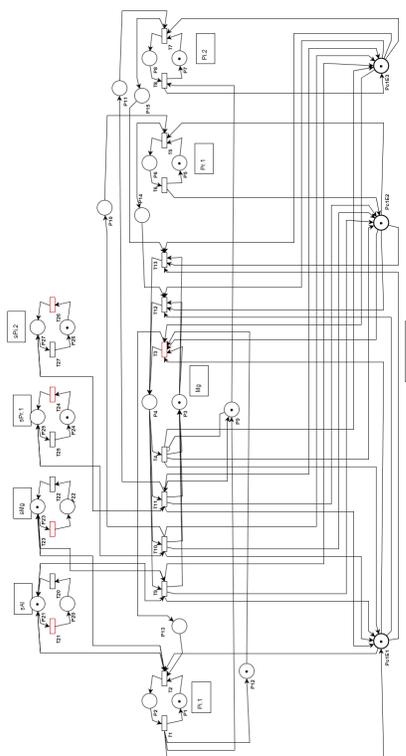
En este caso, se trata el inicio y el final del maquinado por parte de la máquina de prensado ( $Pr.1$ ). Como puede notarse, en los vectores  $u_1$  y  $u_2$ , no se muestra la secuencia de disparos correspondiente a  $Pr.1$ , esto ocurre ya que es un bucle que no depende del número de piezas introducidas al almacén de entrada. Tomando en cuenta la secuencia de disparos permitidos por la red de Petri controlada, se puede presentar a  $u_3$  como la secuencia siguiente:  $T_{10}T_5T_6T_{12}$ .

Considerando que existe alguna pieza en  $Mg$ , ésta puede ser detenida cuando el sensor de la prensa  $s_{Pr.1}$  es activado (disparo de  $T_{10}$ ), en seguida  $Pr.1$  es activada (disparo de  $T_5$ ) y después del maquinado de la pieza  $Pr.1$  se detiene (disparo de  $T_6$ ), continuando con el giro de  $Mg$  (disparo de  $T_{12}$ ). Este ciclo continúa cada que el sensor  $s_{Pr.1}$  es activado (disparo de  $T_{10}$ ).

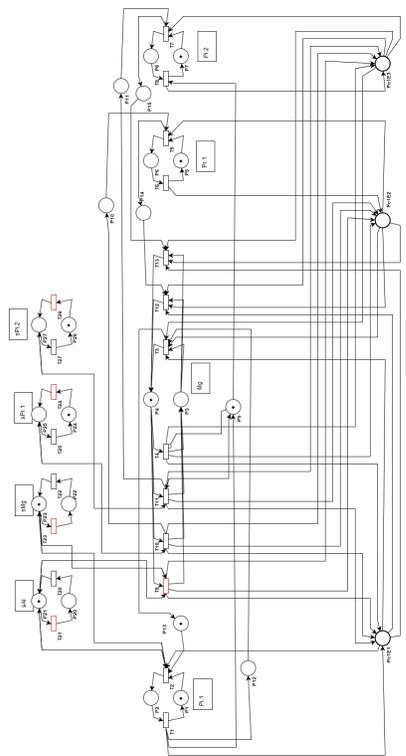
Por lo tanto, considerando los tres vectores de disparo descritos anteriormente, puede notarse que la red es viva, ya que existe siempre una transición que dispararse, en otras palabras, la red es libre de bloqueos.



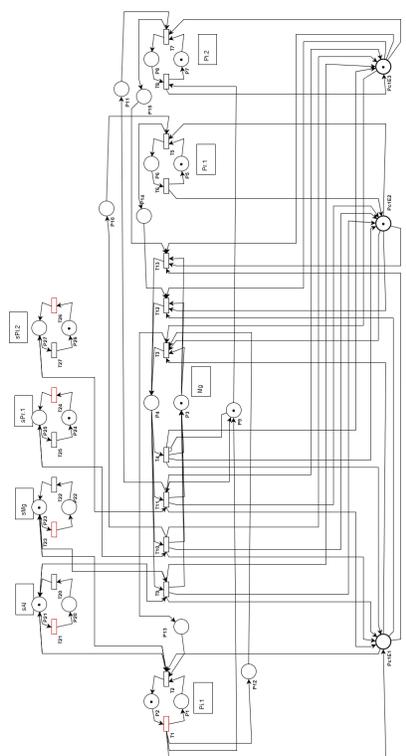
(a) Transición  $T_3$  habilitada



(c) Transición  $T_2$  habilitada

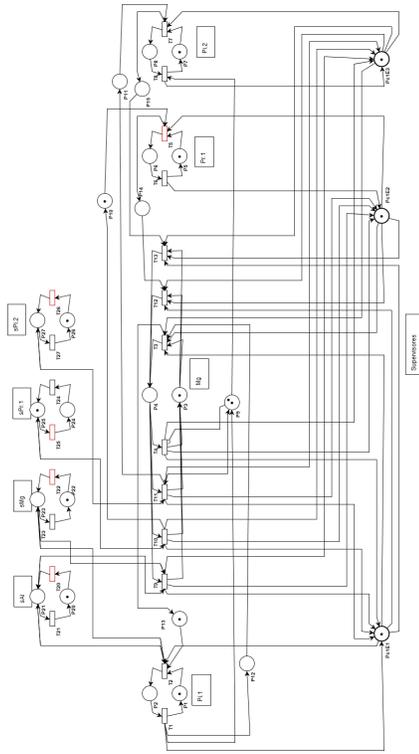


(b) Transición  $T_9$  habilitada

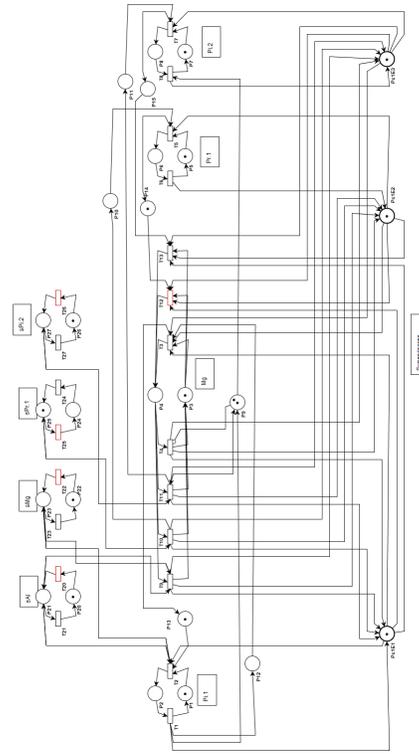


(d) Transición  $T_1$  habilitada

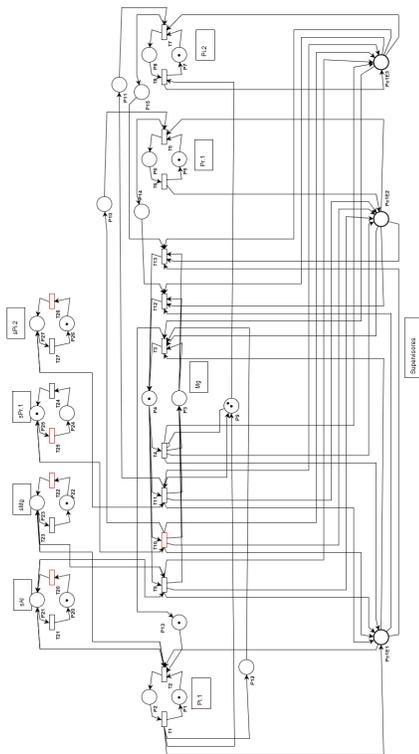
Figura 6.2: Pistón de entrada y mesa giratoria sin colisión (Especificación 1E1).



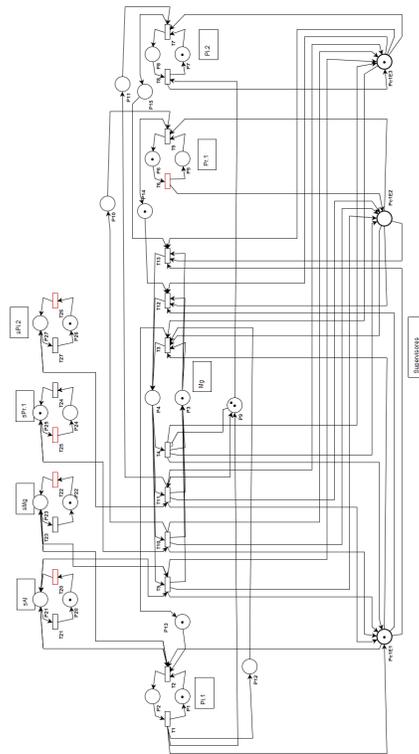
(b) Transición  $T_3$  habilitada



(d) Transición  $T_{12}$  habilitada



(a) Transición  $T_{10}$  habilitada



(c) Transición  $T_6$  habilitada

Figura 6.3: Prensa No.1 y mesa giratoria sin colisión (Especificación 1E2).

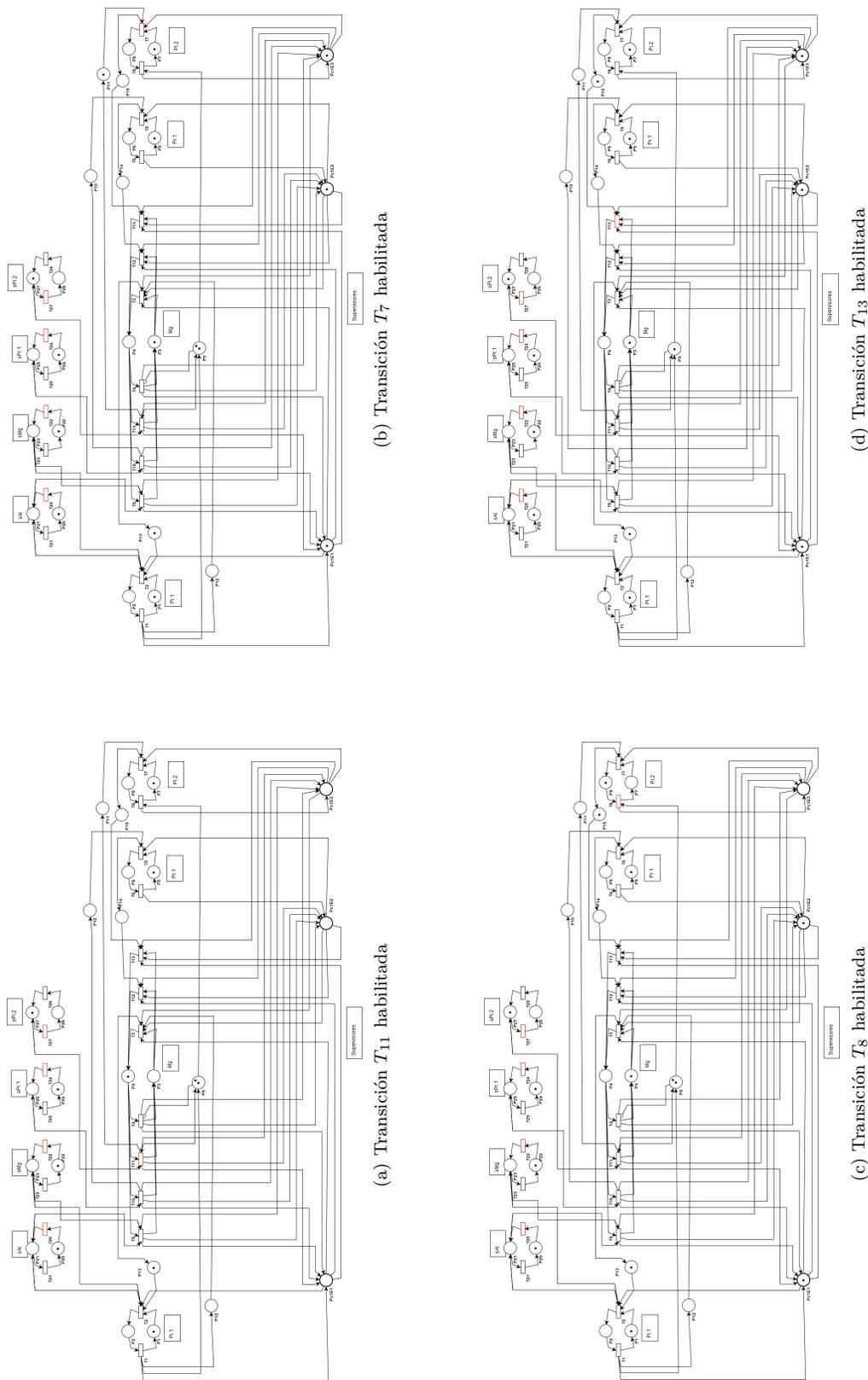


Figura 6.4: Pistón de salida y mesa giratoria sin colisión (Especificación IE3).



**P-Invariant equations**

M(P62) + M(P63) = 1  
M(P58) + M(P59) = 1  
M(P63) + M(Pc2E8) + M(P66) = 1  
M(P67) + M(Pc2E5) = 1  
M(P61) + M(P60) = 1  
M(P64) + M(P65) = 1  
M(P68) + M(P69) + M(Pc2E5) = 1  
M(P59) + M(P61) + M(Pc2E6) = 1  
M(P70) + M(Pc2E7) = 1  
M(P63) + M(P70) + M(P71) = 1  
M(P55) + M(P54) = 1  
M(P56) + M(P57) = 1  
M(P72) + M(Pc2E3) = 1  
M(P74) + M(P73) + M(Pc2E3) = 1  
M(P75) + M(Pc2E4) = 1  
M(P55) + M(P57) + M(Pc2E2) = 1  
M(P51) + M(P50) = 1  
M(P53) + M(P52) = 1  
M(P51) + M(P53) + M(Pc2E1) = 1

Analysis time: 0.026s

Figura 6.7: Ecuaciones invariantes de la red  $Sup(G_2)$ .

Por otra parte, el análisis de los T-invariantes, figura 6.6, nos indica la existencia de un bucle el cual es representado por el siguiente vector de disparo

$$u_1 = \left[ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \right] \quad (6.4)$$

Considerando las transiciones involucradas en la red de Petri  $Sup(G_2)$  y el vector de disparo anterior, pueden visualizarse las transiciones presentes en el bucle de la siguiente manera:  $T_{50}, T_{52}, T_{53}, T_{54}, T_{56}, T_{57}, T_{58}, T_{60}, T_{61}, T_{62}, T_{63}, T_{64}, T_{66}, T_{67}, T_{68}, T_{70}$ .

Donde el vector  $u_1$  no presenta los posibles disparos de las transiciones  $T_{51}, T_{55}, T_{59}, T_{65}, T_{69}$  y  $T_{71}$ , de los cuales por motivos de modelado los primeros cuatro solo son disparados una vez al iniciar el proceso, en otras palabras, las bandas transportadoras de este módulo,  $B_E, B_{Tr}, B_{Fr}$  y  $B_S$  inician su movimiento por primera vez por medio del sensor de salida,  $s_{BSCN}$ , del centro neumático; y estos subsistemas no vuelven a activarse mediante estas transiciones hasta que se reinicia el módulo, es decir, hasta que se presiona el botón iniciar y  $s_{BSCN}$  es activado. Por lo anterior, es fácil observar que no existe un bucle entre estas transiciones y las mostradas en " $u_1$ ".

En el caso de la transición  $T_{69}$ , esta es disparada cuando el empujador No.1 ha enviado cuatro piezas a sus subsistemas subsecuentes y la banda de salida tiene una pieza almacenada, además el sensor  $s_{BEe}$  está activado. Ahora bien, la transición  $T_{71}$  solo puede ser disparada cuando  $B_S$  no tiene pieza almacenada y la transición  $T_{69}$  ha sido previamente disparada. Por lo tanto, puede notarse que estas transiciones ( $T_{69}$  y  $T_{71}$ ) pueden o no dispararse en todo el proceso, lo que implica que tampoco existe un bucle entre estas transiciones y las mostradas en " $u_1$ ".

Para comprender que el vector " $u_1$ " muestra las transiciones más importantes que permiten el recorrido de piezas por el centro de maquinados, se presenta el siguiente

ejemplo: entrada de una pieza a este módulo. Para este ejemplo se considera que todas las bandas transportadoras se encuentran en movimiento. Primeramente, la pieza es transportada por medio de la banda de entrada ( $B_E$ ) hacia el empujador No.1 ( $Emp.1$ ), el cual empieza su movimiento (disparo de  $T_{53}$ ) cuando  $s_{BEs/time}$  es activado y  $B_E$  esta detenida (disparo de  $T_{50}$ ), expulsando la pieza hacia la banda del torno ( $B_{Tr}$ ); enseguida  $Emp.1$  se detiene cuando regresa a su posición de home (disparo de  $T_{52}$ ) y  $B_E$  puede continuar su movimiento (disparo de  $T_{70}$ ). Cuando la pieza es detectada por el sensor,  $s_{Tr}$ ,  $B_{Tr}$  se detiene (disparo de  $T_{54}$ ) permitiendo que el torno ( $T_r$ ) se active (disparo de  $T_{57}$ ), este subsistema se detiene cuando la pieza ha sido maquinada (disparo de  $T_{56}$ ) lo que conlleva a que  $B_{Tr}$  continúe girando (disparo de  $T_{68}$ ), provocando que la pieza sea enviada a la banda de la fresadora ( $B_{Fr}$ ). Ahora bien,  $B_{Fr}$  es detenida (disparo de  $T_{58}$ ) cuando la pieza es detectada por el sensor,  $s_{Fr}$ , permitiendo que la máquina fresadora ( $F_r$ ) se active (disparo de  $T_{61}$ ), este subsistema es detenido cuando se finaliza el maquinado de la pieza (disparo de  $T_{60}$ ), lo que permite que  $B_{Fr}$  vuelva a girar (disparo de  $T_{67}$ ), enviando la pieza hacia el empujador No.2 ( $Emp.2$ ). A continuación el  $Emp.2$  inicia su movimiento (disparo de  $T_{63}$ ) cuando tiene una pieza para ser enviada hacia la banda de salida ( $B_S$ ), por otro lado, se detiene cuando regresa a su posición de home (disparo de  $T_{62}$ ). Finalmente,  $B_S$  es detenida cuando el sensor,  $s_{Bs}$ , es activado por la pieza maquinada (disparo de  $T_{64}$ ) evitando que  $Emp.2$  inserte un nueva pieza, hasta que la pieza almacenada sea retirada (disparo de  $T_{66}$ ). El ciclo anterior se repite para una secuencia de piezas de entrada.

Por lo tanto, considerando el vector de disparo descrito anteriormente, puede notarse que existe un bluce y por ende la red  $Sup(G_2)$  es libre de bloqueos.

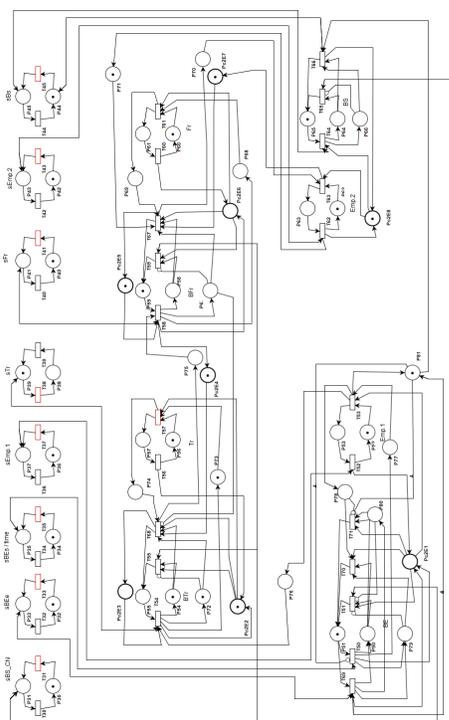
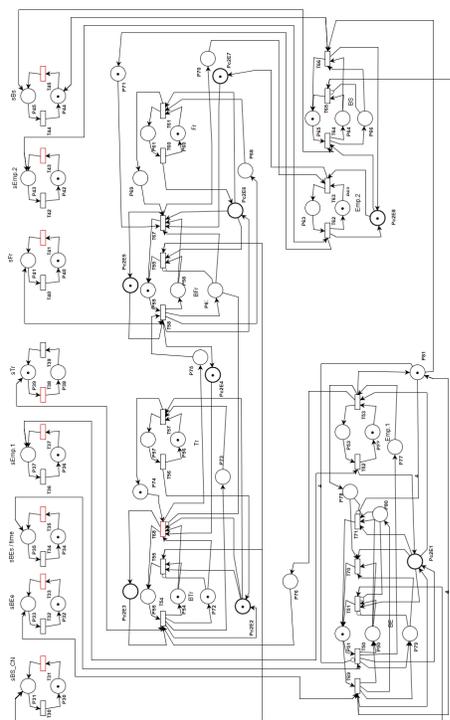
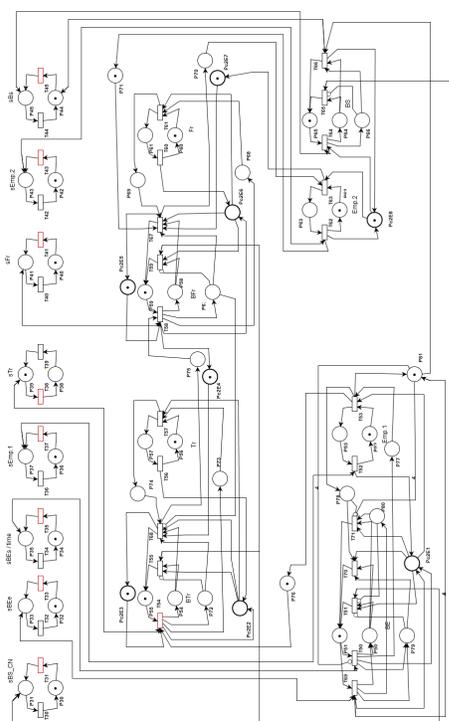
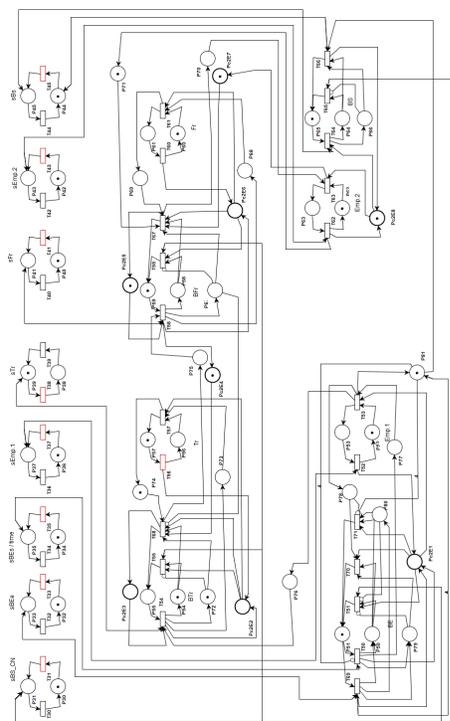
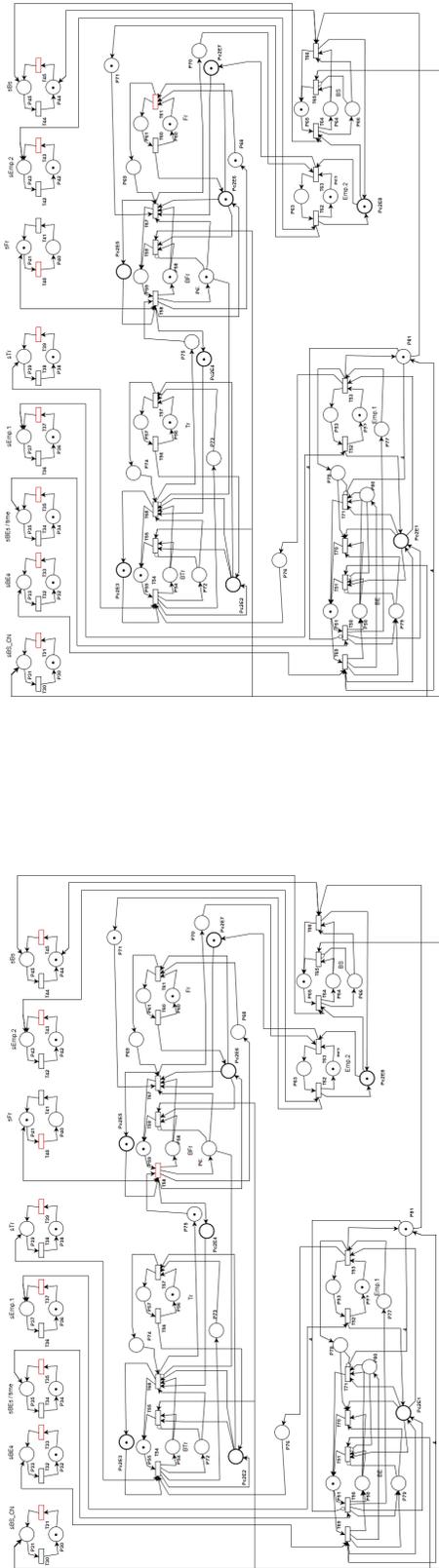
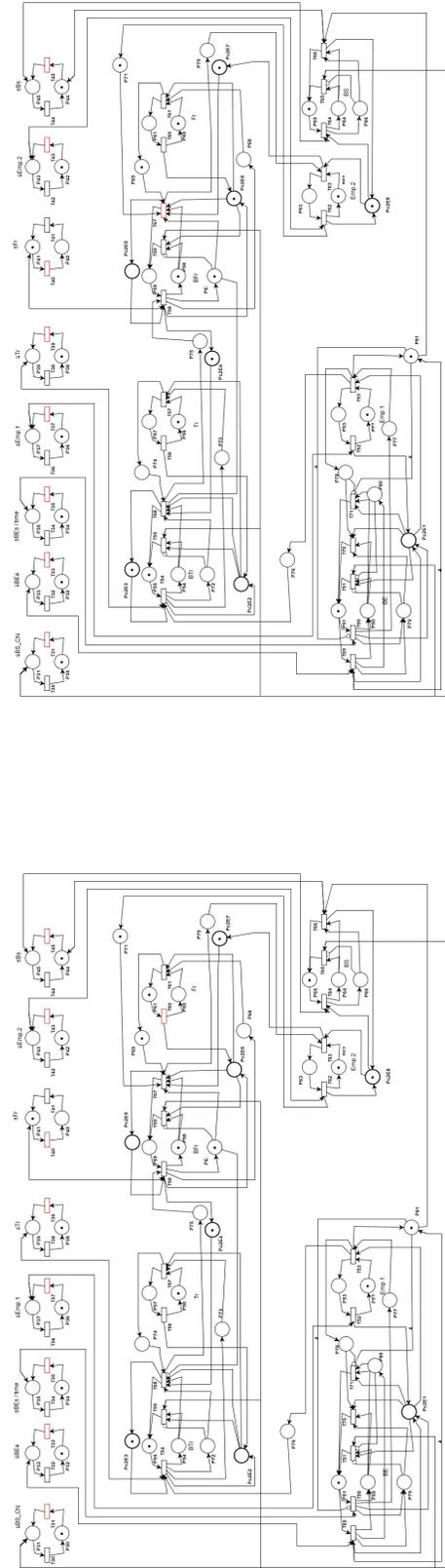
(a) Transición  $T_{54}$  habilitada(c) Transición  $T_{56}$  habilitada(b) Transición  $T_{57}$  habilitada(d) Transición  $T_{68}$  habilitada

Figura 6.8: Banda del torno o torno activado (Especificación 2E2).



(a) Transición T<sub>58</sub> habilitada

(b) Transición T<sub>61</sub> habilitada



(c) Transición T<sub>60</sub> habilitada

(d) Transición T<sub>67</sub> habilitada

Figura 6.9: Banda de la fresadora o máquina fresadora activada (Especificación 2E6).



**Petri net invariant analysis results**

T-Invariants

T101	T100	T102	T103	T104	T105	T106	T107	T108	T109	T110	T111	T114	T112	T115	T113	T116
0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1

The net is not covered by positive T-invariants, therefore we do not know if it is bounded and live.

Figura 6.11: Análisis de los T-invariantes de la red  $Sup(G_3)$ 

Por otra parte, el análisis de los T-invariantes, figura 6.11, nos indica la existencia de un bucle el cual es representado por el siguiente vector de disparo

$$u_1 = \left[ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \right] \quad (6.5)$$

El vector  $u_1$  no presenta los posibles disparos de las transiciones  $T_{100}$ ,  $T_{101}$ ,  $T_{102}$ ,  $T_{103}$ ,  $T_{105}$ ,  $T_{111}$  y  $T_{114}$ , los cuales son habilitadas por medio de la activación de las tareas 1 y 2, y estas solo son activadas al principio del proceso por motivos de modelado, es decir, las tareas 1 y 2 solo pueden ser activadas cada vez que se activa el botón de inicio y con ello permitiendo también el cierre y abertura del gripper en dichas tareas; por lo tanto no existe un bluce entre estas tareas.

Por otra parte, el vector de disparo  $u_1$  ejemplifica el caso cuando el robot de 3 GDL se encuentra a la salida del centro de maquinados. Considerando las transiciones involucradas en la red de Petri  $Sup(G_3)$  y el vector de disparo anterior, pueden visualizarse las transiciones presentes en el bucle de la siguiente manera:  $T_{104}$ ,  $T_{106}$ ,  $T_{107}$ ,  $T_{108}$ ,  $T_{109}$ ,  $T_{110}$ ,  $T_{112}$ ,  $T_{113}$ ,  $T_{115}$ ,  $T_{116}$ .

Para comprender que el vector " $u_1$ " muestra las transiciones más importantes que permiten la trayectoria del robot de 3 GDL desde el centro de maquinados hasta el almacén, se describe a continuación este proceso. Es decir, sí existe una pieza a la salida del centro de maquinados el gripper debe cerrarse (disparo de  $T_{116}$ ), cuando el gripper este cerrado (pieza sujeta) puede llevarse acabo la tarea 3 (disparo de  $T_{106}$ ), es decir, el robot debe moverse a la salida del centro de prensado, cuando el robot llega a dicha posición la tarea 3 se desactiva (disparo de  $T_{104}$ ) y el gripper se abre (disparo de  $T_{112}$ ). A continuación el robot espera la llegada de la pieza maquinada por el centro de prensado, por ende sí la pieza maquinada se encuentra a la salida de este centro el gripper se cierra (disparo de  $T_{115}$ ), una vez que la pieza es sujeta por el gripper puede activarse la tarea 4 (disparo de  $T_{108}$ ), es decir, el robot lleva a la pieza maquinada al almacén final, cuando el robot llega a dicha posición la tarea 4 es desactivada (disparo de  $T_{107}$ ) y el gripper se abre para liberar la pieza (disparo de  $T_{113}$ ). Finalmente, la tarea 5 es activada (disparo de  $T_{110}$ ), la cual consiste en mover al robot del almacén final hacia la salida del centro de maquinados, al llegar a esta posición la tarea 5 se desactiva (disparo de  $T_{109}$ ), permitiendo el reinicio del ciclo (disparo de  $T_{116}$ ) siempre y cuando exista una pieza a la salida del centro de maquinados.

Por lo tanto, considerando el vector de disparo descrito anteriormente, puede notarse que existe un bluce y por ende la red  $Sup(G_3)$  es libre de bloqueos.

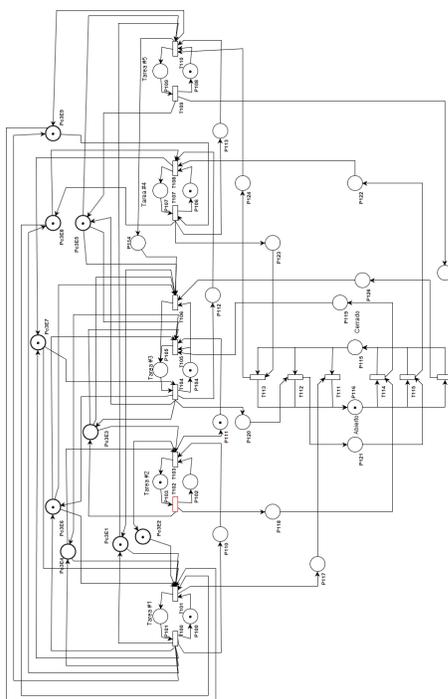
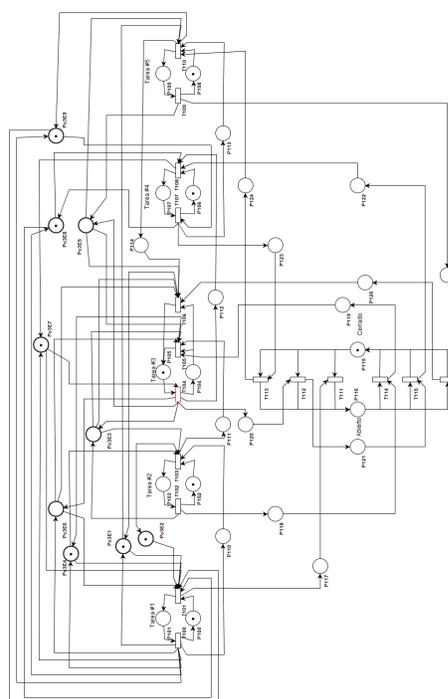
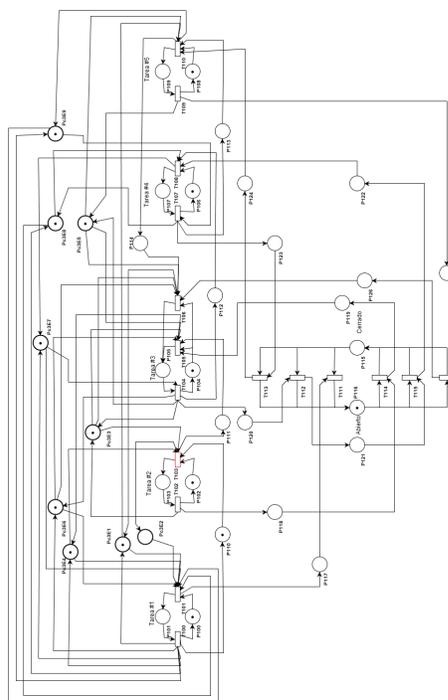
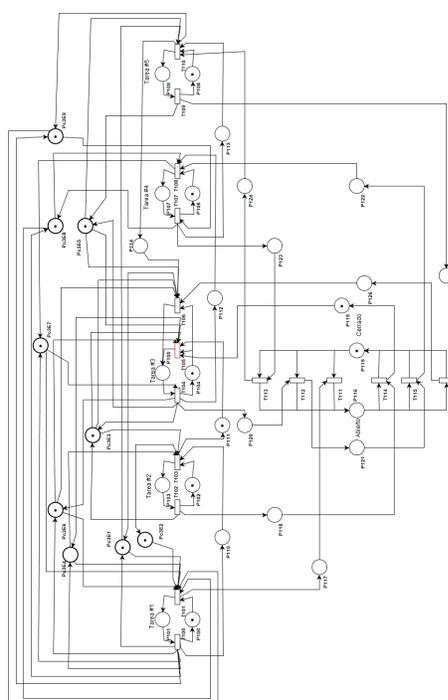
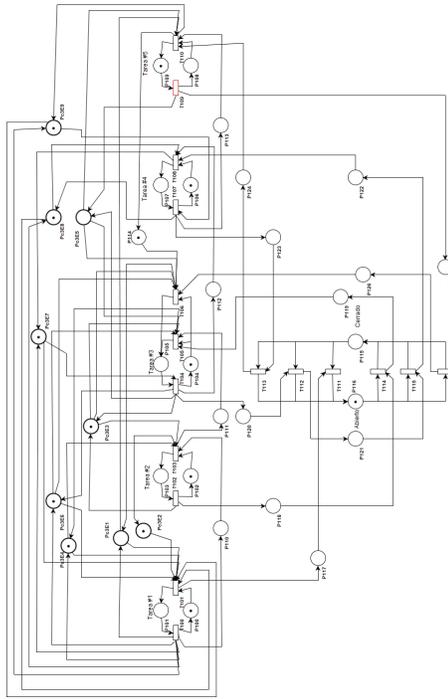
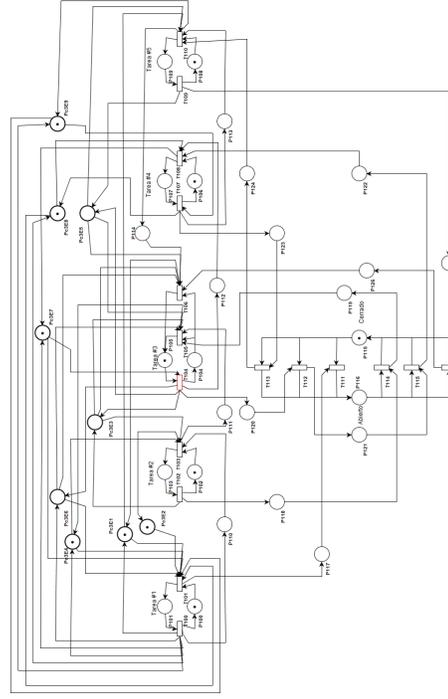
(b) Transición  $T_{102}$  habilitada(d) Transición  $T_{104}$  habilitada(a) Transición  $T_{103}$  habilitada(c) Transición  $T_{105}$  habilitada

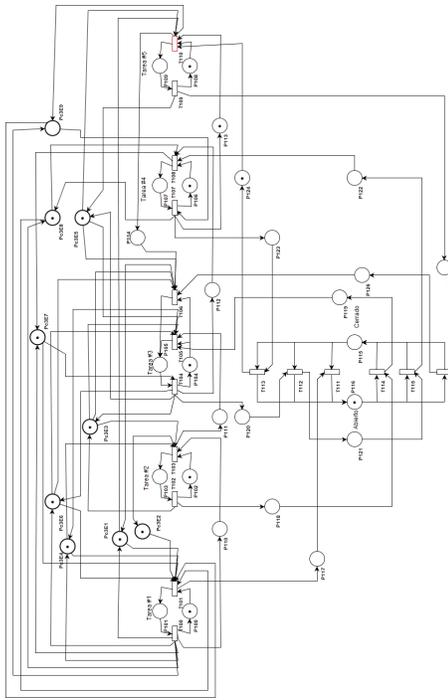
Figura 6.12: Tarea 2 o Tarea 3 activado (Especificación 3E3).



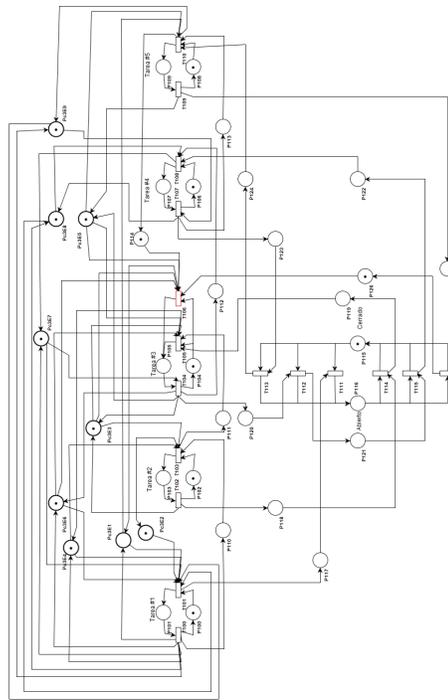
(b) Transición  $T_{109}$  habilitada



(d) Transición  $T_{104}$  habilitada



(a) Transición  $T_{110}$  habilitada



(c) Transición  $T_{106}$  habilitada

Figura 6.13: Tarea 3 o Tarea 5 activado (Especificación 3E5).

## 6.4. Planta controlada del centro de prensado, $Sup(G_4)$

En la figura 6.14, puede observarse el análisis de los P-invariantes, en donde se obtienen las ecuaciones de los P-invariantes, en los cuales se visualizan las especificaciones de seguridad definidas en el Capítulo 5, Sección 5.4, Subsección 5.4.1, en forma de ecuaciones lineales. Por lo tanto, la planta controlada sí se encuentra restringida por las especificaciones de seguridad, definidas anteriormente. El cumplimiento de las especificaciones 4E1 y 4E2, se muestran en las figuras, 6.16 y 6.17, respectivamente. Así mismo, este análisis nos muestra que la red es acotada, es decir que los lugares involucrados en la red  $Sup(G_4)$  no contienen más de  $k$ -marcas en todo el proceso, este caso  $k = 1$ . Por lo tanto, el acotamiento de la planta controlada debe permitir una correcta implementación y un buen funcionamiento del centro de prensado.

**P-Invariants**

P200	P201	P202	P203	P204	P205	P206	Pc4E1	P208	Pc4E2
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	1	1	0	1	0
0	0	1	1	0	0	0	1	0	0
0	1	0	1	0	0	0	0	0	1

The net is covered by positive P-Invariants, therefore it is bounded.

**P-Invariant equations**

$$\begin{aligned}
 M(P200) + M(P201) + M(P202) &= 1 \\
 M(P203) + M(P204) &= 1 \\
 M(P201) + M(P205) + M(P206) + M(P208) &= 1 \\
 M(P202) + M(P203) + M(Pc4E1) &= 1 \\
 M(P201) + M(P203) + M(Pc4E2) &= 1
 \end{aligned}$$

Analysis time: 0.001s

Figura 6.14: Análisis de los P-invariantes de la red  $Sup(G_4)$ .

**Petri net invariant analysis results**

**T-Invariants**

T200	T201	T202	T203	T204	T205
1	1	1	1	1	1

The net is covered by positive T-Invariants, therefore it might be bounded and live.

Figura 6.15: Análisis de los T-invariantes de la red  $Sup(G_4)$

Por otra parte, el análisis de los T-invariantes, figura 6.15, nos indica la existencia de un bucle el cual es representado por el siguiente vector de disparo

$$u_1 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Considerando las transiciones involucradas en la red de Petri  $Sup(G_4)$  y el vector de

disparo anterior, pueden visualizarse las transiciones presentes en el bucle de la siguiente manera:  $T_{200}$ ,  $T_{201}$ ,  $T_{202}$ ,  $T_{203}$ ,  $T_{204}$ ,  $T_{205}$ . A continuación se describe el disparo de las transiciones anteriores, a partir de la secuencia de disparo permitida por la red. Cuando una pieza llega al centro de prensado por medio del robot de 3 GDL la banda transportadora ( $B_{E/S}$ ) gira hacia adelante (disparo de  $T_{202}$ ) y es detenida cuando el sensor de la prensa No.2,  $s_{Pr.2}$ , es activado (disparo de  $T_{203}$ ), permitiendo que la prensa ( $Pr.2$ ) se active (disparo de  $T_{205}$ ); cuando  $Pr.2$  termina el maquinado de la pieza este es desactivado (disparo de  $T_{204}$ ). A continuación  $B_{E/S}$  gira hacia atrás (disparo de  $T_{200}$ ) y es detenida por medio del sensor de salida ( $s_{E/S}$ ). Este ciclo se repite siempre que el robot de 3 GDL coloque una pieza a la entrada de este centro.

Por lo tanto, considerando el vector de disparo descrito anteriormente, puede notarse que existe un bucle y por ende la red  $Sup(G_4)$  es viva, ya que existe siempre una transición que dispararse, en otras palabras, la red es libre de bloqueos.

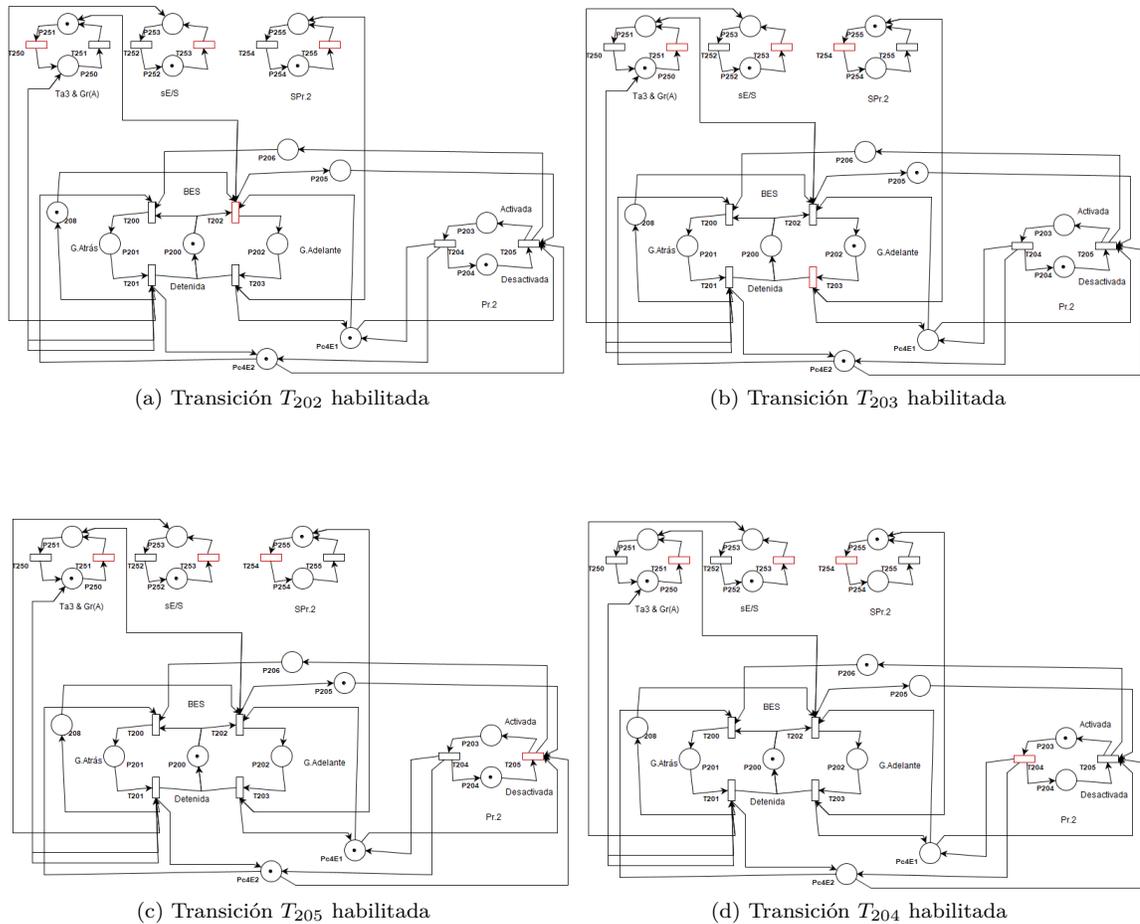


Figura 6.16: Banda transportadora gira hacia adelante o prensa No.2 activada (Especificación 4E1).

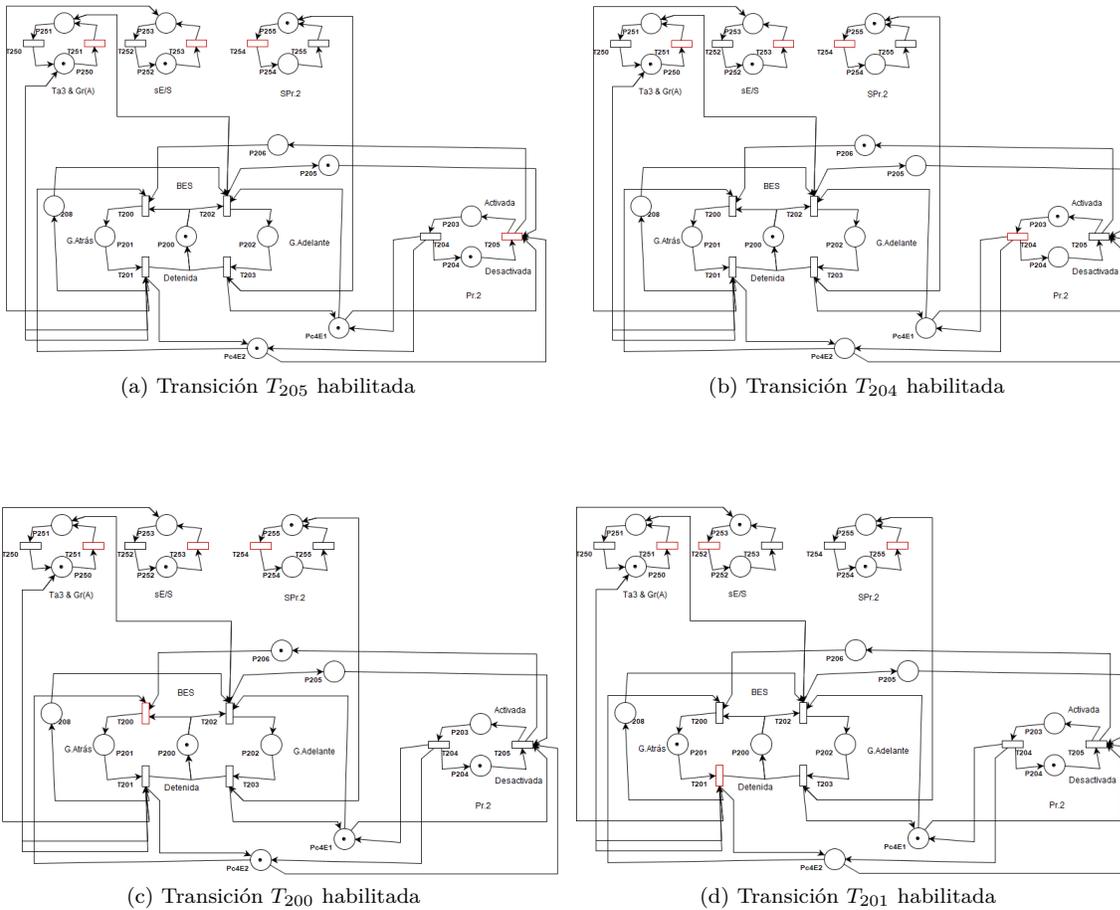


Figura 6.17: Banda transportadora gira hacia atrás o prensa No.2 activada (Especificación 4E2).

Con esta última planta supervisada se finaliza el análisis de las redes de Petri de los cuatro módulos de la CMF, vistos en este trabajo de investigación. Concluyendo que  $Sup(G_1)$ ,  $Sup(G_2)$ ,  $Sup(G_3)$  y  $Sup(G_4)$ , pueden ser traducidas e implementadas en un PLC, para corroborar su correcto funcionamiento de forma experimental.

## Capítulo 7

# Traducción a lenguaje del PLC

En este capítulo se muestran los gráficos de redes de Petri para la traducción de las plantas supervisadas al lenguaje de programación LAD (escalera) para PLC. Así mismo, se realiza la traducción de la planta supervisada del centro de prensado, con el objetivo de comprender la traducción de una red de Petri. Finalmente, se presenta los bloques en los cuales se implemento la red de Petri supervisada del centro neumático.

### 7.1. Traducción a lenguaje escalera (LAD)

En esta sección se desarrolla el procedimiento para traducir redes de Petri al lenguaje de programación LAD, el cual es aceptado por un PLC. La traducción se realizó siguiendo el procedimiento mostrado en [17] y [18]. A continuación se presentan los elementos esenciales para la traducción de una red de Petri a lenguaje escalera.

#### a) Marcado inicial de lugares binarios

Para indicar una marca inicial en un lugar binario se utiliza la instrucción set (S), en caso contrario la instrucción será reset (R). En la figura 7.1 se presenta un ejemplo, en el cual  $P_1$  tiene una marca inicial y  $P_2$  esta vacía, por lo tanto, para colocar dicho marcado se necesita que al oprimir el botón iniciar  $P_1$  pase a set (S) y  $P_2$  a reset (R).

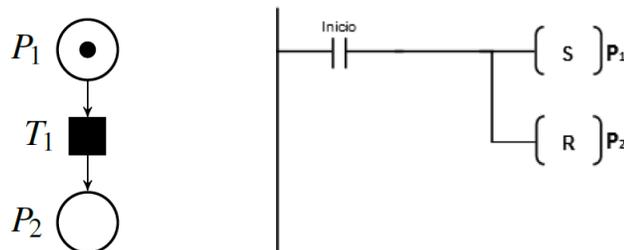


Figura 7.1: Marcado inicial en LAD.

b) **Disparo de transiciones**

Para entender la traducción a LAD se presenta el siguiente ejemplo (figura 7.2). Se analiza que para poder dispararse  $T_3$  debe existir una marca en  $P_3$ . Bajo el principio anterior, se observa que en LAD la transición  $T_3$  se habilita al cerrarse el contacto normalmente abierto, correspondiente al marcado del lugar  $P_3$ , retirando su marca y colocándola en  $P_4$ .

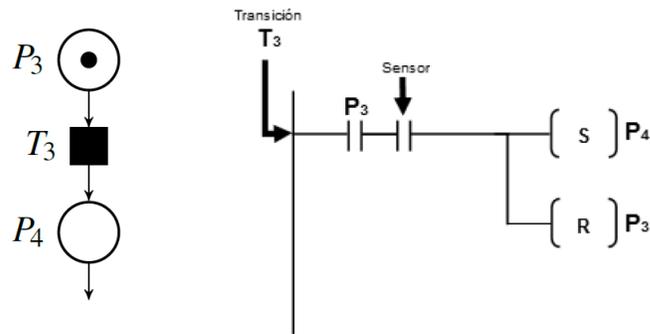


Figura 7.2: Disparo de una transición en LAD.

c) **Arcos inhibidores**

Estos arcos habilitan una transición en ausencia de marcado en un lugar. En LAD, estos se representan como un contacto normalmente cerrado en el escalón correspondiente a la transición que habilita.

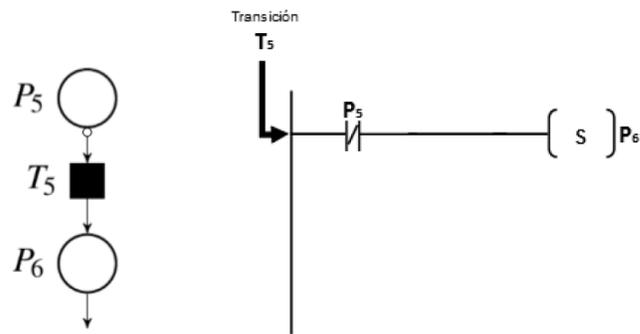


Figura 7.3: Arco inhibidor en LAD.

d) **Arcos bidireccionales**

Es un par de arcos que van desde un lugar hacia un transición y viceversa. En la figura 7.4 se implementa como un contacto normalmente abierto, así mismo dicho bit no es reseteado (R).

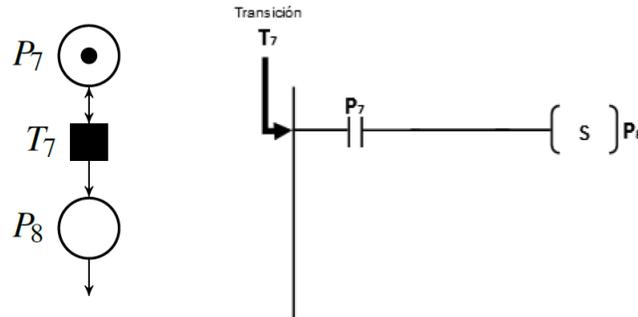


Figura 7.4: Arcos bidireccionales en LAD.

e) **Disparo de transiciones con plazas no binarias**

Para entender la traducción a LAD se presenta el siguiente ejemplo (figura 7.5). Se analiza que para poder dispararse  $T_9$  debe existir mínimo una marca de entrada, dicho disparo puede ser efectuado  $n$ -veces lo que constituye en un marcado no binario en  $P_{10}$ ; así mismo,  $T_{10}$  solo se dispara si  $n \geq 1$ , si esto ocurre se genera un marcado a la salida y se elimina una marca por cada disparo de  $T_{10}$ . Bajo el principio anterior, se observa que en LAD la transición  $T_9$  se habilita al cerrarse el contacto normalmente abierto (*Entrada*), y es contabilizado el numero de disparos en esta transición (CTUD), por otro lado, por cada disparo de  $T_{10}$  se reduce en uno el numero del contador, así mismo  $T_{10}$  solo se dispara si el bit  $M_{1,0}$  está activo y existe una señal de entrada (sensor activado o bit de activación).

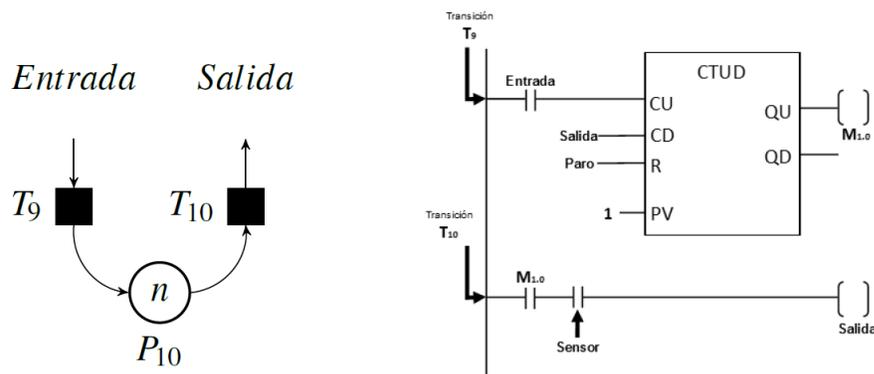


Figura 7.5: Disparo de transiciones con plazas no binarias en LAD.

## 7.2. Traducción de una planta supervisada

La traducción de la red de Petri de una planta supervisada a lenguaje LAD se realiza mediante los gráficos de redes de Petri mostrados en la Sección anterior. Para ilustrar cómo se obtiene el diagrama LAD de una Red de Petri supervisada, se presentan en esta Sección la traducción de la Red de Petri  $Sup(G_4)$ , ver Figura 7.6, obtenido en la Sección 5.4, esta traducción se divide en dos pasos principales: marcado inicial y disparo de transiciones de la planta supervisada. Es necesario comentar que  $Ta3 \& Gr(A)$ ,  $s_{E/S}$  y  $s_{Pr.2}$  son bits de activación y sensores respectivamente, por ende no se traducen.

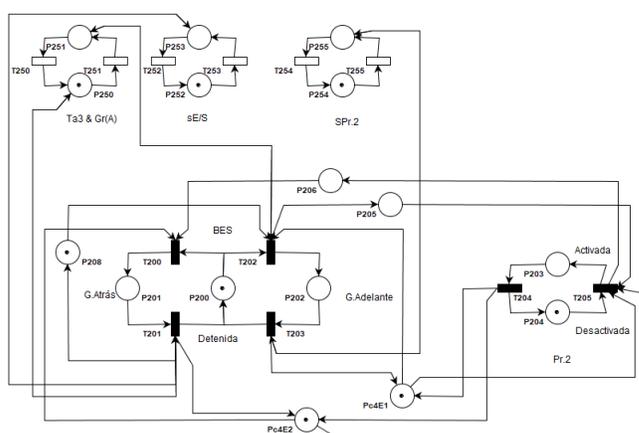


Figura 7.6: Planta controlada del centro de prensado,  $Sup(G_4)$ .

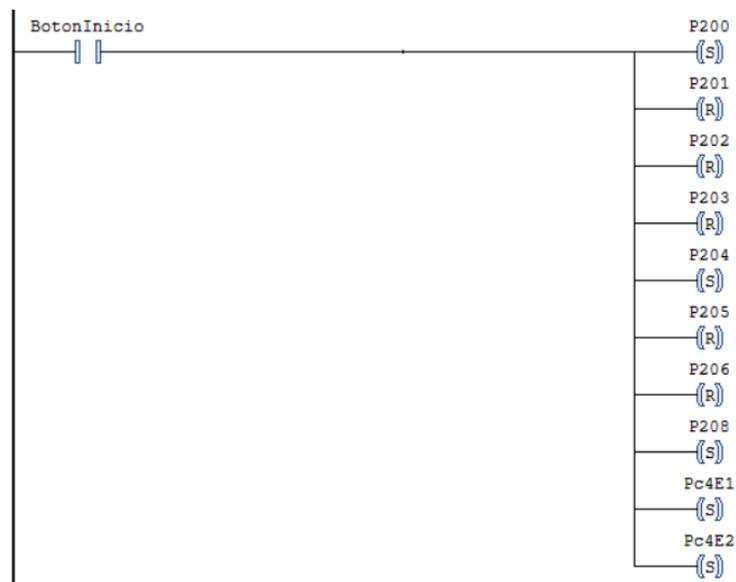
### 7.2.1. Marcado inicial de $Sup(G_4)$

El primer paso para traducir la red de Petri  $Sup(G_4)$ , es identificar el marcado inicial binario, ver Figura 7.6, por lo tanto, los lugares  $P_{200}$ ,  $P_{204}$ ,  $P_{208}$ ,  $P_{C4E1}$  y  $P_{C4E2}$  contienen cada uno de ellos una marca inicial (lo que corresponde a un set (S) en LAD) y los lugares  $P_{201}$ ,  $P_{202}$ ,  $P_{203}$ ,  $P_{205}$  y  $P_{206}$  no contienen marcado inicial (lo que corresponde a un reset (R) en LAD); lo mencionado anteriormente, puede ser resumido en la tabla 7.1.

Lugares	Marcas iniciales	Marcas iniciales en LAD
$P_{200}$	1	(S)
$P_{201}$	0	(R)
$P_{202}$	0	(R)
$P_{203}$	0	(R)
$P_{204}$	1	(S)
$P_{205}$	0	(R)
$P_{206}$	0	(R)
$P_{208}$	1	(S)
$P_{c4E1}$	1	(S)
$P_{c4E2}$	1	(S)

Tabla 7.1: Lugares con marcado inicial en LAD.

Por lo tanto, utilizando el gráfico de la Subsección 7.1, inciso (a), y la Tabla 7.1, se tiene el siguiente diagrama LAD, ver Figura 7.7, para el marcado inicial de la Red de Petri, el cual es generado a partir de la activación del botón inicio.

Figura 7.7: Traducción a LAD del marcado inicial de  $Sup(G_4)$ .

### 7.2.2. Disparo de transiciones de la planta supervisada del centro de prensado ( $Sup(G_4)$ )

El siguiente paso es traducir el disparo de las transiciones de la planta supervisada, para ello se hace uso de la Tabla 7.2, en donde se resumen los lugares de entrada y salida de cada una de las transiciones correspondientes a la red de Petri  $Sup(G_4)$ ; además se utiliza el gráfico de la Subsección 7.1, inciso (b).

Transiciones	Sensores	Lugares de entrada	Lugares de salida
$T_{200}$	*	$P_{200}$ , $P_{206}$ y $P_{C4E2}$	$P_{201}$
$T_{201}$	$s_{E/S}$ , $Ta_3 \& Gr(A)$	$P_{201}$	$P_{200}$ , $P_{208}$ y $P_{C4E2}$
$T_{202}$	$Ta_3 \& Gr(A)$	$P_{200}$ , $P_{208}$ y $P_{C4E1}$	$P_{202}$ y $P_{205}$
$T_{203}$	$s_{Pr2}$	$P_{202}$	$P_{200}$ y $P_{C4E1}$
$T_{204}$	*	$P_{203}$	$P_{204}$ , $P_{C4E1}$ y $P_{C4E2}$
$T_{205}$	*	$P_{204}$ , $P_{205}$ , $P_{C4E1}$ y $P_{C4E2}$	$P_{203}$ y $P_{206}$

\* No se cuenta con sensores

Tabla 7.2: Transiciones con sus lugares de entrada y salida.

Para poder comprender de mejor manera la traducción de las transiciones a LAD, se presenta la Figura 7.8, la cual corresponde a la traducción de la transición  $T_{200}$ . Como puede observarse (ver Tabla 7.2) la transición  $T_{200}$  puede ser disparada cuando los lugares de entrada  $P_{200}$ ,  $P_{206}$  y  $P_{C4E2}$  cuenten con marcas. Bajo el principio anterior, se observa que en LAD (ver Figura 7.8) la transición  $T_{200}$  se habilita al cerrarse los contactos normalmente abiertos, correspondientes al marcado de los lugares  $P_{200}$ ,  $P_{206}$  y  $P_{C4E2}$ , retirando sus respectivas marcas (reset (R) en LAD) y colocandola en  $P_{201}$  (set (S) en LAD).

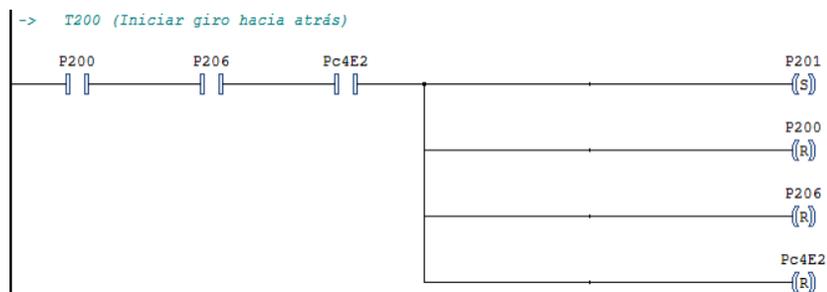


Figura 7.8: Transición  $T_{200}$  en LAD.

De manera similar, se obtiene la traducción de las transiciones  $T_{201}$ ,  $T_{202}$  y  $T_{203}$  del subsistema de la banda transportadora,  $B_{E/S}$  (Figura 7.9), y así mismo de las transiciones  $T_{204}$  y  $T_{205}$  del subsistema de la máquina de prensado No.2,  $Pr.2$  (Figura 7.10); considerando el estado de sus sensores correspondientes. Por otro lado, es necesario explicar que se utiliza un temporizador en la transición  $T_{204}$ , el cual indica que se finalizó con el maquinado. Con base a lo descrito anteriormente, finalmente se obtiene la traducción de la red de Petri de la planta supervisada  $Sup(G_4)$ .

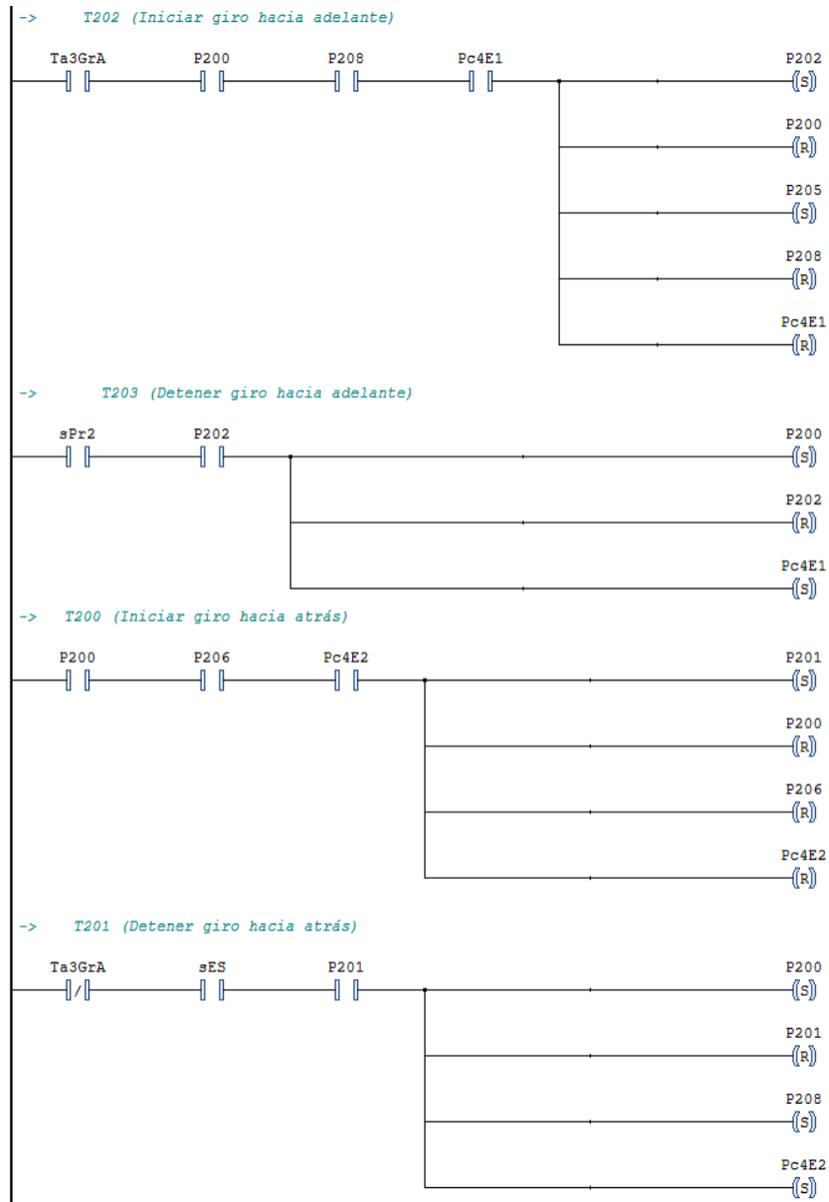


Figura 7.9: Traducción a LAD del subsistema  $B_{E/S}$ .

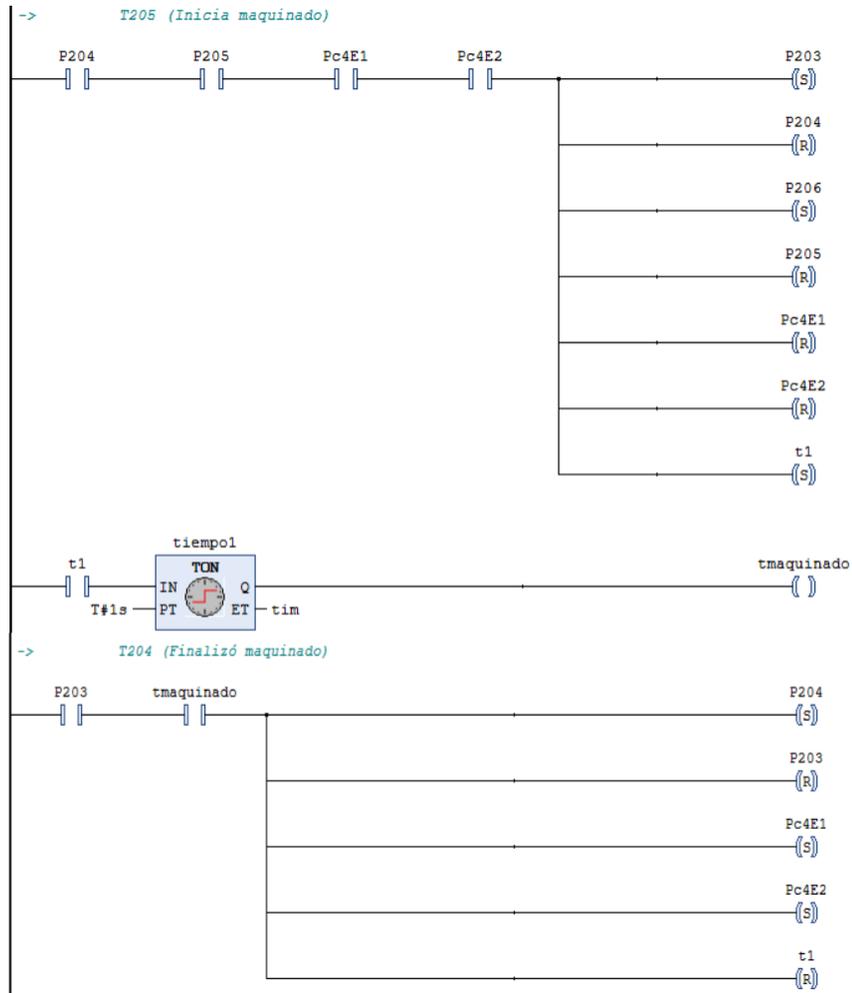


Figura 7.10: Traducción a LAD del subsistema *Pr.2*.

### 7.3. Bloques de programación

Debido a que se busca tener una lectura e interpretación rápida y clara de la programación en LAD, cada módulo de la CMF debe ser dividida en tres bloques, para explicar esto, se emplea la figura 7.11.

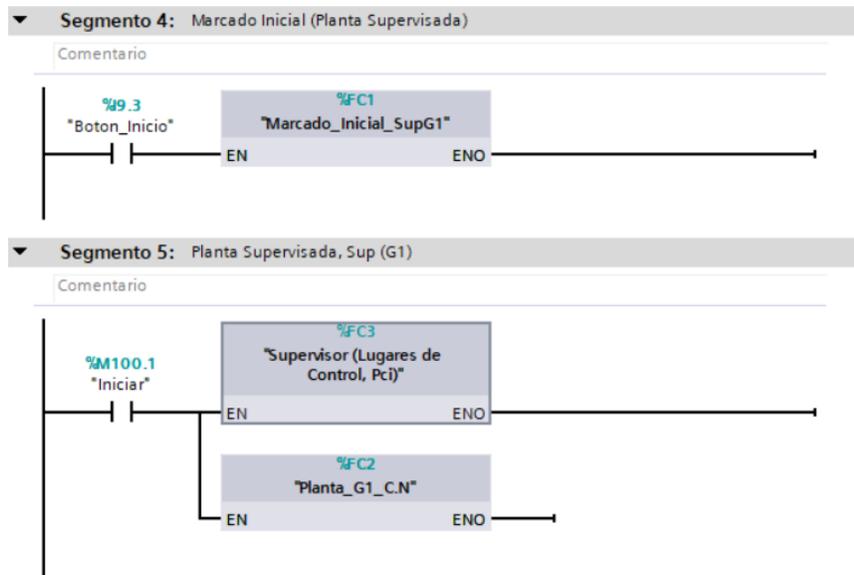


Figura 7.11: Bloques de programación para el centro neumático.

La figura 7.11 muestra los tres bloques en los cuales se implemento la red de Petri del centro neumático supervisado (figura 5.1), los cuales son: marcado inicial, planta y supervisor. Los cuales se describen a continuación.

- **Marcado inicial**

Este bloque funcional se emplea para colocar las marcas iniciales de la red de Petri de la Planta y los lugares de control. Sólo se ejecuta una vez.

- **Planta**

Este bloque funcional contiene programado en LAD, la red de Petri del centro neumático (figura 4.5). Se ejecuta de manera continua.

- **Supervisor**

En este bloque funcional se implementa el supervisor , es decir, se marcan y desmarcan los lugares de control continuamente, de tal manera que se cumplan las especificaciones de seguridad. Se ejecuta de manera continua.



## Capítulo 8

# Conclusiones y trabajo futuro

### 8.1. Conclusiones

Con el desarrollo del presente trabajo, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Los sistemas de manufactura flexible permiten incrementar la productividad, ya que se reducen los tiempos de producción manteniendo la calidad del producto, además tiene la capacidad de reconfigurarse para satisfacer las cambiantes demandas. Es por ello, que estos sistemas están siendo de gran importancia para la industria. Por lo tanto, buscar e implementar formalismos para modelar y controlar este tipo de sistemas es tema abierto de investigación.
- El modelado de sistemas de manufactura automatizados mediante redes de Petri, permite obtener una representación simple de la evolución del sistema ante la ocurrencia de eventos. Al no existir una sola metodología para modelar a los sistemas de eventos discretos, el modelo no es único, así mismo dependiera de las características que deseemos visualizar del sistema. Por otra parte, obtener un modelo a partir de modelos mas pequeños (subsistemas) permite obtener una red viva, sin embargo, no se cuenta con un software que permita realizar esta unión entre subsistemas de manera automática, lo que implica hacerlo manualmente por lo que se requiere de tiempo y paciencia.
- El diseño de un control supervisor para una red de Petri no controlada, puede realizarse de varias maneras, utilizando el arbol de accesibilidad, implementando la teoría de regiones o aplicando la propiedad de conservación e invarianza de lugares (P-invariantes). El método de los P-invariantes no requiere la construcción del espacio de estados, es computacionalmente muy efectiva y puede usarse en sistemas grandes y complejos. Además, es capaz de enfrentarse al problema de dimensionalidad, el cuál puede aparecer en los autómatas de estados finitos o en el método que utiliza el arbol de accesibilidad.

- Para diseñar un control supervisor mediante P-invariantes, se realiza primeramente la definición de especificaciones o restricciones lineales, impuestas a las marcas de la red de Petri, que representan cuestiones de seguridad del sistema. El proceso de determinar las especificaciones es muy importante ya que estas nos permiten definir un supervisor que mantenga la integridad del sistema.
- El supervisor obtenido en redes de Petri mediante P-invariantes es máximamente permisivo desde el punto de vista de posibles transiciones disparadas en la red de Petri controlada. Por ende, al modelar un sistema es importante considerar la prioridad de algún elemento o máquina, ya que esto nos permite tener un supervisor más restrictivo. Por otra parte, restricciones de secuencia y prioridad pueden ser expresados por medio de desigualdades lineales, y por lo tanto obtener lugares de control que cumplan con estas restricciones, esto se puede lograr mediante la transformación de las transiciones involucradas a lugares y transiciones nuevas, sin embargo, al ser este trabajo de tesis el primero en abordar redes de Petri, se limitó a restricciones de seguridad. Es por ello, que las restricciones de secuencia y prioridad se incluyeron en el modelado.
- La traducción de la red de Petri controlada a lenguaje escalera (LAD) se realizó mediante gráficos de traducción bien establecidos. El uso de estos gráficos permitió una traducción sencilla a LAD de la red de Petri controlada del centro neumático, facilitando su implementación. La implementación física de las redes de Petri controladas del centro de maquinados, del robot de 3 GDL y del centro de prensado están pendientes, debido al impedimento de trabajar en el laboratorio por la pandemia del 2020.
- El comportamiento obtenido en la prueba experimental realizada al centro neumático es satisfactorio y congruente con la red de Petri supervisada, ya que el funcionamiento de este módulo se encuentra restringido a las especificaciones de seguridad definidas. Por lo tanto, se espera el mismo resultado con las plantas controladas faltantes.

## 8.2. Trabajo futuro

Como trabajo futuro se proponen los siguientes puntos:

- Realizar la traducción e implementación física de las redes de Petri controladas del centro de maquinados, del robot de 3 GDL y del centro de prensado. Por restricciones de la pandemia del 2020, esta parte no fue abordada en este trabajo.
- Diseñar un controlador que permita restringir el número de piezas de entrada al centro de maquinados, cuando todos sus subsistemas tengan piezas almacenadas (Explorar la metodología de Moody y Antsaklis, para lugares de control no binarios [23]).

- Diseñar un controlador que permita controlar por completo la celda de manufactura flexible admitiendo la fabricación de distintos productos mediante recetas predefinidas.
- Poner en marcha la pantalla HMI con la que cuenta el gabinete de control, para visualizar y definir una receta de producto de manera más sencilla.
- Explorar el método de teoría de regiones, en el cuál se pueden visualizar las especificaciones mediante gráficos de redes de Petri, así mismo permite obtener un supervisor más restrictivo.



# Bibliografía

- [1] Zhou, M. y Venkatesh, K.: *Modeling, Simulation, and Control of Flexible Manufacturing Systems: A Petri Net Approach*. World Scientific Publishing, 1999.
- [2] Groover, M.P.: *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*. Prentice Hall Press, 2nd edición, 2000.
- [3] Kalpakjian, S. y Schmid, S.: *Manufactura ingeniería y tecnología*. Prentice Hall, 2002.
- [4] Dietrich, P., Malink, R., Wonham, W. y Brandin, B.: *Implementation considerations in supervisory control*. Synthesis and Control of Discrete Event Systems, volumen 185201, 2002.
- [5] Cassandras, C.G. y Lafortune, S.: *Introduction to discrete event systems*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [6] Bloom, J., Clark, C., Clifford, C., Duncan, A., Khan, H. y Papantoniou, M. : *Final report*. <http://pipe2.sourceforge.net/documents/PIPE-Report.pdf>, 2003.
- [7] Barnwell, T., Camacho, M., Cook, M., Tsouchlaris, M., Kyme, P. y Brandin, B. : *Final report*. <http://pipe2.sourceforge.net/documents/PIPE2%20Final%20Report.pdf>, 2004.
- [8] Murata, T. : *Petri nets: Properties, Analysis and application*. En *Proceedings of the IEEE*, volumen 77, No 4, páginas 541–580, April 1989.
- [9] Holloway, L.E. y Krogh, B.H. : *Syntesis of feedback control logic for a class of controllers Petri nets*. En *IEEE Transactions on Automatic Control*, volumen 35, No. 5, páginas 514–523, May 1990.
- [10] Mušič, G. y Matko, D. : *Petri nets based supervisory control of flexible manufacturing plants*. En *Prepr. 8th IFAC Symp. On large Scales Systems: Theory & Applications*, volumen 2, 1998.
- [11] Uzam, M., Jones, A.H. y Ajlouni, N. : *Conversion of Petri net controllers for manufacturing systems into ladder logic diagrams*. En *Proceedings 1996 IEEE*

- Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, volumen 2, páginas 649–655, 1996.
- [12] Foyo, S.A., Puga, E.S y Hernández, E.G.: *Modelado y Control de una Celda Automatizada de Manufactura Flexible basado en Redes de Petri*. En *Congreso Anual de la Asociación de México de Control Automático*, 2010.
- [13] Uzam, M. y Jones, A.H : *Discrete event control system design using automation Petri nets and their ladder diagram implementation*. En *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, volumen 14, páginas 716–728, 1998.
- [14] Reisig, W.: *Petri Nets: An introduction*. Springer Science & Business Media, 1985.
- [15] Hruz, B. y Zhou, M.C.: *Control of Discrete-event Dynamic Systems*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [16] Moody, J., Yamalidou, K., Lemmon, M. y Antsaklis, P.: *Feedback control of Petri nets based on place invariants*. En *Proceedings of 1994 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, volumen 53, páginas 3104–3109. Dec 1994.
- [17] Jimenez, I., Lopez, E., y Ramirez, A.: *Synthesis of ladder diagrams from Petri nets controller models*. En *Proceeding of the 2001 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC 01) (Cat. No.01CH37206)*, páginas 225–230. Sept 2001.
- [18] Rivera, L.H., Aguirre, L.I., Santoyo, A., y González, s.: *Traducción de una red de Petri a diagrama de escalera de un sistema de producción*. En *Congreso Nacional de Control Automático*, volumen 1, Oct 2013.
- [19] Rodríguez-Zúñiga, J.A.: *Modelado y control supervisor de un prototipo de celda de manufactura flexible*. Tesis de Maestría en Ciencias, Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN, México, 2018.
- [20] Hernández, A.I.: *Control jerárquico-modular de un prototipo de celda de manufactura flexible*. Tesis de Maestría en Ciencias, Departamento de Ingeniería Eléctrica, CINVESTAV-IPN, México, 2019.
- [21] Patel, D.: *Introduction practical PLC (Programmable Logic Controller)*. GRIN Verlag, 2017.
- [22] Siemens: *SIMATIC S7-1200 Programmable controller: System Manual*. Siemens, April 2012. [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/465/36932465/att\\_106119/v1/s71200\\_system\\_manual\\_en-US\\_en-US.pdf](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/465/36932465/att_106119/v1/s71200_system_manual_en-US_en-US.pdf).
- [23] Moody, J. y Antsaklis, P.: *Petri Net Supervisors for DES with Uncontrollable and Unobservable Transitions*. En *IEEE Transactions on Automatic Control*, volumen 45. Mar 2000.

## Apéndice A

# Diagrama eléctrico

A continuación se presenta el diagrama eléctrico del gabinete de control. El diseño fue realizado en el software de CAD eléctrico COFASO 7.3, de COFASO.



