



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Desarrollo e implementación de un  
algoritmo basado en RDP aplicable a  
una celda de manufactura flexible**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecatrónico**

**P R E S E N T A (N)**

Pedro Edgar Hernández Camarillo

Alfredo Daniel Ramírez Hernández

**DIRECTOR(A) DE TESIS**

MI Armando Sánchez Guzmán



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Mayo 2019



---

## AGRADECIMIENTOS

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica 2014 (PAPIIT) de la UNAM con clave de proyecto IN118314 denominado “Desarrollo de Algoritmos para la optimización de procesos de Manufactura”. Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.

Principalmente quiero agradecer a mi madre quien ha sido el pilar de todos y cada uno de mis logros y quien me ha ayudado a levantarme tras tropiezos a lo largo de mi vida, ya que sin ella nada de esto sería posible impulsándome a llegar hasta en donde hoy me encuentro.

Agradezco infinitamente a mi hermana por su apoyo incondicional, quien fue siempre mi compañera de desvelos, travesuras, risas, sueños y metas por alcanzar.

Hoy en día agradezco a la vida misma por permitirme tener a una sobrina tan maravillosa, quien le da luz, alegría y sentido a mis días, siendo el motor de nuestra familia para tratar de ser mejores día con día.

A mis abuelos que en donde quiera que se encuentren son los ángeles que me guían y cuidan de mí. Así mismo, quiero agradecer a mis tíos Martín, Oscar, Roberto, Alejandro, Angie y Paty quienes siempre han estado conmigo ante cualquier adversidad.

Al MI. Armando Sánchez Guzmán por su apoyo incondicional, paciencia y motivación brindada para la elaboración de este trabajo.



---

## INDICE

LISTA DE ABREVIATURAS	6
RESUMEN	7
ANTECEDENTES	8
PREFACIO	10
JUSTIFICACION	11
OBJETIVO	12
HIPOTESIS	13
ALCANCES	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
INTRODUCCIÓN	17
CAPÍTULO 1. MANUFACTURA, ALGORITMOS, GRAFOS Y APLICACIONES	20
1.1 Manufactura.	20
1.1 Concepto de manufactura.	20
1.2 Clasificación del sector manufacturero.	21
1.3 Procesos de manufactura.	23
1.4 Sistema de manufactura flexible.	24
1.5 Principales configuraciones de los Sistemas de Manufactura Flexible.	28
1.6 Algoritmos.	30
1.7 Definición de algoritmo.	30
1.8 Algoritmos aplicables en Sistemas de Manufactura Flexible (SMF).	34



<b>1.9 Definición de grafos.</b>	<b>36</b>
<b>1.10 Sistema de Eventos Discretos</b>	<b>38</b>
<b>CAPÍTULO 2. MANUFACTURA, REDES DE PETRI Y APLICACIONES.</b>	<b>41</b>
<b>2.1 Modelado de procesos a partir de Redes de Petri.</b>	<b>42</b>
<b>2.1.2 Recursos compartidos.</b>	<b>43</b>
<b>2.2 Redes de Petri.</b>	<b>43</b>
<b>2.3 Definición de Redes de Petri.</b>	<b>45</b>
<b>2.4 Redes de Petri (representación gráfica).</b>	<b>46</b>
<b>2.5 Simbología, reglas y estructuras básicas en una RdP.</b>	<b>48</b>
<b>2.6 Estructuras de las RdP.</b>	<b>49</b>
<b>2.7 Redes de Petri (definición formal).</b>	<b>53</b>
<b>2.8 Comportamiento de las Redes de Petri.</b>	<b>54</b>
<b>2.9 Propiedades de las Redes de Petri</b>	<b>55</b>
<b>2.9.1 Propiedades de comportamiento de las RdP.</b>	<b>55</b>
<b>2.9.2 Propiedades Estructurales de las Redes de Petri.</b>	<b>58</b>
<b>2.10 Análisis de redes de Petri.</b>	<b>59</b>
<b>2.11 Árbol de Cobertura (o Alcanzabilidad).</b>	<b>59</b>
<b>2.12 Ecuaciones matriciales.</b>	<b>60</b>
<b>2.13 Aplicaciones de las RdP.</b>	<b>62</b>
<b>2.14 Redes de Petri aplicadas a manufactura.</b>	<b>63</b>
<b>2.15 Tipos de redes de Petri.</b>	<b>63</b>



<b>2.15 Redes de Petri Coloreadas.</b>	<b>64</b>
<b>2.16 Redes de Petri Temporizadas.</b>	<b>65</b>
<b>2.17 Representación de redes de Petri en SMF.</b>	<b>67</b>
<b>CAPÍTULO 3. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO A PARTIR DE RDP SOBRE LA CMF DE LA UNAM.</b>	
<b>3.1 Consideraciones particulares de la celda de manufactura flexible de la UNAM.</b>	<b>70</b>
<b>3.2 Configuración y descripción de los elementos alojados en la CMF.</b>	<b>71</b>
<b>3.3 Limitantes del sistema.</b>	<b>76</b>
<b>3.4 Aplicación de la herramienta HP Sim<sup>®</sup></b>	<b>76</b>
<b>3.5 Modelado del Sistema</b>	<b>77</b>
<b>3.6 Simulación en HP Sim<sup>®</sup>.</b>	<b>78</b>
<b>3.7 Simulación en Promodel<sup>®</sup>.</b>	<b>111</b>
<b>3.8 Criterios para la ejecución de simulación mediante software HPSim<sup>®</sup>.</b>	<b>112</b>
<b>3.9 Confrontación de simulación en HPSim<sup>®</sup> y automatización mediante PLC's.</b>	<b>118</b>
<b>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.</b>	
<b>4.1 Conclusiones.</b>	<b>119</b>
<b>4.2 Análisis de resultados.</b>	<b>120</b>
<b>4.3 Trabajos a futuro.</b>	<b>121</b>
<b>Red de Petri bajo el Software HP Sim<sup>®</sup>.</b>	<b>122</b>
<b>Diagrama de flujo correspondiente a la RdP de la CMF.</b>	<b>123</b>
<b>Bibliografía.</b>	<b>124</b>



---

## LISTA DE ABREVIATURAS

**RDP:** Redes de Petri

**FMS / SMF:** Flexible Manufacturing System (Sistema de Manufactura Flexible)

**CMF:** Celda de Manufactura Flexible

**FIFO:** First Input First Output (Primero en entrar, primero en Salir)

**CNC:** Computer Numerical Control (Control numérico computarizado)

**PLC:** Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable)



---

## RESUMEN

En el presente trabajo de tesis, se describirá detalladamente el modelo, desarrollo e implementación de un algoritmo aplicado a la Celda de Manufactura Flexible (CMF) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, basado principalmente en Redes de Petri (RdP), y fue implementado mediante la programación de un controlador lógico programable (PLC) a partir de una previa reintegración del sistema por compañeros del equipo de trabajo. El sistema modelado se ocupa con fines didácticos dentro de la institución para la manufactura de piezas de ajedrez.

Por otro lado, en este documento se podrá consultar sobre las técnicas y consideraciones realizadas para alcanzar los objetivos fundamentales del proyecto, así como las distintas simulaciones por medios computacionales que llevaron a la implementación física del sistema, cabe señalar que fue necesario dividir el trabajo en diferentes etapas para la conceptualización de procesos, planteamiento y diseño del algoritmo, así como la ejecución de los mismos.

Actualmente debido a los grandes avances que se han producido en el ámbito industrial, nacen los sistemas de eventos discretos concurrentes, cuyo modelamiento y análisis matemático se realiza a través de herramientas con bases matemáticas sólidas, una de ellas son las redes de Petri.

Para el desarrollo de la presente investigación se ha utilizado una metodología bibliográfica y analítica, que permitirá analizar de qué manera contribuyen las redes de Petri en aplicaciones de automatización industrial para lograr el modelado de sistemas de eventos discretos (SED) y algoritmos de control, que permita la simulación, validación y generación de código para autómatas programables en un CMF a escala y con fines escolares.



---

## ANTECEDENTES

La facultad de ingeniería a lo largo de su historia se ha caracterizado por su amplio campo de conocimientos y disciplinas que en ella se imparten. Lo cual, ha dado como resultado una formación integral a sus alumnos, ya que la facultad ha estado actualizándose frecuentemente para ofrecer un conocimiento sobre nuevas tecnologías y métodos empleados en el campo laboral, principalmente en la industria.

Sin embargo, existen áreas dentro de la facultad en donde distintos factores han imposibilitado la puesta en práctica de lo visto de manera teórica dentro las aulas, esto debido a que por falta de mantenimiento al equipo o por falta de este, no exista disponibilidad, y por tanto posibilidad de ilustrar de manera práctica los procesos o métodos vistos en las aulas, provocando que esto sólo se logre observar únicamente mediante software de simulación.

En el laboratorio de manufactura avanzada se tiene un problema similar al anteriormente descrito, ya que cuenta con un SMF (Sistema de Manufactura Flexible), el cual fue adquirido a la empresa *ESHED ROBOTICS* en 1989. El equipo se adquirió y fue diseñado para la enseñanza académica con el fin de dar a los estudiantes una herramienta, la cual permitiría adquirir conocimientos sobre sistemas eficientes de manufactura y optimización de procesos de producción.

El SMF cumplió con los objetivos principales de enseñanza a los alumnos, pero con el transcurso del tiempo el sistema se fue deteriorando llegando a una etapa de funcionalidad nula, debido al desgaste de sus componentes y a la falta de mantenimiento, causado por la desaparición de la empresa *ESHED ROBOTICS* en los años 90.





---

A partir del año 2014 alumnos y profesores del área de manufactura decidieron retomar esa enseñanza académica, por lo cual se propusieron y ejecutaron proyectos, los cuales tuvieron como objetivo reintegrar el SMF utilizando todos los dispositivos que lo conforman con una nueva red de controladores lógicos programables (PLC's). Así mismo, se renovaron las conexiones y los procesos de comunicación de los diferentes componentes, además de que se programaron las tareas a ejecutar por el SMF.

Actualmente, el sistema se encuentra en una etapa de reintegración y operando bajo condiciones que lo llevan a no ser considerado al 100% como un sistema de manufactura flexible (SMF), este será clasificado como una CMF (Celda de Manufactura Flexible), debido a que cuenta con dos estaciones de trabajo y para ser considerado como SMF requeriría albergar cuatro o más estaciones de proceso conectadas mecánicamente por un mismo sistema de manejo y electrónicamente por un sistema computacional , lo anterior es en base a las definiciones y diferencias dadas por el autor Groover en su libro "Fundamentos de manufactura moderna".

Es necesario recalcar al lector que a partir de los capítulos III y IV se manejará bajo el concepto de CMF, siendo de fundamental importancia para el tratamiento y desarrollo del presente trabajo de tesis.



---

## PREFACIO

Debido a la existencia de la paulatina competencia a nivel mundial entre las empresas en diversos sectores productivos se ha creado la necesidad de nuevos sistemas capaces de realizar el control y supervisión de los procesos de producción a través de la integración de la información y la automatización de las estaciones de producción. Es por eso, que la creciente demanda del mercado debe ser satisfecha por las empresas en sus líneas de producción para así evitar el riesgo de llegar a ser menos competitivas.

Por lo tanto, la adopción de nuevos conceptos de producción, en combinación con la aplicación de tecnologías emergentes, es la respuesta a la necesidad de una mejora de la productividad y de la calidad, para la correspondiente disminución de costos y tiempos de entrega.

En la actualidad, los sistemas de fabricación independientemente de su tamaño tienen que ser capaces de funcionar en entornos dinámicos, ajeno a que posean de recursos limitados o ilimitados, asignando instalaciones de producción de actividades paralelas en el tiempo, respetando las limitaciones operacionales y los plazos, así como tratar de mantener los costos de recursos lo más bajos posible.

Es por ello, que en el presente trabajo de tesis se tiene como objetivo fundamental la aplicación de un algoritmo adaptable a la celda de manufactura flexible (CMF) ubicada en el laboratorio de manufactura avanzada de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, el cual estará diseñado bajo la técnica de las Redes de Petri con la finalidad de alcanzar una asignación eficaz de los recursos albergados en la celda de manufactura realizando una ejecución en paralelo de los procesos de torneado y fresado empleando recursos compartidos.



---

## JUSTIFICACION

En la facultad de ingeniería en el laboratorio de manufactura avanzada, se localiza una celda de manufactura flexible, la cual consta principalmente de un panel de control, cuatro brazos robóticos, una banda transportadora, un almacén rotatorio, y dos máquinas de control numérico (CNC) y una estación de ensamble, posteriormente, en el capítulo 3 se hablará más a detalle sobre la descripción y especificaciones de cada uno de los componentes de la CMF.

La celda descrita con anterioridad carece de la existencia de un método, técnica o herramienta, tal que permita la ejecución de manera simultánea o paralela de los dos procesos de producción que se encuentran alojados en esta, los cuales son los centros de maquinado de fresado y torneado.

Así mismo, la CMF, requiere de una utilización adecuada de los recursos del sistema, lo cual, ha llevado a la tarea del presente trabajo de tesis la elaboración, desarrollo e implementación de un algoritmo basado en RdP, en donde se lleve a cabo la ejecución de los dos procesos en paralelo, ocupando de los recursos compartidos.

La utilización de la técnica de RdP es debida a que con éstas se logra acortar el tiempo entre la simulación y el análisis de un SMF, permitiendo eficientar el tiempo de modelación al observar el proceso como un sistema de eventos discretos como lo menciona [Murillo], así mismo, hace referencia a que las RdP permiten predecir y mejorar rutas, sincronizar operaciones y tener una visión practica de los requerimientos del sistema, siendo éste un factor importante al encontrarnos en una etapa de reintegración de la celda de manufactura dándole importancia desde el punto de vista de la ingeniería mecatrónica dada la interrelación entre el diseño de la red, el análisis y la programación de PLC's.



---

## OBJETIVO

El principal objetivo del presente trabajo de tesis, es llevar a cabo el desarrollo e implementación de un algoritmo, basado fundamentalmente en los principios de las Redes de Petri, con la finalidad de que la celda de manufactura flexible (CMF) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, lleve a cabo una ejecución en paralelo en la elaboración de procesos de torneado y fresado, así como las demás tareas que le sean asignadas por el programador de la producción, así mismo, se tiene considerada la utilización de recursos (brazos robóticos, banda transportadora) y herramientas (estaciones de trabajo CNC torno y fresa) ofrecidas por el sistema, bajo la teoría de grafos de RdP para la conceptualización, modelo y solución a la elaboración de dos procesos de manera simultánea empleando recursos compartidos en el sistema de producción, el cual, es empleado para fines educativos dentro de la institución.



---

## **HIPOTESIS**

A partir de la conceptualización y modelo de la celda de manufactura flexible de la Facultad de Ingeniería UNAM en el software HP Sim ®, es posible obtener una asignación eficaz de los recursos, es decir, que se deberá emplear cada una de las herramientas albergadas en el sistema, con la finalidad de que se lleve a cabo una producción en donde se emplee el uso de los recursos compartidos y se ejecuten procesos concurrentes, para obtener así una elaboración de procesos paralelos independientemente de las limitaciones que pueda presentar el sistema.

## **ALCANCES**

Mediante la conceptualización y modelo de la celda de manufactura flexible de la Facultad de Ingeniería UNAM a través del software HP Sim ® se hará una implementación física sobre el CMF, a partir de una reprogramación en los procesos a ejecutar por el mismo, siguiendo las consideraciones y funciones lógicas empleadas para la realización del algoritmo, todo ello con la finalidad de que se tenga una mejora en la ejecución de las tareas asignadas por el programador en donde se aprovechen eficazmente las herramientas que alberga el sistema y se ejecuten los procesos de torneado y fresado de manera simultánea.



---

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de las principales problemáticas dentro de la celda de manufactura flexible (CMF) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, es la ejecución de los procesos de torneado y fresado de manera independiente, es decir, que el operario debe estar al tanto de las operaciones de manufactura que se realizan, así como en tomar decisiones en la ejecución de las tareas, lo cual, genera conflictos en el suministro de materia prima al pasar de un proceso a otro, así mismo, al contar con un operario para la toma de decisiones, rompería con el concepto de celda de manufactura flexible establecido por Mikell P. Groover en 1990, en donde se dejaría a un lado la parte de la toma de decisiones ejecutadas por el sistema mismo de manera autónoma.

Lo anteriormente descrito, es debido a que dispositivos periféricos y controladores de robots eran obsoletos, es por ello, que en el año 2014 – 2015 se realizó el levantamiento de los requerimientos para la reintegración de la Celda obligando a la necesidad del diseño de un método de trabajo sistematizado regido por un algoritmo mediante Redes de Petri que brinde una ejecución en paralelo de los procesos mediante una simulación por software.

Por lo anterior, la selección y uso de la técnica de Redes de Petri en el desarrollo del presente trabajo frente a otras herramientas de la ingeniería fueron dados por su adaptabilidad a la modelización de los procesos y sistemas dinámicos, así como su flexibilidad en cuanto a semántica y su facilidad de representación gráfica para ser implementadas posteriormente en los controladores lógicos programables albergados en la CMF.



---

Para comprender la dinámica de un determinado proceso se recurre a realizar modelos matemáticos, con la finalidad de obtener un conjunto de funciones matemáticas que brinden la posibilidad de representar de una manera aproximada, el comportamiento del sistema.

Al modelo matemático se le considera como el principal punto de partida para el estudio de cualquier proceso industrial, dicho modelo se puede realizar por representación matemática (función de transferencia) y la representación gráfica (diagrama de bloques).

Debido al avance tecnológico y a la demanda productiva en el sector industrial diariamente nace la necesidad de incrementar la productividad de la empresa, minimizando los costes de producción y mejorando la calidad de la misma, es ahí donde el modelo matemático clásico no es una herramienta adecuada debido a las limitaciones que posee al momento de actuar sobre sistemas complejos. Como es el caso de los sistemas de manufactura flexible (SMF), en donde un modelo matemático se torna complicado, debido a que se trata de sistemas que trabajan en conjunto, integrando todos los elementos que conforman a una industria.

Para lograr comprender totalmente la dinámica que rige al sistema se requiere modelar, analizar, diseñar, validar algoritmos, realizar pruebas y procedimientos de automatización para cumplir retos cada vez más complejos, como la resolución de problemas de sincronización e interacción entre las máquinas automatizadas y evitar que se produzcan colisiones en el sistema.



Para alcanzar el análisis de sistemas industriales automatizados es necesario utilizar las distintas herramientas que permiten realizar la representación de modelos de sistemas de eventos discretos, tales como Gráfica de Transición de Estado, Redes de Petri y el Gráfico Funcional de Etapa-Transición (GRAFCET), siendo este último un método que se fundamenta en las Redes de Petri dado su comportamiento de vivacidad y con estados binarios.

Para lograr dicha representación del modelo se eligieron las Redes de Petri debido a la importancia desde el punto de vista Mecatrónico de visualizar los posibles errores del planteamiento de la red, así como su comportamiento dinámico mediante la simulación en el software HP SIM para poder llevar la red al lenguaje de escalera admitido por los PLC's, en donde éstos serán quienes gobiernen las acciones de los sistemas mecánicos en la CMF.

Con el paso del tiempo, los procesos industriales se vuelven cada vez más complejos y los sistemas de eventos discretos concurrentes aparecen con mayor frecuencia en el área industrial. Para lograr determinar el comportamiento dinámico de este tipo de sistemas, se propone utilizar la herramienta de redes de Petri, las cuales, en el ámbito industrial son utilizadas como método para el diseño tanto del proceso industrial como para controladores lógicos programables, como lo expone [Murillo, 2008] en su artículo científico "Redes de Petri: Modelado e implementación de algoritmos para autómatas programables".





---

## INTRODUCCIÓN

En diversos sectores productivos, la programación de actividades reviste especial importancia por incidencia en la productividad y en la competitividad de las empresas. De manera general, el problema de la programación de la producción que se estudia en el presente trabajo de tesis corresponde a los sistemas de manufactura flexible (SMF), los cuales deben adaptarse rápidamente para producir gran diversidad de clases de productos en pequeñas y medianas cantidades. A lo largo del primer capítulo, se estudiarán los conceptos fundamentales que conllevan a la conceptualización de los sistemas de manufactura flexible, así como algunos algoritmos aplicables a este tipo de sistemas, de los cuales será empleado el de Redes de Petri (RdP) en el desarrollo del presente trabajo. A raíz de los avances tecnológicos se han alcanzado niveles de desarrollo considerables, por lo cual, el ser humano se ve en la necesidad de investigar y realizar nuevos descubrimientos, representando un desarrollo sustancial en todas las áreas tecnológicas existentes.

Una de las áreas que ha presentado mayor nivel de impacto en cuanto a mejoras significativas en los últimos años ha sido el área industrial, surgiendo nuevos sistemas dinámicos que ejecutan varias tareas a la vez, en donde la coordinación y sincronización de acciones es vital, aumentando su complejidad al momento de modelar y analizar el sistema, a estos nuevos sistemas se los denomina sistemas de eventos discretos, los cuales tienen la particularidad de que los cambios de estado de sus variables se realizan en puntos discretos del tiempo accionados por eventos.



---

Un sistema de eventos discretos tiene características que lo definen como un sistema dinámico (Castellanos Arias, Solaque Guzmán, 2010), en el cual se integran todos los elementos que conforman a una industria para que trabajen en conjunto. Es en ese momento en donde, utilizar los métodos de modelamientos matemáticos clásicos no representan una herramienta adecuada debido a las limitaciones que posee al actuar sobre sistemas complejos.

Debido a que los modelamientos matemáticos clásicos no permiten analizar sistemas discretos concurrentes, nace la necesidad de utilizar una herramienta formal matemática capaz de modelar, analizar y simular este tipo de sistemas.

Durante la realización del presente trabajo se pretende analizar la funcionalidad de la implementación de las redes de Petri en aplicaciones de automatización industrial para el modelado de sistemas de eventos discretos y algoritmos de control, que permita la simulación, validación y generación de código para controladores lógicos programables, en particular de la CMF de la UNAM, la cual ha sido reintegrada recientemente con la actualización de sus controladores.

Actualmente existen varias herramientas que brindan la posibilidad de modelar las propiedades y la dinámica que poseen los sistemas de eventos discretos. Uno de los formalismos más utilizados para la representación, análisis y simulación de estos sistemas, son las redes de Petri, desarrolladas por Carl Adams Petri en el año 1960.

Una red de Petri es un lenguaje formal y gráfico con una sólida base matemática que permite realizar el modelado y análisis cuantitativo de distintos sistemas complejos realizando una descripción detallada y precisa del comportamiento del mismo, de esta manera se logra predecir y realizar mejoras en las rutas, así como la sincronización de operaciones (Murata, 1989).



La base principal del presente trabajo es el desarrollo del CMF de la UNAM a través de las redes de Petri, de esta manera se pretende obtener la simulación y el análisis del funcionamiento del sistema para comprobar el cumplimiento de algunas de sus propiedades utilizando el software HPSIM.

Finalmente, es necesario recalcar, que la utilización del software HPSIM ® fue basado a una consulta previa en la literatura acerca de softwares para el diseño y simulación de RdP, encontrando que el Modelo Sistemático de Calidad (MOSCA) es una herramienta para la estimación de la calidad de los sistemas de software que garantiza la relación sinérgica entre las características de la empresa y las necesidades del usuario, de tal manera de guiar el proceso de evaluación y garantizar la calidad sistémica, dado que los Sistemas de Software pueden ser considerados como productos o servicios que responden a las características propias de cada organización y/o negocio y a las necesidades de sus consumidores.[1.5]

A continuación, se muestra un comparativo de distintos softwares para el manejo de RdP, siendo HPSIM la herramienta que ofrece usabilidad (es la medida de la calidad de la experiencia que tiene un usuario cuando interactúa con un producto o sistema) y eficiencia (característica principal se refiere a la capacidad del producto de software para proporcionar un desempeño apropiado, en relación con la cantidad de recurso utilizado, bajo condiciones establecidas en determinado momento del tiempo).[1.6]

	Funcionalidad	Usabilidad	Eficiencia
DiaGen	√		
HPsim		√	√
Snoopy	√		√
TINA	√		√
MATLAB	√		√

Cuadro comparativo de cinco tipos de software de simulación de RdP.



---

## **CAPÍTULO 1. MANUFACTURA, ALGORITMOS, GRAFOS Y APLICACIONES**

### **1.1 Manufactura.**

La manufactura refiere a la transformación de la materia prima en producto, el cual, al ser ya un producto terminado tiene la capacidad de satisfacer las necesidades del hombre independientemente del uso afín del producto. Es conocida también por el término de industria secundaria, aunque cabe recalcar que algunas industrias como las manufacturas de semiconductores o de acero emplean el término de fabricación.

### **1.1 Concepto de manufactura.**

El concepto de manufactura conlleva a una serie de discusiones y puntos de vista diferentes, ya que éste puede conceptualizarse desde las perspectivas económicas y tecnológicas. Es por ello, que, en el presente trabajo, se le describe bajo un punto de vista tecnológico como el uso de procesos físicos y químicos realizados con la finalidad de alterar geométricamente algunas de las propiedades o apariencias de un material para hacer de éste piezas o productos terminados. En lo que refiere a un punto de vista económico, se le puede describir como la transformación de materiales en artículos de mayor valor agregado tras ser puestos en una o varias operaciones de procesamiento.

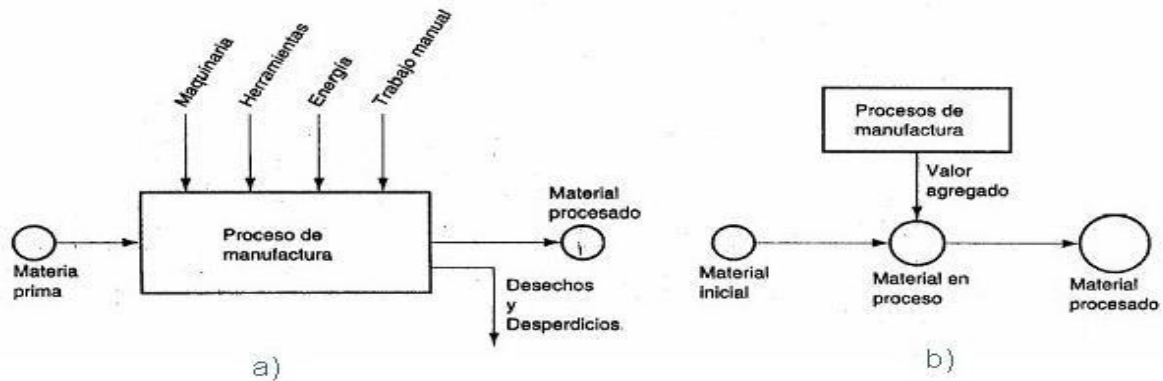


Figura 1. Definición de manufactura (a) como un proceso técnico - tecnológico y (b) como un proceso económico. [1.3]

## 1.2 Clasificación del sector manufacturero.

La industria manufacturera está compuesta por empresas dedicadas a la producción de bienes y servicios, y estas a su vez se pueden clasificar en:

**Primarias:** Las cuales se dedican al cultivo o explotación de los recursos naturales.

**Secundarias:** Las cuales ocupan del producto obtenido de la clasificación primaria y lo transforman en bienes para el consumidor o de capital.

**Terciarias:** Éstas constituyen el sector de servicio de la economía, las cuales a su vez se subdividen en:

### **Productos manufacturados**

**Bienes de consumo:** los que son adquiridos directamente por el consumidor (Ejemplo: autos, computadoras personales, televisores, maquinaria, etc.)

**Bienes capitales:** los que son adquiridos por compañías para proveer servicios o producir productos (Ejemplo: aviones, equipo de construcción, computadoras, etc.)



---

**Cantidad de producción y variedad de producto:** éstas serán dependientes del número de unidades a producir en determinado tiempo, principalmente por año y a su vez subdivididas en tres grupos:

- Producción baja: La cual oscilara entre 1 y 100 unidades anuales.
- Producción mediana: La cual oscilara entre 100 y 10 000 unidades anuales.
- Producción alta: La cual sobrepasara las 10 000 unidades anuales.

Es por ello que de acuerdo a la subdivisión anterior decimos que la cantidad de producción juega un papel importante en la toma de decisiones, desde la selección del equipo utilizado, así como los procesos mismos a desarrollar para la elaboración del producto.

**Por los materiales empleados en la manufactura:** Se presenta en donde los materiales influyen en las decisiones sobre la selección del equipo y proceso para producir un producto. Existen tres tipos básicos de materiales [1]:

- *Metales*, siendo las aleaciones las más utilizadas en la manufactura, las cuales están compuestas de dos o más elementos en donde al menos uno es metálico; estos a su vez pueden dividirse en ferrosos y no ferrosos.  
Los ferrosos se basan en el hierro; incluye acero y hierro colado. Los no ferrosos comprenden los otros elementos metálicos y sus aleaciones, incluyen metales puros tales como el aluminio, oro, magnesio, níquel, plata, titanio, etc.
- *Cerámicas*, se definen como un compuesto que contiene elementos metálicos (o semimetálicos) y no metálicos.



- *Polímeros*, se define como un compuesto formado por repetidas unidades estructurales llamadas meros cuyos átomos comparten electrones para formar moléculas muy grandes. Estos a su vez se dividen en tres categorías:
  - 1) Polímeros termoplásticos: estos pueden someterse a múltiples ciclos de enfriamiento y calentamiento sin alterar sustancialmente la estructura molecular del polímero. Algunos de estos son: polietileno, poli estireno, cloruro de polivinilo y nylon.
  - 2) Polímeros termofijos: estas moléculas se transforman químicamente en una estructura rígida cuando se enfrían después de una condición plástica por calentamiento. Algunos de ellos son las resinas fenólicas y resinas epóxicas.
  - 3) Elastómeros: estos polímeros exhiben un comportamiento elástico importante. En esta categoría se encuentra el hule natural, el neopreno y las siliconas.

### **1.3 Procesos de manufactura.**

Los procesos de manufactura pueden dividirse en dos tipos básicos: 1) operaciones de proceso, y 2) operaciones de ensamble. Una operación de proceso transforma un material de trabajo de una etapa a otra más avanzada, que lo sitúa cerca del estado final deseado para el producto. Esto le agrega valor al cambiar de geometría, las propiedades o la apariencia del material inicial. Por lo general, las operaciones de proceso se ejecutan sobre partes discretas de trabajo, pero algunas de ellas se aplican también a artículos ensamblados. Una operación de ensamble une dos o más componentes para crear una nueva entidad llamada ensamble o sub-ensamble. [1]



---

## 1.4 Sistema de manufactura flexible.

De acuerdo con la definición de Mikell P. Groover en 1990 [1], un Sistema de Manufactura Flexible consiste en un grupo de estaciones de procesamiento, predominantemente máquinas-herramientas CNC, controladas por un computador, las cuales pueden procesar un grupo de trabajos. El sistema cuenta con un manejo de inventario en proceso y de materia prima controlada por computador, lo que permite balancear dinámicamente la utilización de los recursos y que el sistema se adapte automáticamente a los cambios en la producción, en la mezcla de productos y en los niveles de producción.

Lo que da su nombre al Sistema de Manufactura Flexible FMS (Flexible Manufacturing System), es su capacidad de procesar una variedad de diferentes tipos de piezas simultáneamente bajo un programa de control numérico NC en varias estaciones. Se le denomina como flexible porque cuenta con la capacidad de procesar varios productos y cantidades de producción que pueden ser ajustadas en respuesta a los comportamientos de la demanda, además de contar con la capacidad de identificar y distinguir entre las diferentes partes o productos procesados por el sistema, así mismo brinda una respuesta lo suficientemente rápida al cambio de las instrucciones de operación.

Una Celda de Manufactura Flexible (CMF, por sus siglas en Inglés) es un módulo de los sistemas de Manufactura Flexible FMS (Flexible Manufacturing System), y constituye un arreglo de máquinas, ya sea de mecanizado o ensamble, el cual atiende un propósito particular, proporcionando flexibilidad en cuanto a diferentes rutas que puede tomar la materia prima a procesar o semi-procesada entre las diversas estaciones de trabajo, diferentes combinaciones de estaciones usadas para ejecutar operaciones simples, variedad de tamaños, formas y calidades que puede producir y ensamblar. Una CMF es un sistema de producción que atiende gamas de tamaño de lote y variedad de piezas, intermedias entre el taller convencional y los centros de Mecanizado.





Una CMF puede estar conformada por dos o más máquinas CNC, almacenes (de materia prima, de producto semi terminado y producto acabado), sistemas de visión, sistemas de cambio automático de herramientas, brazos robóticos, sistemas de transporte entre estaciones y un PC desde dónde se programa, supervisa y controla la operación de la Celda para la ejecución de los procesos.

La flexibilidad de un sistema de manufactura está definida como la capacidad de una entidad para desplegar y replegar sus recursos de forma eficaz y eficiente en respuesta a las condiciones vulnerables, tales como, la demanda, el suministro, los productos, procesos y equipamiento en las líneas de producción.

Algunos de los principales objetivos de un Sistema de Manufactura flexible son:

- 1) Incremento de la utilización del equipo y capital.
- 2) Reduce al inventario en proceso y el tiempo de preparación.
- 3) Reduce substancialmente el tiempo de ciclo.
- 4) Reducción de inventario y pequeños lotes.
- 5) Reducción de fuerza de trabajo.
- 6) Facilidad para adaptarse rápidamente a los cambios de diseño.
- 7) Consistencia en la calidad.
- 8) Reducción del riesgo como resultado del fracaso de un producto.
- 9) Control gerencial conciso.
- 10) Reduce el requerimiento de espacio en el piso de producción.



Los SMF, pueden ser catalogados por el número de máquinas:

✓ Celda de una sola maquina:

Consiste en un centro de maquinado CNC combinado de un sistema de almacenamiento de partes para la operación sin atender. Puede ser diseñada para operar por lotes o en modo flexible o una combinación de ambas. [1.1]

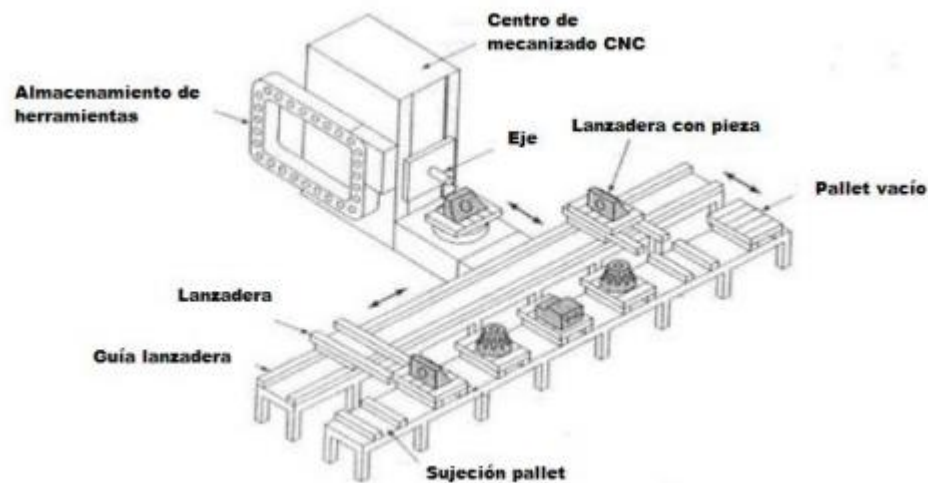


Figura 2. Celda de una sola maquina [1.1]

✓ Celda flexible de manufactura:

Consiste en dos o tres estaciones de procesamiento (típicamente centros de maquinado CNC) más un sistema de manejo de materiales. El sistema de manejo de partes está conectado a la estación de carga y descarga. [1.1]

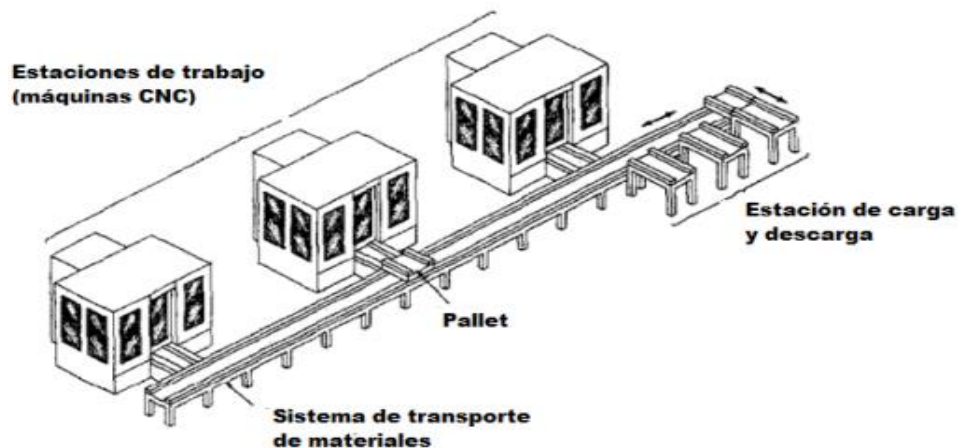


Figura 3. Celda flexible de manufactura [1.1]



✓ Sistema flexible de manufactura:

Cuenta con cuatro o más estaciones de procesamiento conectadas mecánicamente por un sistema de manejo de partes y electrónicamente por un sistema de cómputo distribuido. [1.1]

Gráficamente puede ser visualizada la flexibilidad de un sistema de manufactura en función del volumen de producción y el número de máquinas albergadas en el sistema per se.

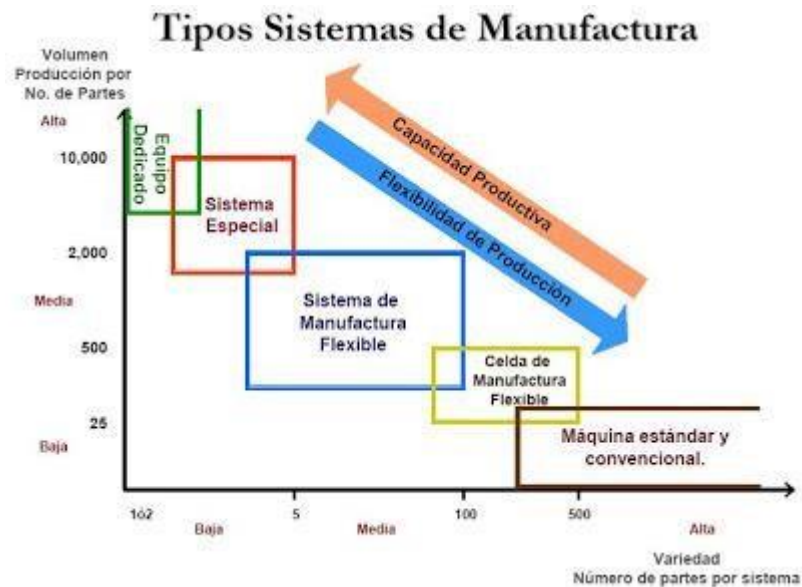


Figura 4. Flexibilidad de los sistemas de manufactura. [1.3]

## 1.5 Principales configuraciones de los Sistemas de Manufactura Flexible.

### ✓ Configuración en línea:

El diseño en línea usa un sistema de transferencia lineal para mover las piezas entre las estaciones de procesamiento y las estaciones de carga/descarga. Generalmente tiene capacidad de movimiento bidireccional. [1.4]

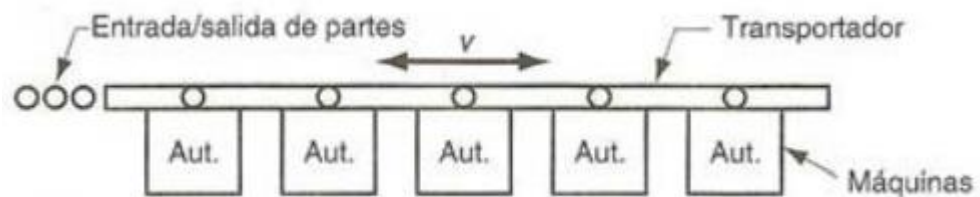


Figura 5. Configuración en línea de un SMF [1.4]

### ✓ Configuración en escalera:

En la configuración en escalera, las estaciones de trabajo automatizadas se ubican en peldaños. Esta configuración permite cualquier secuencia de procesamiento debido a que es posible acceder a cualquier estación desde otra. [1.4]

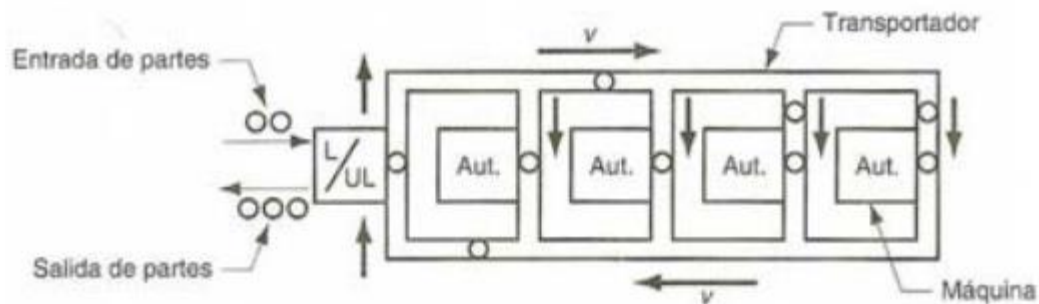


Figura 6. Configuración en escalera de un SMF. [1.4]



✓ Configuración en U:

Es un arreglo de personal, maquinas, materiales y métodos con los pasos de los procesos puestos uno junto a otro a través del cual las partes son procesadas en un flujo continuo en orden secuencial. Normalmente en forma de “U” se permite el flujo de una sola pieza y la asignación de personal de forma flexible mediante el concepto de habilidades múltiples. [1.4]



Figura 7. Configuración en U de un SMF. [1.4]

✓ Configuración en ciclo:

Consiste en un transportador o ciclo con estaciones de trabajo ubicadas en su periferia. Esta configuración permite cualquier secuencia de procesamiento, debido a que es posible acceder a cualquier estación desde otra. [1.4]

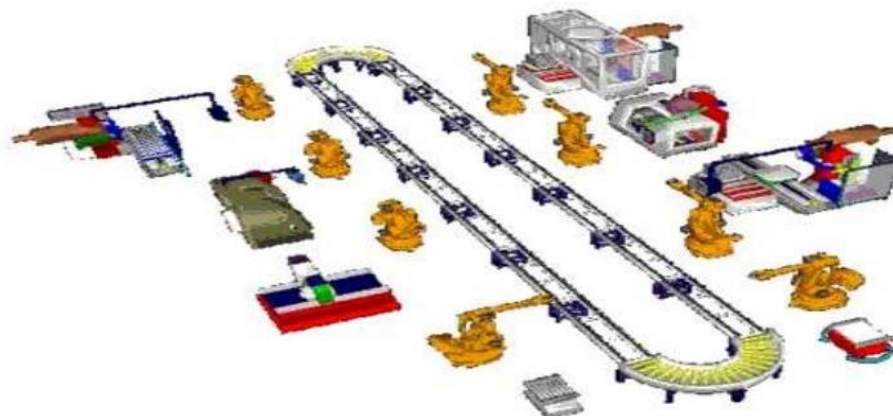


Figura 8. Configuración en ciclo de un SMF. [1.4]



---

## 1.6 Algoritmos.

En la vida cotidiana se presentan una gran cantidad de problemas, por lo que el ser humano se ha visto en la necesidad de buscar alternativas que lleven a una solución adecuada. En la industria se presentan problemas los cuales deben ser analizados y estudiados detalladamente para encontrar la mejor solución, por lo tanto, al ofertarse un producto o un servicio, se debe tener como objetivo satisfacer la demanda de los clientes, por dicho motivo la solución tiene que beneficiar a las dos partes involucradas oferta y demanda, es decir industria y cliente.

Una alternativa para la solución de cualquier tipo de problemas incluyendo los que se presentan en la industria es la utilización e implementación de algoritmos.

## 1.7 Definición de algoritmo.

Un algoritmo se define como una secuencia de instrucciones que representan un modelo de solución para determinado tipo de problemas. [2]

Para la realización de un programa es conveniente el diseño o definición previa de un algoritmo, siendo éste la infraestructura de cualquier solución, para posteriormente ser escrito en un lenguaje de programación, en el caso particular del presente trabajo de tesis se transcribirá a lenguaje de escalera o Ladder.

Para representar un algoritmo se debe utilizar algún método gráfico o numérico, que permita que las instrucciones sean independientes de la sintaxis de cualquier lenguaje de programación con el objetivo de que su codificación sea adaptable al lenguaje deseado.

Los métodos más frecuentes para dicha representación:

- Diagrama de flujo
- Diagrama estructurado o N-S (Nassi Schneiderman)
- Pseudocódigo



Para explicar todo lo que conlleva un algoritmo se presenta el siguiente diagrama el cual representa tres partes de un sistema y a partir de éste se darán los elementos necesarios para generar, desarrollar y aplicar un algoritmo.



*Figura 9. Diagrama de un sistema.*

Como primer bloque se tiene una entrada, en esta parte del sistema es en donde se tiene que identificar el problema y es aquí donde se deben indicar los elementos necesarios que se van a utilizar para la solución del problema al que se enfrenta estos elementos son: variables, circunstancias y características a los que se puede exponer el problema.

En el segundo bloque del sistema para la implementación de algoritmos se tiene el proceso, y es aquí donde se diseña y se desarrolla el algoritmo estableciendo los pasos necesarios para resolver el problema. En esta parte del sistema se tiene que tomar en cuenta que los pasos definidos deben ser precisos es decir que se tienen que indicar las especificaciones y requerimientos de los elementos que se emplearan en el desarrollo del algoritmo.

Finalmente, en el último bloque del sistema se concluye con la solución del problema, ya que es aquí donde se ejecutan los pasos del algoritmo diseñado. Teniendo estos elementos se tiene el siguiente diagrama que engloba todo lo mencionado con anterioridad.



Figura 10. Diagrama con descripción de pasos de un algoritmo dentro del sistema.

Las características fundamentales acerca de los algoritmos planteadas por el científico Donald Ervin Knuth en su libro *“Algoritmos fundamentales, el arte de programar ordenadores en 1980”* [2.1] se enuncian a continuación:

- ✓ **Carácter finito:** "Un algoritmo siempre debe terminar después de un número finito de pasos".
- ✓ **Precisión:** "Cada paso de un algoritmo debe estar definido de modo preciso; las operaciones a llevar a cabo en cada uno de los casos deben estar especificadas de manera rigurosa y sin ambigüedad".
- ✓ **Determinístico:** "Indica que se deben considerar datos de entrada y cada uno de ellos le corresponde una respuesta determinada."
- ✓ **Entrada:** "Un algoritmo tiene cero o más entradas: cantidades que le son dadas antes de que el algoritmo comience, o dinámicamente mientras el algoritmo corre. Estas entradas son tomadas de conjuntos específicos de objetos."
- ✓ **Salida:** "Un algoritmo tiene una o más salidas: cantidades que tienen una relación específica con las entradas".
- ✓ **Eficacia:** "También se espera que un algoritmo sea eficaz, en el sentido de que todas las operaciones a realizar en un algoritmo deben ser suficientemente básicas como para que en principio puedan ser hechas de manera exacta y en un lapso de tiempo finito".





---

Los algoritmos se clasifican en dos tipos a partir de su naturaleza como: cualitativos y cuantitativos. Los cualitativos son aquellos en los que se describen los pasos utilizando palabras aquí es donde se presenta el pseudocódigo, es decir, se utiliza el lenguaje natural y se tienen pocas reglas, ya que aquí solo se expresan acciones y pensamientos que realizamos en la vida cotidiana.

En tanto los cuantitativos, son aquellos en los que se utilizan cálculos numéricos para definir los pasos del proceso. Lo ejecuta el computador y es en este tipo de algoritmos en donde se aplican los diagramas funcionales, diagramas de bloques y diagramas de flujo para verificar que la secuencia de pasos establecida solucione el problema definido al principio del algoritmo.



---

## 1.8 Algoritmos aplicables en Sistemas de Manufactura Flexible (SMF).

Hoy en día la ingeniería requiere herramientas y métodos para la solución de problemas de una forma más organizada y eficaz.

Los algoritmos en la ingeniería son una herramienta capaz de satisfacer las demandas a los problemas que se presentan en la industria que por lo regular son en su forma de producción ya que siempre se busca mejorar la calidad de un producto manteniendo o reduciendo el costo de este.

Los problemas presentan diferentes escenarios, por lo que hay que tomar en cuenta variables y circunstancias distintas para comparar y decidir qué solución cumplirá con las exigencias y corregirá el problema presentado.

Dos ejemplos referentes de algoritmos son las Colonias de hormigas (CdH) y los algoritmos genéticos (AG), de los cuales se hará una descripción breve y básica.

### Colonia de Hormigas

El algoritmo CdH (Colonia de Hormigas) es un algoritmo meta-heurístico inspirado en el comportamiento de colonias de hormigas reales, fue propuesto en 1992. El proceso imita la forma en como estos insectos encuentran la ruta más corta entre la fuente de alimentos y el hormiguero. Lo anterior sucede cuando las hormigas buscan alimento, dejan cierto compuesto químico, denominado como “feromona” en su trayecto. Así cuantas más hormigas caminen a través de un sendero, más feromonas quedaran en el suelo. Debido a que la siguiente hormiga elegirá uno de los caminos con probabilidad proporcional a la mayor cantidad de feromona presente en el camino, al final este proceso de retroalimentación creará una ruta única desde el hormiguero a la fuente de alimentos.

Pocos trabajos han aplicado esta meta-heurística para problemas de producción, aunque muestra resultados muy prometedores.



---

### Algoritmos Genéticos

Los algoritmos genéticos introducidos por Holland en 1975, son algoritmos metaheurísticos y están inspirados el proceso biológico de la selección natural. Los algoritmos genéticos imitan el proceso evolutivo, con el supuesto de que los individuos con ciertas características son aptos para sobrevivir y transmitir esas características a sus descendientes. Imitando este proceso se puede encontrar una solución que cada vez mejor que pueda satisfacer una función objetivo. Los algoritmos genéticos operan sobre poblaciones o conjunto de soluciones representadas en cadenas binarias, números enteros o decimales llamadas cromosomas. Durante su ejecución un algoritmo genético, cruza individuos de mejor aptitud para renovar la población y eliminar los de menor aptitud. Con este proceso iterativo se llega a una solución, que está representada por el cromosoma de mejor aptitud.



## 1.9 Definición de grafos.

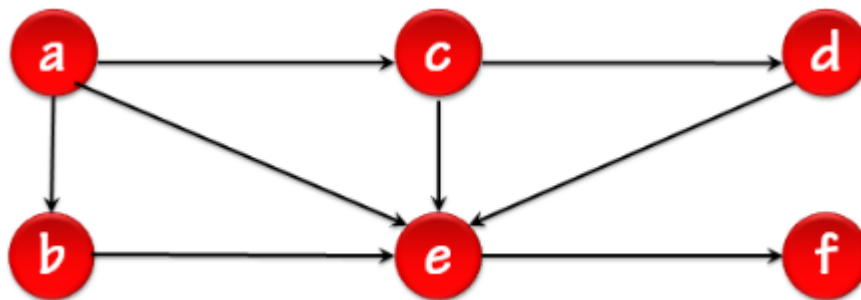
Dado que las RdP son representadas gráficamente por grafos dirigidos será necesario definirlos para comprender mejor el contexto de los modelismos de esta técnica, así como las reglas que la soportan.

Un grafo es un modelo para representar relaciones entre elementos de un conjunto. [3]

Gráficamente se representa como un conjunto vértices o nodos unidos por líneas que representan las aristas.

Matemáticamente, puede ser visto como un par ordenado  $G = (V, E)$  donde:

- $V$  es un conjunto de vértices o nodos
- $E$  es un conjunto de pares  $(u,v)$ ,  $u,v \in V$ , llamados aristas o arcos que representan las relaciones entre los nodos.



*Ejemplo de la representación gráfica de un grafo.*

Para este ejemplo,

$$V = \{a, b, c, d, e, f\}; E = \{(a, b), (a, c), (a, e), (b, e), (c, d), (c, e), (d, e), (e, f)\}$$

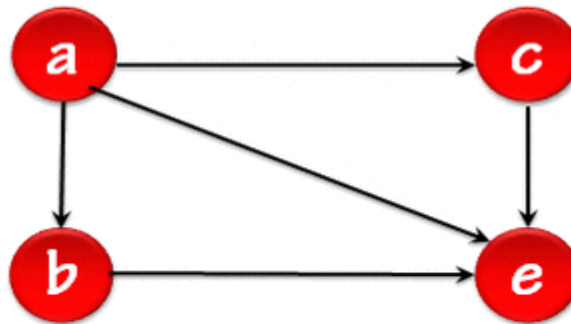
A su vez, los grafos se definen como grafos dirigidos y grafos no dirigidos, conceptos que también ayudaran a la comprensión del diseño de la Red de Petri en el desarrollo del presente.



### Grafo Dirigido.

Un grafo dirigido es aquel en el que todas sus aristas tienen sentido o dirección.

La relación sobre  $V$  no es simétrica. Las aristas se representan como un par ordenado  $(u,v)$ . [3]



*Ejemplo de la representación gráfica de un grafo dirigido.*

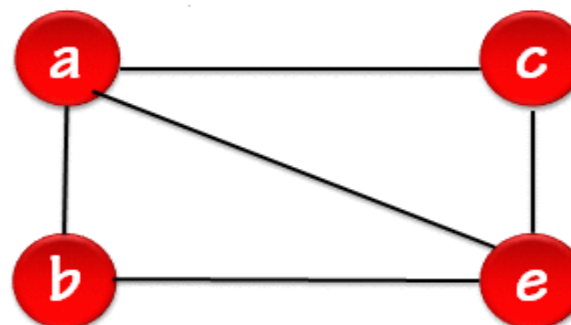
Para este ejemplo

$V = \{a, b, c, e\}$  ;  $E = \{(a, b), (a, c), (a, e), (b, e), (c, e)\}$

### Grafo No Dirigido.

Un grafo no dirigido es aquel en el que todas sus aristas son bidireccionales.

La relación sobre  $V$  es simétrica. Las aristas se representan como pares no ordenados  $\{u,v\}$ ,  $u,v \in V$  y  $u \neq v$ . [3]



*Ejemplo de la representación gráfica de un grafo no dirigido.*

$V = \{a, b, c, e\}$  ;  $E = \{\{a, b\}, \{a, c\}, \{a, e\}, \{b, e\}, \{c, e\}\}$



---

## 1.10 Sistema de Eventos Discretos

Los sistemas de eventos discretos son sistemas donde las propiedades de interés (estado del sistema) cambian en una secuencia de instantes de tiempo ante la ocurrencia de un evento, esta secuencia presenta un patrón aleatorio, se puede considerar que el resto del tiempo el estado del sistema permanece constante [4].

Debido a estas características los modelos de simulación de eventos discretos son dinámicos y estocásticos, donde las variables de estado cambian de valor en instantes no periódicos de tiempo.

Los Sistemas de Eventos Discretos se pueden describir mediante los siguientes elementos:

- **Entidades:** conjunto de componentes del sistema. Se pueden agrupar en dos tipos:
  - Entidades permanentes o recursos: son elementos estáticos en cuanto a que su número no varía en el sistema. Suelen utilizarse para describir los medios que permiten ejecutar las actividades del sistema. Los recursos definen quién o qué ejecuta la actividad.
  - Entidades temporales: se utilizan para definir los objetos que se procesan en el sistema o sufren cambios durante la ejecución del sistema. Las entidades temporales son los objetos que llegan, se procesan y salen del sistema. En general, se utiliza el término entidad para denominar sólo a las entidades temporales y así distinguirlas de los recursos.



- 
- **Atributos:** se utilizan para caracterizar las entidades, tanto permanentes como temporales. Cada atributo corresponde a una propiedad, así como toda aquella información que fluye en el sistema junto con las entidades temporales. El estado de una entidad viene definido por los atributos asociados a ella, cuyos valores cambian en función de los eventos del sistema. Son imprescindibles para el control del flujo de las entidades en el sistema, así como también para la extracción de entidades temporales en un sistema.
  - **Actividades:** son el conjunto de tareas que tienen lugar en el sistema, y por lo general suelen estar encapsuladas entre eventos. Casi todas las actividades involucran a más de un tipo de entidad y, por lo tanto, el inicio de una actividad está condicionado a la presencia de todos los tipos de entidades involucrados. La duración, a pesar de no ser un valor constante, de una actividad es un aspecto importante, por lo que ha de ser conocida para poder determinar el instante en el cual finalizará.
  - **Evento:** puede definirse como una acción instantánea que puede cambiar el estado del sistema. En los modelos de sistemas de eventos discretos las variables de estado, es decir, toda la información asociada al sistema necesaria para evaluar su comportamiento, tan solo puede cambiar de valor en instantes de tiempo ligados a la ocurrencia de un evento, por tanto, un evento puede cambiar el valor de una variable de estado del sistema modelado. Los valores de las variables de estado quedan determinados por los valores que pueden tomar los atributos de las entidades.



---

El conjunto de valores de las variables de estado en un instante determinado constituye un estado del sistema. Por lo general, más de una actividad se inicia o finaliza con cada evento. Se distinguen dos tipos de eventos:

- Eventos condicionados: para que estos eventos ocurran es necesario que se cumplan una o más condiciones.
- Eventos no condicionados: son eventos cuya ocurrencia está planificada en el tiempo y no depende de ninguna condición.
- **Colas o unidades de almacenamiento**: son estructuras que quedan determinadas a partir de una colección de entidades, en general entidades temporales, ordenadas de una forma lógica, por ejemplo, de forma FIFO (primero en llegar, primero en salir). Las entidades que están en una cola sufren un retardo de duración indeterminada.





---

## **CAPÍTULO 2. MANUFACTURA, REDES DE PETRI Y APLICACIONES.**

Como se mencionó con anterioridad, en un SMF se requiere de herramientas, métodos y recursos, los cuales deben funcionar de manera adecuada con la finalidad de que estos permitan que cada una de las máquinas que componen el SMF realicen de manera eficaz las tareas que les sean programadas.

Tras lo anterior, es importante conocer la diferencia entre eficiencia y eficacia, ya que estos son dos aspectos claves en la productividad de una empresa.

De acuerdo con la RAE eficacia se define como “capacidad de lograr el efecto que se desea o se espera”, mientras que la eficiencia se define como: “capacidad de disponer de alguien o de algo para conseguir un efecto determinado con los recursos que se tienen a disposición”.

Por lo tanto, la diferencia fundamental entre estas se basa en el uso y aprovechamiento de los recursos.

Finalmente, otro de los puntos que se describieron en el capítulo anterior, es acerca de la aplicación de algoritmos en la manufactura, por lo que se deben tomar en cuenta las características del sistema para la designación del algoritmo que se va a desarrollar, es por ello, que se requiere de analizar y estudiar el SMF para llevar a cabo la realización de un modelo que permita describir sus características fundamentales de operación.

Debido a que un SMF tiene como característica principal la utilización nula del trabajo humano, excepto en la parte de sincronización por parte de una PC, en donde el humano debe dar las ordenes de ejecución para dejar el SMF automatizado, el modelo es importante, ya que permitirá realizar modificaciones permitiendo obtener mejoras en los procesos producción, dándole así la flexibilidad al sistema en general.



Así mismo, y a modo de introducción para el presente capítulo, se desarrollará una breve descripción acerca de los orígenes y desarrollo de las Redes de Petri (RdP), lo cual permitirá al lector conocer las bases y justificaciones de lo que se ha definido hasta ahora y de esta manera logre abordar los conceptos que serán manejados a lo largo del desarrollo del presente trabajo de tesis.

## **2.1 Modelado de procesos a partir de Redes de Petri.**

La conceptualización y modelado de procesos, permite estudiar el comportamiento dinámico de las organizaciones, procesos y/o sistemas más generales, en donde se tiene por objetivo principal contar con una herramienta que permita estudiar y entender un sistema, a partir del desarrollo de los modelos de procesos desde diferentes puntos de vista, en función de las técnicas de modelización seleccionada.

Para el desarrollo del presente trabajo de tesis, se ha seleccionado la técnica de Redes de Petri (en adelante RdP) para el estudio y modelización de los procesos de torneado y fresado en la CMF de la UNAM, por sus características de robustez y flexibilidad (semántica, representaciones gráficas, etc.).

Un elemento fundamental en las Redes de Petri es la posibilidad de análisis del comportamiento dinámico de los sistemas (ejecución de procesos en una línea de producción, paralelismos, sistemas concurrentes y recursos compartidos, etc.) que ofrece esta técnica, que permite una gran variedad de aplicaciones debido a su generalidad y adaptabilidad inherentes. Esto permite la representación gráfica tanto de modelos muy simples, como de las redes más complejas.

Las principales ventajas de las Redes de Petri son:

- ✓ Tratamiento individual de procesos independientes.
- ✓ Procesos paralelos o concurrentes.
- ✓ Utilización y modelo de recursos compartidos.



### 2.1.2 Recursos compartidos.

Las RdP permiten modelar sistemas donde un recurso es compartido por dos procesos de forma que el uso del recurso durante la ejecución de un proceso impide que dicho recurso sea utilizado por el otro proceso.

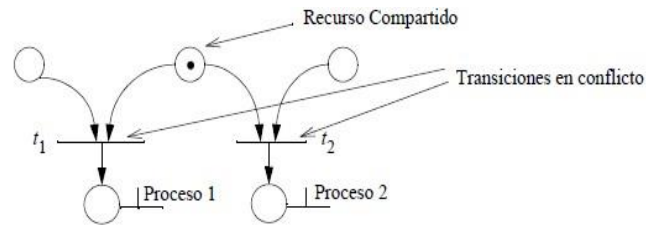


Figura 11. Modelo y representación de un Recurso compartido en una RdP, en donde se emplea de un recurso para la ejecución de los procesos siguientes, ejecutándose en función de la lógica del sistema modelado.

Un recurso compartido se modela mediante un lugar con una marca inicial y transiciones en conflicto. [5]

### 2.2 Redes de Petri.

Las redes de Petri, introducidas por el alemán Carl Adam Petri en el año de 1962, en su tesis de doctorado titulada "Comunicación con Autómatas" (C. A. Petri. Kommunikation mit Automaten. PhD thesis, Institut für instrumentelle Mathematik, Bonn, 1962), son una herramienta gráfica y matemática para el estudio de un gran número de sistemas, así mismo, son consideradas como uno de los formalismos más ampliamente aceptados para modelizar sistemas concurrentes y distribuidos. A partir de su trabajo doctoral se desarrollaron proyectos, los cuales proporcionaron la teoría primaria, notación y representación de las RdP, dicha teoría fue divulgada en 1968 en el proyecto "Systemics". Posteriormente surgieron más investigaciones, entre ellas el artículo "Events and Conditions" publicado en



---

1970, en el cual se muestra como las RdP pueden aplicarse al modelado y análisis de sistemas con componentes concurrentes.

En general, fueron objeto de uso teórico hasta 1980, momento a partir del cual se incrementó su uso práctico, debido principalmente a la introducción de las redes de Petri de alto nivel y la disponibilidad de herramientas de software que manejaban este tipo de redes. [6]

La principal aplicación de las redes de Petri es la modelización y el análisis de sistemas con componentes concurrentes que interactúan. Un modelo es una representación (en términos matemáticos) de las características más importantes del objeto o sistema de estudio. Manipulando esta representación, se pueden obtener nuevos conocimientos del sistema modelado sin ningún costo o peligro para el sistema real.

Modelar un sistema usando Redes de Petri presenta tres ventajas fundamentales:

- 1) El sistema completo es a menudo más fácil de entender debido a la naturaleza gráfica y precisa del esquema de representación.
- 2) El comportamiento del sistema puede ser analizado utilizando la teoría de las redes de Petri, que incluye herramientas para el análisis tales como los árboles de marcados y establece relaciones entre ciertas estructuras de redes y el comportamiento dinámico. Pueden aplicarse también técnicas para la verificación de programas paralelos.
- 3) Puesto que las redes de Petri pueden sintetizarse usando técnicas bottomUp<sup>1</sup> y top-Down<sup>1</sup>, es posible diseñar automáticamente sistemas cuyo comportamiento es conocido o fácilmente verificable.

---

<sup>1</sup> *BOTTOM-UP (ascendente)*: Esta técnica, se refiere a la identificación de aquellos procesos que necesitan computarizarse conforme vayan apareciendo, su análisis como sistema y su codificación, además de la identificación de las partes individuales, las cuales se diseñan con detalle y luego se enlazan para formar componentes más grandes, que a su vez se enlazan hasta que se forma el sistema completo. Las estrategias basadas en el flujo de información "bottom-up"



---

### 2.3 Definición de Redes de Petri.

Con base en algunos artículos y trabajos realizados acerca de Redes de Petri (RdP), se van a exponer una serie de definiciones que serán útiles para entender mejor el presente trabajo de tesis. Cabe señalar, que esas definiciones pueden obtenerse de manera más amplia en las referencias utilizadas, pero aun así se incluyen en este capítulo para relacionarlas con su aplicación industrial, especialmente desde el punto de vista de su utilización a lo largo de este trabajo.

Por lo tanto, a continuación, se irá alternando una serie de definiciones formales expresadas en terminología matemática, con algunas definiciones más cercanas al punto de vista industrial, a modo de explicaciones, y que harán mucho más entendible el resto del trabajo a los lectores que no se encuentran muy familiarizados con las RdP.

Estas se pueden definir bajo dos puntos de vista diferentes: definición formal (en base a expresiones matemáticas) y definición informal (orientada a la representación gráfica). Es por ello, que se considera necesario mostrar ambas definiciones, ya que en conjunto estas dos acepciones, permitirán el desarrollo, ejecución y análisis de una RdP basada en la celda de manufactura flexible de la Facultad de Ingeniería, UNAM.

---

son consideradas necesarias y suficientes, porque se basan en el conocimiento de todas las variables que pueden afectar los elementos del sistema.

<sup>1</sup> *TOP-DOWN*: En esta técnica, se formula un resumen del sistema, sin especificar detalles. Cada parte del sistema se refina diseñando con mayor detalle. Cada parte nueva es entonces redefinida, cada vez con mayor detalle, hasta que la especificación completa es lo suficientemente detallada para validar el modelo. El modelo top-down se diseña con frecuencia con la ayuda de "cajas negras" que hacen más fácil cumplir requisitos, aunque estas cajas negras no expliquen en detalle los componentes individuales.



## 2.4 Redes de Petri (representación gráfica).

Una Red de Petri [7,8] es un formalismo de modelado que permite representar un sistema de eventos discretos. La RdP representa formalmente el paralelismo y la sincronización de un sistema, posibilitando efectuar un análisis cuantitativo de este.

Las RdP se representan como un grafo dirigido con los siguientes elementos:

- ✓ Plazas o lugares: Gráficamente se representan mediante circunferencias y se utilizan para describir tanto las colas de espera del sistema, como las condiciones sobre el estado en que se encuentran las entidades o recursos que componen el sistema. En el caso de un sistema de producción corresponderá a un almacenamiento, maquina, robot, o cualquier otro espacio fijo.
- ✓ Transiciones: Se representan gráficamente mediante rectángulos y se usan para modelar los eventos y/o actividades que aparecen en la dinámica del sistema, relacionando dos plazas o lugares, y se consideran como el evento que produce el cambio entre los estados del sistema.
- ✓ Arcos dirigidos: su representación gráfica es mediante flechas, las cuales se usan para conectar un lugar con una transición o una transición con un lugar, permitiendo indicar el sentido del flujo en el modelo de red. Cabe señalar, que nunca puede unir dos nodos del mismo tipo.
- ✓ Peso asociado al arco: Los arcos dirigidos, se etiquetan con sus pesos (enteros positivos), si no tiene etiqueta se considera que el arco tiene peso uno, permitiendo describir tanto las condiciones necesarias para que el evento y/o actividad representada por una transición pueda ocurrir, así como los efectos sobre el estado del sistema después de la ocurrencia de un evento o la ejecución de una actividad.



- ✓ Marcas o Tokens: Equivalen a una marca dentro del sistema y a menudo se utilizan para modelar entidades dentro de una plaza o lugar, o bien el cumplimiento de una condición necesaria para la ocurrencia de un evento o ejecución de una actividad. Se representan gráficamente mediante puntos negros dentro de los lugares. El conjunto de marcas asociado a los lugares, en un determinado instante, constituye un Mercado de la RdP.

En un sistema de producción correspondería a la representación de: materia prima, Producto en proceso, producto terminado o en su caso al representar una máquina (CNC) o un robot en una RdP, simbolizaría si la maquina está o no disponible para el proceso que se desea.

- ✓ Marcado o Marcación: Es el conjunto de testigos asociados con cada una de las plazas o lugares en un instante dado. La distribución inicial de marcas en las plazas o lugares se denomina marcado inicial. Cada marcado representa un estado del sistema.



## 2.5 Simbología, reglas y estructuras básicas en una RdP.

A partir de la definición de las RdP en el punto de vista gráfico, y en base los elementos de un grafo dirigido definidos con anterioridad se mostrará la representación gráfica para una RdP, la cual se compone de símbolos y reglas para obtener un modelo gráfico, formal y abstracto, lo que permitirá describir y analizar el flujo de lo que sucede en un proceso de producción en una celda de manufactura.

A continuación, se muestra la simbología utilizada en una RdP, además la descripción y objetivo del manejo que conlleva cada uno de los símbolos.

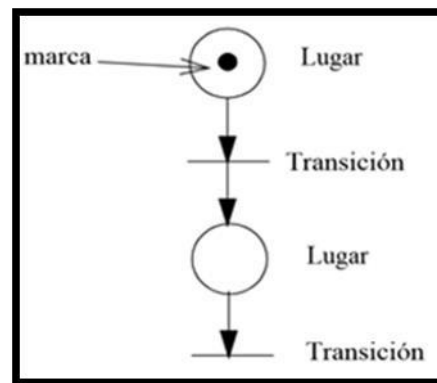


Figura 12. Elementos de una RdP.

En base a la figura 12 se definen las siguientes reglas:

- ✓ Una transición puede ser destino de varios lugares y un lugar puede ser el destino de varias transiciones.
- ✓ Una transición puede ser origen de varios lugares y un lugar puede ser origen de varias transiciones.
- ✓ Los lugares pueden presentar marcas (una marca se representa mediante un punto en el interior de la circunferencia (lugar), dichas marcas también son denominadas tokens).





- ✓ Un arco dirigido desde un lugar o plaza (P) a una transición (t) define P como un lugar de entrada para t.
- ✓ Un arco une siempre lugares con transiciones y nunca dos lugares o dos transiciones.
- ✓ Un lugar de salida se indica con un arco desde la transición (t) al lugar (P).
- ✓ A los lugares se les asocia acciones o salidas. A las transiciones se les asocia eventos (combinaciones lógicas de las entradas) y acciones o salidas.
- ✓ Una transición tiene un determinado número de "lugares de entrada" (o precondiciones) y de lugares de salida (post- condiciones).
- ✓ Una transición se dice que está sensibilizada cuando todos sus lugares origen están marcados.
- ✓ Cuando ocurre un evento asociado a una transición (la función lógica se hace uno), se dice que la transición está validada.

## 2.6 Estructuras de las RdP.

En las RdP existen casos característicos en el comportamiento de los tokens, dada una estructura particular en el desarrollo de una red, los cuales son la sincronización y la concurrencia, en un sistema de producción pueden ser interpretados como un ensamble y desensamble. A continuación, se mencionarán y se ilustrarán estos dos casos.

### Sincronización (Ensamble):

Ocurre cuando dos o más actividades concurren o se unen, sirve cuando dos tokens, provienen de diferentes caminos, en paralelo.



Concurrencia (Desensamble):

Equivale a los flujos que se ejecutan en paralelo, es decir el token se divide.

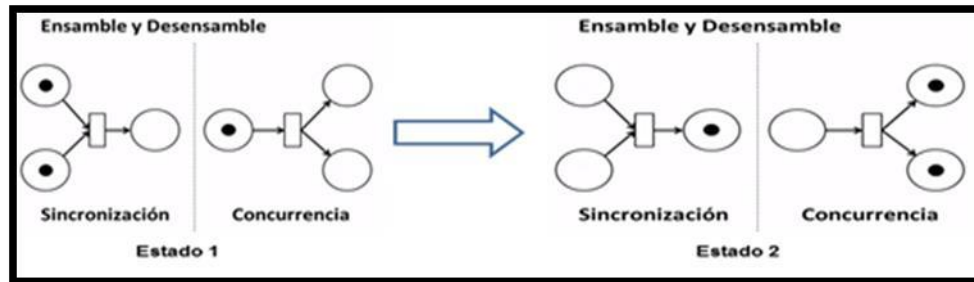


Figura 13. Configuraciones de Ensamble (Sincronización) y Desensamble (Concurrencia).

Además de las reglas básicas antes mencionadas se tienen también estructuras las cuales permiten decisiones lógicas en el flujo de los tokens que pasan por las plazas y transiciones involucradas.

En las RdP existen estructuras básicas las cuales permiten tomar decisiones en la ejecución de pasos dentro de los procesos, dichas estructuras básicas son: selección, atribución, distribución y conjunción.

Un lugar con varios arcos de entrada y/o de salida se denomina nudo O, derivándose a partir de esta configuración, la selección y la atribución en las RdP.

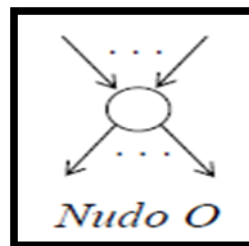


Figura 14. Configuración de Nudo O en RdP para la derivación de la estructura de atribución y selección en el desarrollo de una red.



- ✓ Selección: selecciona el proceso a ejecutar.

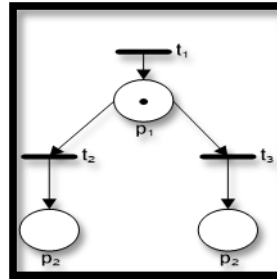


Figura 15. Configuración selección en el desarrollo de una RdP.

- ✓ Atribución: ejecución independiente de un proceso por dos procesos distintos.

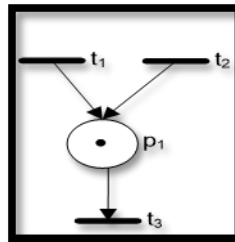


Figura 16. Configuración atribución en el desarrollo de una RdP.

Una transición con varios arcos de entrada y/o de salida se denomina nudo Y, derivándose a partir de esta configuración, la distribución y la conjunción en las RdP.

- ✓ Distribución: ejecución de procesos paralelos o concurrentes.

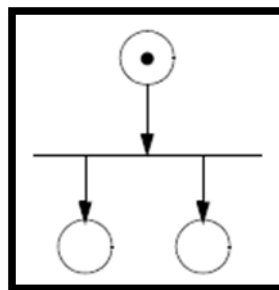


Figura 17. Configuración de distribución en el desarrollo de una RdP.



- ✓ Conjunción: sincronización de procesos en paralelo.

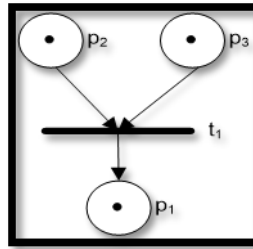


Figura 18. Configuración de conjunción en el desarrollo de una RdP.

- ✓ Ejecución secuencial: La transición  $t_2$  puede ser disparada siempre que sea antes disparado  $t_1$ .

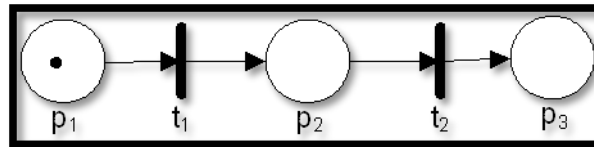


Figura 19. Ejecución secuencial para el disparo de una transición.

- ✓ Conflictos / recursos compartidos: Las RdP permiten modelar sistemas donde un recurso es compartido por dos procesos de forma que el uso del recurso durante la ejecución de un proceso impide que dicho recurso sea utilizado por el otro proceso. Un recurso compartido se modela mediante un lugar con una marca inicial y transiciones en conflicto.

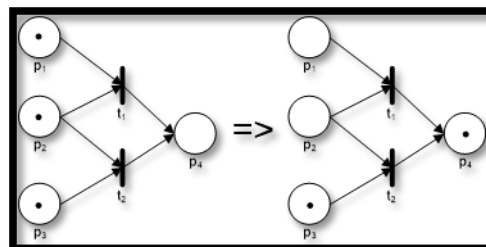


Figura 20. Modelo de un recurso compartido en el diseño de una RdP.



- ✓ Arcos inhibidores: Estos tipos de arcos se relacionan con la transición a ser inhibida y con el lugar que, de tener una marca, va a impedir el disparo de la transición.

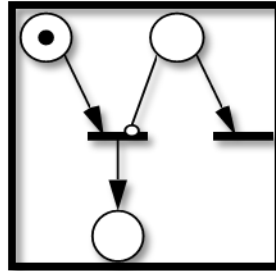


Figura 21. Modelo empleando arcos inhibidores para impedir disparos de transiciones.

## 2.7 Redes de Petri (definición formal).

Formalmente la estructura de una Red se define como [9]:

$$R = \{P, T, I, O\}$$

Donde:

P: Conjunto de lugares (n).

T: Conjunto de transiciones (m).

I: Conjunto de entradas de arco ( $P \times T \rightarrow \text{Post}$ )

O: Conjunto de salidas de arco ( $T \times P \rightarrow \text{Pre}$ )

$P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ , siendo la función de incidencia previa, define el conjunto de arcos direccionados de P a T.

$T \times P \rightarrow \mathbb{N}$ , siendo la función de incidencia posterior, define el conjunto de arcos direccionados de T a P.

$P \cap T = \emptyset$  y  $P \cup T \neq \emptyset$ ; es decir, los lugares y transiciones son conjuntos disjuntos.



---

Se define una RdP como:

$$RP = \{R, Mo\}$$
$$RP = \{P, T, I, O, Mo\}$$

Donde  $Mo$  es el vector  $n \times 1$  que representa el marcado inicial de la red.

## 2.8 Comportamiento de las Redes de Petri.

El comportamiento de la RdP viene dado por la evolución del marcado [10]:

- Un lugar  $p$  es de entrada a la transición  $t$  si existe un arco orientado de  $p$  hacia  $t$ .
- Un lugar  $p$  es de salida de la transición  $t$  si existe un arco orientado de  $t$  hacia  $p$ .
- Una transición está sensibilizada si todos sus lugares de entrada están marcados.
- Una transición sensibilizada es disparada o franqueada si se verifica el evento asociado
  - El disparo de una transición consiste en eliminar una marca de cada uno de sus lugares de entrada y añadir una marca a cada uno de sus lugares de salida, si el peso de todos los arcos es igual a 1.
  - Si el peso de un arco de  $p$  hacia  $t$  es  $\alpha$ , al disparar  $t$  se eliminan  $\alpha$  marcas de  $p$ .
  - Si el peso de un arco de  $t$  hacia  $p$  es  $\beta$ , al disparar  $t$  se añaden  $\beta$  marcas a  $p$ .



---

## 2.9 Propiedades de las Redes de Petri.

Con una red de Petri pueden estudiarse dos tipos de propiedades: las que dependen del marcado inicial  $M_0$  (propiedades de comportamiento) y las que son independientes del marcado inicial  $M_0$  (propiedades estructurales).

### 2.9.1 Propiedades de comportamiento de las RdP.

La fuerza principal de las redes de Petri, son su soporte para el análisis de propiedades y problemas asociados con sistemas concurrentes. Las propiedades de comportamiento de las redes de Petri dependen de la marca inicial  $M_0$ , estas propiedades son alcanzabilidad, acotamiento, conservatividad, reversibilidad y estado inicial y persistencia. [11]

✓ Alcanzabilidad:

La alcanzabilidad es una base fundamental para estudiar las propiedades dinámicas de cualquier sistema. Un problema importante en el diseño de sistemas distribuidos es lograr que tal sistema, alcance un estado específico o exhiba un comportamiento particular, evitando toda acción de consecuencias indeseadas.

Para un sistema de eventos discretos, el estudio de la alcanzabilidad determina si su modelo refleja exactamente su dinámica o estructura, y permite descubrir la presencia de facetas de comportamiento no previstas. La alcanzabilidad permite averiguar como un sistema modelado con RdP puede alcanzar un estado específico mediante un comportamiento funcional requerido.

Esta propiedad consiste en encontrar al menos una secuencia de disparo que transformen un estado inicial  $M_0$  en un estado específico  $M_i$ , siendo cada una de estas secuencias de disparos un patrón permisible de comportamiento funcional.



- ✓ Acotamiento: En sistemas de comunicación, manufactura, etc., se necesita plantear estrategias para evitar la sobre saturación de áreas de almacenamiento, ya que esto puede provocar corrupción de datos o daños de equipos. Los lugares y sus tokens pueden ser usados para representar respectivamente áreas de almacenamiento y sus unidades, por tanto el estudio de estas propiedades consigue definir estrategias.  
La acotabilidad está relacionada con el número máximo de tokens que puede poseer un lugar. Tal propiedad ayuda a identificar la existencia de sobre flujos de tokens.
- ✓ Red de Petri Segura Una red de Petri  $(N, M_0)$  se dice segura si está acotada.
- ✓ Conservatividad: Se dice que una RdP es conservativa si el número de arcos de entrada a una transición es igual al número de arcos de salida, pues así, el total de tokens se mantiene. Tal aseveración es correcta, pero en ocasiones lleva a interpretar como falta de conservatividad que, posterior al disparo de una transición, varios tokens se combinen en uno, o que uno se divide en varios.
- ✓ Interbloqueo y Vivacidad:  
El inter bloqueo se da cuando la ejecución de la RdP lleva a una marca en la cual ninguna transición puede ser disparada.  
La vitalidad de una RdP garantiza la ausencia de inter bloqueos en la ejecución de la red.  
Se dice que una RdP es viva si para toda  $M$  alcanzable desde  $M_0$  existe al menos una secuencia que permita disparar una transición.





Esta es una propiedad muy fuerte y, a menudo, muy difícil de verificar.

Por ello, se habla de grados de disparo denominados niveles [Mur89] [11].

Concretamente, cuando una transición  $t$  está viva en:

- Nivel 0: Nunca puede ser disparada. Es una transición muerta.
  - Nivel 1: Si  $t$  puede ser disparada en al menos una secuencia de disparos.
  - Nivel 2: Para cada entero finito positivo  $n$  existe una secuencia de disparo en la que  $t$  ocurre al menos  $n$  veces.
  - Nivel 3: Si  $t$  puede ser disparada en alguna secuencia.
  - Nivel 4: Está viva en el nivel 1 para cada marcado del conjunto de alcanzabilidad  $R(M_0)$ .
- ✓ Reversibilidad y Estado Home: Una red de Petri  $(N, M_0)$  se dice reversible si, para cualquier marcado  $M \in R(M_0)$ ,  $M_0$  es alcanzable desde  $M$ . Así pues, el marcado inicial es alcanzable desde todos los marcados alcanzables. Esta propiedad tiene aplicación en la operación de sistemas reales (manufactura, control de procesos, etc.), pues estos requieren conocer si tal sistema puede recuperarse de un error, es decir, pasar de estados de falla a sus estados previos de funcionamiento correcto.
- ✓ Cobertura Un marcado  $M_0$  en una red de Petri  $(N, M_0)$  cubre a un marcado  $M$  si  $M'(p) \geq M(p)$  para cualquier lugar  $p$  de la red.
- ✓ Red de Petri Persistente Una red de Petri  $(N, M_0)$  se dice persistente si, para dos transiciones habilitadas cualesquiera, el disparo de una de ellas no deshabilita la otra.



---

### 2.9.2 Propiedades Estructurales de las Redes de Petri.

Las propiedades estructurales son aquellas que dependen de la estructura topológica de las Redes de Petri. Son independientes del marcado inicial  $M_0$  en el sentido de que dichas propiedades se cumplen para cualquier marcado inicial.

A continuación, se definirán textualmente algunas de estas propiedades, como son: Vitalidad estructural, Acotabilidad estructural, controlabilidad, conservatividad, repetitividad y consistencia. [11].

- ✓ Vitalidad estructural: Una RdP es viva estructuralmente si existe al menos una  $M_0$  para la cual sea viva.
- ✓ Acotabilidad estructural: Una RdP está acotada estructuralmente si es acotada para cualquier marca inicial finita.
- ✓ Controlabilidad: Una red de Petri se dice completamente controlable si cualquier marcado es alcanzable desde cualquier otro marcado. Se definen como la capacidad de un sistema de llegar a un estado cualquiera desde las entradas o salidas respectivamente.
- ✓ Conservatividad: Se da si la suma ponderada de tokens es constante.; si esto se cumple para todo lugar de la RdP es total, si no parcial.
- ✓ Repetitividad: La RdP tiene esta propiedad si existe un marcado finito  $M_0$  y una secuencia de disparo  $s$ , en la que sus transiciones se disparan un número infinito. Si esto se cumple para toda transición, la repetitividad es total, y si no, se denomina parcial.
- ✓ Consistencia: Se da si existe un  $M_0$  finito con una secuencia  $s$  cíclica (que lleva de  $M_0$  a  $M_0$ ) en el cual sus transiciones se disparan al menos una vez. Si esto se cumple para todas sus transiciones entonces la consistencia se denomina total; si no, parcial.



---

## 2.10 Análisis de redes de Petri.

Como se ha venido mencionando en el presente capítulo, las RdP sirven como herramienta para el modelado de sistemas, dicha herramienta tiene la forma de ser representada por medio de grafos, pero para el análisis del modelo, las RdP tienen la característica de ser representadas de forma matricial para que en base a la estructura y el marcado (tokens) en el modelo se pueda obtener la información sobre los estados en los que se encuentra el sistema, y de esta forma representarla a través de ecuaciones diferenciales y algebraicas.

Los métodos para analizar redes de Petri pueden clasificarse en dos grupos:

1. El árbol de cobertura (o alcanzabilidad).
2. Las ecuaciones matriciales.

El primer método implica la enumeración de todos los marcados alcanzables de la red [Mur89] [Fin90] [11]. Es aplicable a toda clase de redes, pero se limita a redes pequeñas debido a la explosión del espacio de estados. Por otra parte, las ecuaciones matriciales y las técnicas de reducción son más potentes, pero en muchos casos sólo son aplicables a subclases especiales de redes de Petri o en situaciones especiales.

## 2.11 Árbol de Cobertura (o Alcanzabilidad).

Es una Técnica Enumerativa basada en la representación gráfica de los estados del sistema, consisten esencialmente en la enumeración de todos los marcados mediante la generación del grafo de alcanzabilidad para sistemas acotados o del grafo de cobertura para sistemas no acotados, estas técnicas son aplicables a todas las clases de redes aunque en la práctica son restringidas a redes relativamente pequeñas debido a que un árbol de cobertura de gran tamaño imposibilita un cálculo efectivo y se eleva la complejidad computacional.



## 2.12 Ecuaciones matriciales.

En la segunda técnica de análisis se utiliza la matriz de incidencia [Mur89][Pet81] [11] (matriz que describe cómo los nodos en una red de Petri están interconectados). Esta interconexión de los nodos no está relacionada con el marcado inicial, por ello, esta aproximación se utiliza para determinar las propiedades estructurales de las redes de Petri, aunque también puede utilizarse para determinar alguna propiedad de comportamiento.

Es una matriz  $W$  cuya dimensión es  $n \times m$ , y tomando la definición formal de Rdp anteriormente descrita:

$P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ , es un conjunto de lugares, finito y no vacío;

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ , es un conjunto de transiciones, finito y no vacío;

Donde  $P \cap T = \emptyset$ , esto es que los conjuntos  $P$  y  $T$  son independientes.

$Pre: P \times T \rightarrow \{0,1\}$ , es la matriz de incidencia de entrada.

$Post: P \times T \rightarrow \{0,1\}$ , es la matriz de incidencia de salida.

$Pre (P_i, T_j)$  es el peso del arco que une  $P_i$  con  $T_j$ ; por lo tanto será 1, o el peso que tenga el arco, si el arco existe y 0 si no.

$Post (P_i, T_j)$  es el peso del arco que une  $T_j$  con  $P_i$ ; por lo tanto será 1, o el peso que tenga el arco, si el arco existe y 0 si no. Podemos notar que  $Pre$  y  $Post$  están relacionados a la transición  $T_j$  y a cuáles son sus arcos de entrada o salida.



En función de la matriz de incidencia  $W$ :

$W^- = [W_{ij}^-]$  , donde  $W_{ij}^- = Pre (P_i, T_j)$  matriz de incidencia de entrada

$W^+ = [W_{ij}^+]$  , donde  $W_{ij}^+ = Post (P_i, T_j)$  matriz de incidencia de salida

Por lo tanto, la matriz de incidencia es:

$$W = [W^+] - [W^-] = [W_{ij}]$$

Un ejemplo para la demostración del cálculo de las propiedades de una RdP ha sido tomado a partir del trabajo de tesis “*Navegación de un robot humano mediante Redes de Petri & Lógica Difusa*” de Federico Furlan Colin [12].

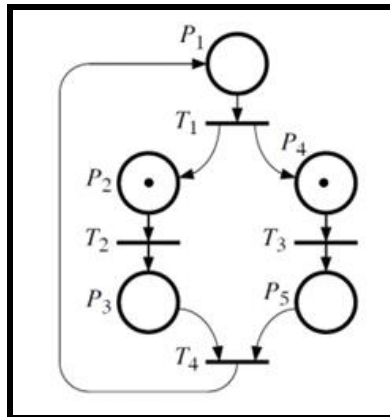


Figura 24. Red de Petri para ejemplificación del cálculo de la matriz de incidencia.

En base a las condiciones del sistema de la RdP de la figura 24, se tienen las siguientes matrices de incidencia de entradas y salidas:

$$W^- = \begin{matrix} & T_1 & T_2 & T_3 & T_4 \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad W^+ = \begin{matrix} & T_1 & T_2 & T_3 & T_4 \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} .$$



Finalmente, de la ecuación de la matriz de incidencia:

$$\mathbf{W} = [\mathbf{W}^+] - [\mathbf{W}^-] = [\mathbf{W}_{ij}]$$

$$\mathbf{W} = \begin{matrix} & \begin{matrix} T_1 & T_2 & T_3 & T_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & +1 \\ +1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & -1 \\ +1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

De la matriz resultante anterior, tenemos que cada columna de esta matriz corresponde a una modificación en el marcaje que se efectúa al disparar la transición correspondiente. Por ejemplo, la primera columna de  $\mathbf{W}$  indica que el disparo de la transición  $T_1$  consiste en remover un token de  $P_1$  y agregar un token a los lugares  $P_2$  y  $P_4$ . Naturalmente esto no nos provee ninguna información concerniente a la posibilidad de disparar cierta transición ya que la matriz de incidencia es independiente del marcaje.

### 2.13 Aplicaciones de las RdP.

Las aplicaciones más comunes de las redes de Petri son: Análisis y verificación formal en los sistemas discretos, protocolos de comunicación, sistemas de transporte, control de sistemas de producción y sistemas de información, entre otros. Lo anterior es debido a las ventajas que ofrecen las características de las RdP, ya que, al utilizar grafos orientados, es posible comprender de manera más fácil la estructura y el flujo de los sistemas dinámicos, además de los problemas que se presentan en estos, como son: secuencias de operaciones, conflictos en el uso de recursos, concurrencias, paralelismos, etc.



---

## 2.14 Redes de Petri aplicadas a manufactura.

Otra de las aplicaciones fundamentales de las RdP. se encuentra en el área de la manufactura, especialmente en los sistemas de producción, por ejemplo, en los SMF, debido a que las características de las RdP son adaptables por el hecho de que un SMF existe la posibilidad de hacer surgir modificaciones en el funcionamiento del sistema, principalmente en la reprogramación de actividades y operaciones, así como en la asignación de los recursos albergados en él.

La aplicación a sistemas de manufactura fue hecha inicialmente por Robert Valette en 1997 como una herramienta gráfica y matemática que se adapta bien a un gran número de aplicaciones en que las nociones de eventos, estados y evoluciones simultáneas de un sistema son importantes, posteriormente fueron aplicadas a sistemas de manufactura flexible.

En México, se tiene el dato de que la primera aplicación con RdP coloreadas fue hecha y expuesta en la tesis de maestría presentada por Ramírez Treviño y más recientemente y de igual manera a través de una tesis de maestría por Pérez Serrano. [14]

## 2.15 Tipos de redes de Petri.

Desde que fueron expuestas por primera vez las RdP, se despertó un gran interés en varios investigadores los cuales se encargaron de desarrollar y clasificar, en base a las RdP generalizadas, RdP con características particulares las cuales permitan resolver problemas más complejos, esto debido a que existen sistemas de eventos discretos cuya modelación con las RdP descritas anteriormente se vuelve complicado, debido a características particulares en estos sistemas que no son fáciles de incorporar. Tal es el caso de sistemas donde está presente la aleatoriedad en la ocurrencia de eventos, o aquellos donde se necesita contar con atributos de estos eventos para hacer una representación más cercana a la realidad.



Por tal motivo, a las RdP generalizadas se le han incorporado características que permitan la modelación y simulación de estos sistemas en particular. Entre los modelos extendidos de RdP que se han propuesto están las RdP Temporizadas, RdP estocásticas, RdP Coloreadas, etc. A continuación, se mencionarán algunos tipos y sus respectivas características de cada una de ellas.

### **2.15 Redes de Petri Coloreadas.**

Se han propuesto otros tipos de extensiones que afectan al contenido de las plazas o al modo de franqueo de las transiciones. Las plazas, en lugar de un número, pueden contener objetos con una estructura más rica, tal como una lista, o pila, o distinguirlas mediante un "coloreado", pudiendo las transiciones modificar estos objetos con reglas adaptadas.

Las redes de Petri coloreadas han sido introducidas para condensar la descripción de sistemas en los que se identifican diversos subsistemas con estructura y comportamiento similares, pero que trabajan en paralelo. En una red de Petri coloreada, cada marca puede portar un color que la identifique.

A cada plaza y a cada transición se le asigna un conjunto de colores. Una transición puede franquearse respecto a cada uno de sus colores. El franqueo de una transición elimina y añade marcas como en las redes normales, pero respetando la dependencia funcional especificada entre el color del franqueo de la transición y los colores de las marcas. El color de cada marca puede ser cambiado por el franqueo de una transición. [13]





---

## 2.16 Redes de Petri Temporizadas.

Otro tipo de extensiones son aquéllas en las que el funcionamiento de la red depende del entorno y no sólo de las condiciones propias de la red (redes no autónomas). Puesto que las redes son un modelo para la descripción de un flujo de control, puede ser necesario aumentar y enriquecer este modelo cuando se quiere utilizar para describir programas o sistemas paralelos. Con esta finalidad, se añade un entorno formado por un conjunto de variables y de operadores que "dialoga" con la red, separando el sistema en una parte de control y en una parte operativa.

Las redes de Petri temporizadas son redes no autónomas, cuyo entorno suministra una referencia de tiempo común. Se utilizan para estudiar el comportamiento dinámico de los sistemas, teniendo en cuenta, únicamente, la duración de sus acciones (y no la manera en que transforman el estado del entorno). En este caso, la presencia de una marca en una plaza, controla una acción a la que se le asocia una duración. Ésta, que puede ser variable en el caso general, viene representada por una constante no negativa, asociada a la plaza que controla la acción. Para tener en cuenta la duración de las acciones, se modifican las reglas de franqueo de las transiciones. Así, si una marca llega a una plaza "p" en un instante "t" y si a partir de esta plaza se controla una acción de duración "z", esta marca no puede abandonar la plaza "p" antes del instante "t + z".

A causa de ello se supone que las marcas en las redes temporizadas tienen dos estados: disponible e indisponible. El paso del estado disponible al indisponible se efectúa en el momento del franqueo de las transiciones, de manera que las marcas colocadas en las plazas de salida de una transición, después de su franqueo, se encuentran en el estado indisponible. Éste corresponde a la situación en que, por su sola presencia, una marca controla una acción que se está ejecutando.



---

Las marcas pasan del estado indisponible al estado disponible en una plaza "p", a partir del momento en que la acción asociada a "p" ha terminado. Entonces pueden utilizarse para el fi-anqueo de las transiciones.

El funcionamiento de una red temporizada puede simularse, aplicando el principio de separación entre parte de control y parte operativa, de la siguiente manera: la parte operativa contiene un conjunto de contadores, sincronizados por un reloj común. Cada plaza de la red tiene asociado un contador en el entorno. La llegada de una marca a una plaza inicializa el contador en un valor que corresponde a la duración de la acción controlada. Los contadores bajan en una unidad de tiempo en cada impulso de reloj, siempre que sus valores sean positivos. Cuando el valor de un contador es cero, se envía a la parte de control un aviso de fin de acción.

[13]



## 2.17 Representación de redes de Petri en SMF.

En un sistema de producción una máquina puede ser representada a través de la siguiente forma:

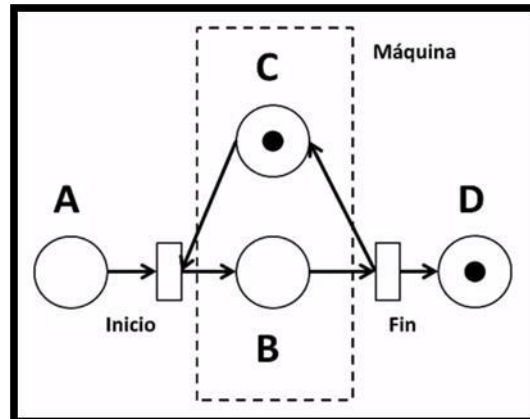


Figura 25. Representación de una maquina en una RdP.

En base a la figura anterior la forma de representar una maquina es a través de dos plazas, dos transiciones, seis conectores y un token inicial. A continuación, se describirá la función que tiene cada una de las transiciones.

La plaza A y D almacenan unidades de trabajo, en la plaza A es la entrada de la materia prima, mientras que en la plaza D es en donde se almacena el producto terminado. Mientras que las plazas B y C son las que representan a la máquina y es en esta en donde el token inicial juega su papel el cual consiste en determinar lo siguiente: cuando el token está en B la maquina está ocupada, cuando el token está en C, la maquina esta libre o en estado inicial. Las dos transiciones indican el inicio y fin de la operación.



La máquina esta usualmente representada por un triángulo compuesto por una sincronización y una concurrencia. Cuando el token de A pasa a B se sincroniza con C para que posteriormente se presente una concurrencencia.

### Sincronización

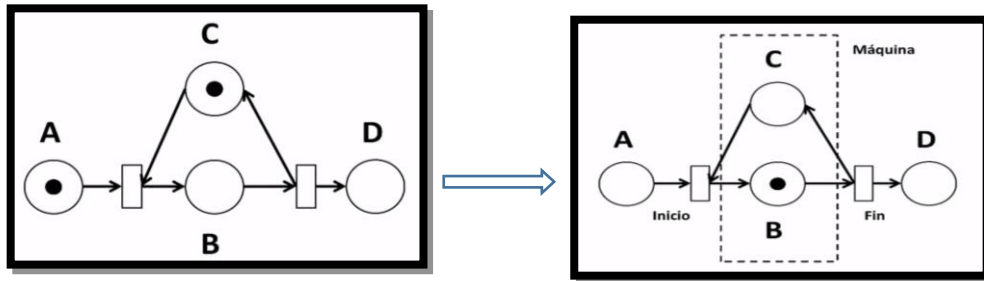


Figura 26. Sincronización de procesos en una RdP.

### Concurrencia

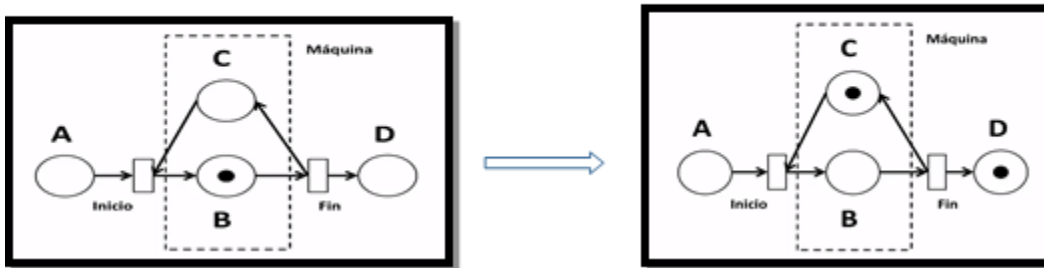


Figura 27. Concurrencia de procesos en una RdP.



---

### **CAPÍTULO 3. DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO A PARTIR DE RDP SOBRE LA CMF DE LA UNAM.**

En el presente capítulo, y en base a los capítulos anteriores, en donde se hace referencia a las estructuras y reglas admitidas por la técnica de Redes de Petri generalizadas, se comenzará a hacer una descripción del desarrollo de la RdP de manera particular sobre el software HP Sim ®, la cual, aproxima al sistema a funcionar bajo los objetivos definidos en el presente trabajo de tesis, dentro de los cuales, se encuentra principalmente llevar a cabo mejoras en la programación para la utilización los recursos albergados en el sistema, así como una ejecución de los procesos de torneado y fresado de manera simultánea o paralela empleando de procesos concurrentes y recursos compartidos.

Así mismo, se hará una descripción a detalle acerca del algoritmo resultante de la RdP, mediante un diagrama de flujo, el cual dará pie a la implementación física sobre el sistema de la CMF mediante la programación de PLC's.

Cabe señalar, que como primer punto, se conceptualizo la CMF de la UNAM, sobre el software HP Sim ®, con la finalidad de analizar las características propias del sistema, en donde los procesos de torneado y fresado se ejecutan de manera independiente, para que posteriormente se aplique la técnica de las RdP bajo el mismo software, pero ahora simulando los procesos de manera paralela, empleando los recursos compartidos ofertados por el sistema, así como una asignación eficaz de los recursos que ayude a aprovechar al máximo la disposición de la línea.

Posteriormente, se llevará a cabo la simulación de la RdP resultante sobre el software computacional Promodel 7 ®, con lo cual se analizarán de manera gráfica los procesos que le sean asignados a cada uno de los componentes de la celda.



### 3.1 Consideraciones particulares de la celda de manufactura flexible de la UNAM.

Para la conceptualización del sistema en general, se llevaron a cabo una serie de consideraciones en base a los elementos presentes en la CMF de la facultad de ingeniería de la UNAM, las cuales están regidas bajo las siguientes características:

- ✓ Eventos discretos, concurrentes
- ✓ Recursos compartidos
- ✓ Ejecución de procesos en paralelo
- ✓ Sistema autónomo al 100%
- ✓ Centro de maquinado CNC TORNO
- ✓ Centro de maquinado CNC FRESA
- ✓ Sistema embebido PLC's
- ✓ Almacén rotatorio, considerado como entidad de entradas y salidas I/O
- ✓ Robots (3) de carga y descarga de material
- ✓ Banda transportadora
- ✓ Panel de control



*Figura 28. Celda de Manufactura Flexible de la facultad de Ingeniería UNAM.*



### 3.2 Configuración y descripción de los elementos alojados en la CMF.

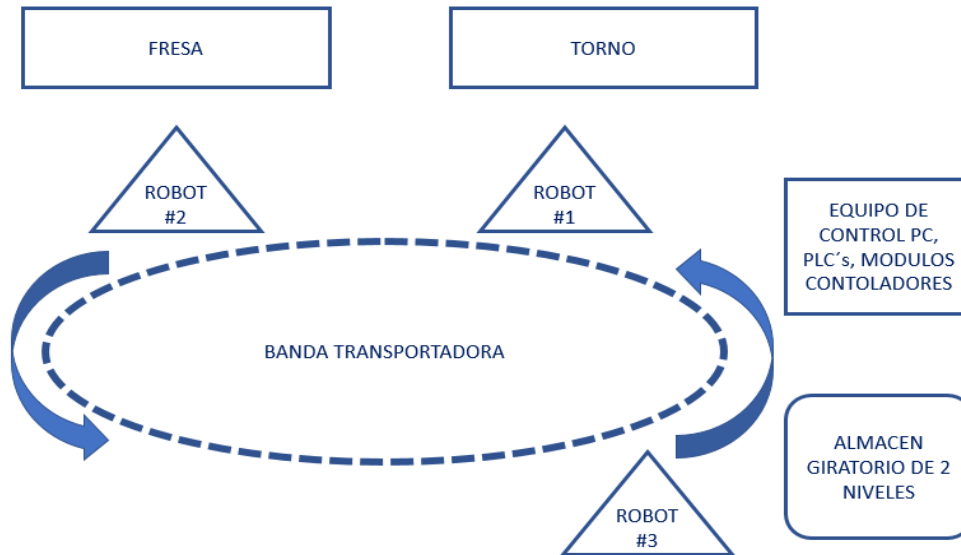


Figura 29. Configuración en ciclo de la Celda de Manufactura Flexible UNAM

- ✓ **Almacén rotatorio**, es considerado como una entidad de entradas y salidas de material, en donde se tendrán albergadas 36 piezas de materia prima en dos niveles, separados entre tochos (18) y barras (18), con la finalidad de establecer un equilibrio de carga de materiales y procesos a lo largo del sistema de producción.

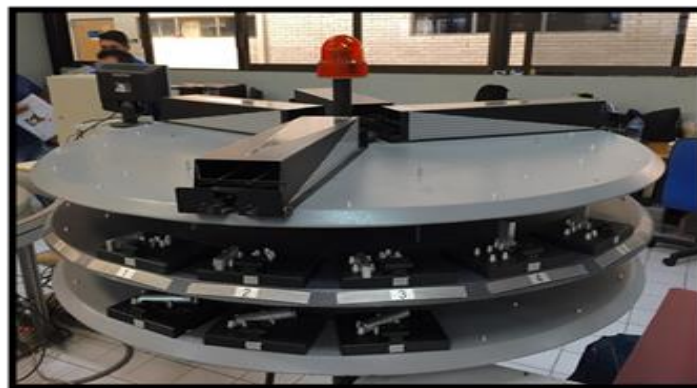


Figura 30. Almacén rotatorio de dos niveles, distribuido con materia prima entre tochos y barras.



- ✓ **Robots:** En la celda, se cuenta con tres manipuladores tipo *Scorbot ER VII*, de los cuales se ocupa el Robot #1 para el suministro de materia prima del almacén rotatorio hacia la banda transportadora, así como descarga de material de la banda transportadora al almacén, realizando un reacomodo de productos ya manufacturados, siendo esta máquina (Robot #1) un recurso compartido, debido a que se emplea para el transporte de ambos productos, y ejecuta operaciones en base a las condiciones lógicas descritas por el estado del sistema.



Figura 31. Robot Scorbot de 5 GDL, definido como Robot #1 para efectos de la simulación (Maq.1), cuya disposición es a un costado del almacén giratorio para el suministro de material de entrada y salida





Robot 2 y Robot 3, empleados como máquinas de transporte de material de la banda transportadora hacia los centros de maquinado correspondientes, y viceversa, tras finalizar las operaciones de manufactura programadas.



*Figura 32. Robot Scorbot de 5 GDL, definido como Robot #2 para efectos de la simulación (Maq.4), cuya disposición tiene como finalidad que después de que la materia prima (tochos cilindrados) se encuentren en la banda transportadora mediante un template con pallet, el robot la lleve hacia la posición del centro de maquinado de torno para ejecución del proceso de manufactura, y viceversa.*



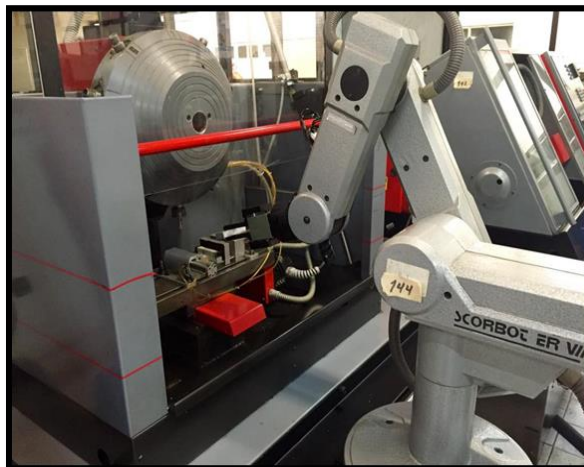
*Figura 33. Robot Scorbot de 5 GDL, definido como Robot #3 para efectos de la simulación (Maq.2), cuya disposición tiene como finalidad que después de que la materia prima (barras) se encuentren en la banda transportadora mediante un template con pallet, el robot la lleve hacia la posición del centro de maquinado de fresa para ejecución del proceso de manufactura, y viceversa.*



- ✓ **Centros de maquinado CNC**, en la celda se cuenta con 2 centros de maquinado (CNC), siendo torno (*EMCO TURN 120*) y Fresa (*VMC-100*) para la realización de operaciones de manufactura programadas por el usuario, los cuales serán considerados y definidos como entidades o plazas dentro de la CMF, principalmente para el análisis de la RdP dentro del software HP Sim®.



*Figura 34. Centro de maquinado CNC tipo EMC TURN 120 para elaboración del proceso de torneado, definido como entidad 1 para efectos de la simulación, cuya disposición tiene como finalidad que después de que la materia prima (tochos cilindrados) se encuentren en la banda transportadora mediante un template con pallet, el robot sea quien le suministre de materia prima para la ejecución de las tareas programadas previamente.*



*Figura 35. Centro de maquinado CNC tipo VMC-100 para elaboración del proceso de fresado, definido como entidad 2 para efectos de la simulación, cuya disposición tiene como finalidad que después de que la materia prima (barras) se encuentren en la banda transportadora mediante un template con pallet, el robot sea quien le suministre de materia prima para la ejecución de las tareas programadas previamente.*



- ✓ **Banda transportadora**, es un sistema de transporte continuo de materiales, el cual contiene pallets montados sobre templates para el abastecimiento de materia prima proveniente del almacén rotatorio por medio del robot #1, así mismo, se ocupa de un almacén temporal o buffer sobre la banda misma, para los templates con piezas ya manufacturadas, en donde al acumularse seis elementos (templates) pasara a entrar en interacción con el Robot #1 para el transporte de la piezas de la banda hacia el almacén rotatorio.



*Figura 36. Banda transportadora, definida como entidad temporal para efectos de la simulación, cuya disposición tiene como finalidad que después de que la materia prima se encuentre sobre los templates contenidos en la banda, estos sean transportados hasta las entidades de los centros de maquinado, para que después de la finalización el proceso de manufactura, se adopte una estructura de almacén temporal o buffer en la curva previa al almacén rotatorio, con el objetivo de que al ser acumulados seis templates de manera consecutiva con productos procesados, estos sean reacomodados por el Robot #1 en el almacén rotatorio.*



---

### **3.3 Limitantes del sistema.**

Dentro de las principales limitantes presentes en la CMF de la UNAM, es que no se cuenta con una asignación adecuada de los recursos ofertados por el sistema, es decir, que al no realizar los dos procesos en paralelo no se aprovechan al máximo las características y especificaciones con las que cuentan los robots albergados, provocando que no se ejecuten ciclos continuos en las máquinas CNC, así como una deficiente distribución en almacén temporal o buffer para el reacomodo de los productos ya procesados.

### **3.4 Aplicación de la herramienta HP Sim ®**

La herramienta HP Sim ®, fue desarrollada para diseñar y simular Redes de Petri mediante soportes gráficos, facilitando el desarrollo de redes complejas y de gran tamaño, únicamente limitadas por la capacidad del ordenador utilizado. El software permite desarrollos tales como, Redes de Petri de Transición, Redes de Petri Estocásticas, y Redes de Petri temporales. [2]

Para esta herramienta HP Sim, en donde la simulación supone la ejecución de los pasos consecutivos en un proceso que satisface sus especificaciones, las simulaciones que realiza pueden ser visualizadas como una animación donde una ficha coloreada (token) indica la actividad que se está ejecutando en cada momento. Animación que puede ser ejecutada en diferentes modos (paso a paso, continuo, rápido, etc.)



### 3.5 Modelado del Sistema

Modelar el sistema consiste en realizar una representación basada en la evolución de las salidas, las cuales están en función de la secuencia de entradas, es decir, nos enfocaremos en la ejecución de los procesos de torneado y fresado de manera paralela empleando de recursos compartidos, los cuales, serán fundamentales para la realización de los procesos de manufactura, pues la interrelación existente entre estos procesos recaerá ampliamente sobre el recurso mencionado, a partir de la lógica empleada en el desarrollo de la red.

Como ya hemos visto anteriormente para los procesos secuenciales, se debe conocer cada uno de los estados por los que pasa el sistema con la finalidad de determinar cómo serán las salidas en función de las entradas en ese instante, teniendo en cuenta que también el estado interno evoluciona en función de las entradas.

Por lo anterior, es fundamental conceptualizar y analizar el sistema desde que recibe entradas tanto los eventos que le sucedan (por ejemplo, la llegada de una pieza nueva) así como las órdenes de actuación (o de acción) que le envía la automatización dada por la lógica del sistema basado en la RdP. En virtud de dichas entradas y de su estado interno el sistema produce una respuesta y modifica su estado interno. De dichas respuestas, las que interesen son transmitidas a la automatización. Un evento puede ser prácticamente equivalente a una respuesta (ante el evento de llegada de una pieza se produce la respuesta de tener activo el sensor de llegada de piezas), con lo cual la automatización se puede enterar (indirectamente) de los eventos.

Otra cuestión interesante a la hora de realizar el modelado del sistema es que se puede realizar un modelo más o menos exacto en función de las necesidades. Cabe mencionar, que a veces es suficiente una aproximación simple al sistema, y otras veces puede ser crítico tener un modelo prácticamente exacto al sistema.



---

### 3.6 Simulación en HP Sim ®.

A partir de las estructuras mencionadas en el capítulo 2 sobre el comportamiento y propiedades de las Redes de Petri, se hará una descripción del sistema simulado en el software HP Sim ®, en donde se consideran por completo las condiciones y estados por los cuales pasa el sistema al entrar en operación, todo ello con la finalidad de obtener la ejecución de los procesos de manufactura de torno y fresa de manera simultánea, empleando de todos los recursos albergados en el sistema.

El torno y la fresa son herramientas utilizadas para cortar materia prima, pero haciéndolo de manera diferente. Los tornos producen un giro continuo en el material a trabajar mientras que la fresadora constituye una herramienta giratoria que efectúa diferentes operaciones de corte.

La diferencia entre torno y fresadora es que con el torno se crean piezas cilíndricas; la materia prima gira sobre un plato y la herramienta va cortando y dando forma. En una fresadora el material está estacionado mientras que gira la herramienta (normalmente son de formas cilíndricas como fresas, brocas,...) eliminando el material sobrante.

Para trabajos de formas cilíndricas es más conveniente el uso de torno y cuando hay que efectuar cortes rectos o en ángulo es preferible utilizar una fresadora. El torno y fresadora son dos máquinas necesarias para la industria de la mecanización. [14]

A continuación, se hará una descripción del desarrollo de la RdP de la Celda de manufactura flexible de la Facultad de Ingeniería, así como las partes que la componen, todo esto mediante capturas de pantalla de la simulación con el objeto de indicar paso a paso las condiciones de entradas y salidas correspondientes para la ejecución de los procesos.



**Almacén giratorio**, el cual está representado como una plaza cuya capacidad es de 36 unidades (tokens) de materia prima distribuidos entre tochos y barras para la inicialización de los procesos de producción, en el desarrollo de la red ocupa de una estructura de distribución en Y, con la finalidad de llevar a cabo una separación de materiales para efectos únicamente de simulación, ya que físicamente el almacén cuenta con dos niveles para cada tipo de materia prima, cabe señalar, que el peso dado a los arcos provenientes de la plaza del almacén es de 18 tokens, lo cual ayudara a que pasen 18 tochos y 18 barras a sus respectivos estados iniciales, es decir, en la simulación se requiere de hacer una diferencia de materiales debido a la lógica empelada para la inicialización de los procesos dada la condición de existencia de materia prima en el estado inicial.



Las condiciones lógicas empleadas para la inicialización del sistema son:

**Entradas:**

- ✓ Bandera de inicialización de proceso con 18 elementos de materia prima (barras) disponibles, debido a que el estado inicial del sistema se encuentra en función de la primera operación a ejecutar (fresado), es decir, que al



haber 18 unidades en un estado “cero”, el sistema detecta que se estará por comenzar la operación en el sistema productivo.



*La bandera de inicialización será representada por una plaza cuya capacidad inicial será de 18 tokens, con la finalidad de que se tenga un comportamiento adecuado en la programación e implementación del sistema físico, pues al no existir dicha condición podría tornarse a errores en el manejo de la presencia o no de material a procesar.*

- ✓ Condición de existencia de 36 tokens en el almacén giratorio inicialmente, indicando que el sistema esta abastecido al 100% de materia prima entre tochos y barras.

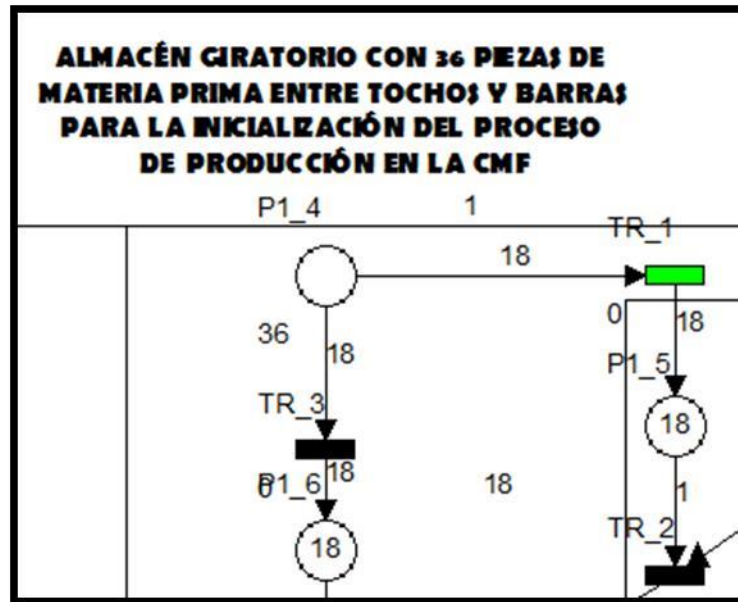
### **Salidas:**

- ✓ Como se mencionó anteriormente, se hará una distribución en “Y” de las 36 piezas de materia prima distribuyéndolas a una plaza que identifique entre tochos y barras respectivamente para que se tengan separados los elementos a manufacturar y se asimile a los niveles presentes en el almacén giratorio.





Por lo tanto, a partir de las condiciones descritas acerca del almacén rotatorio, se tiene la distribución en “Y” de las piezas como se observa en la siguiente figura:



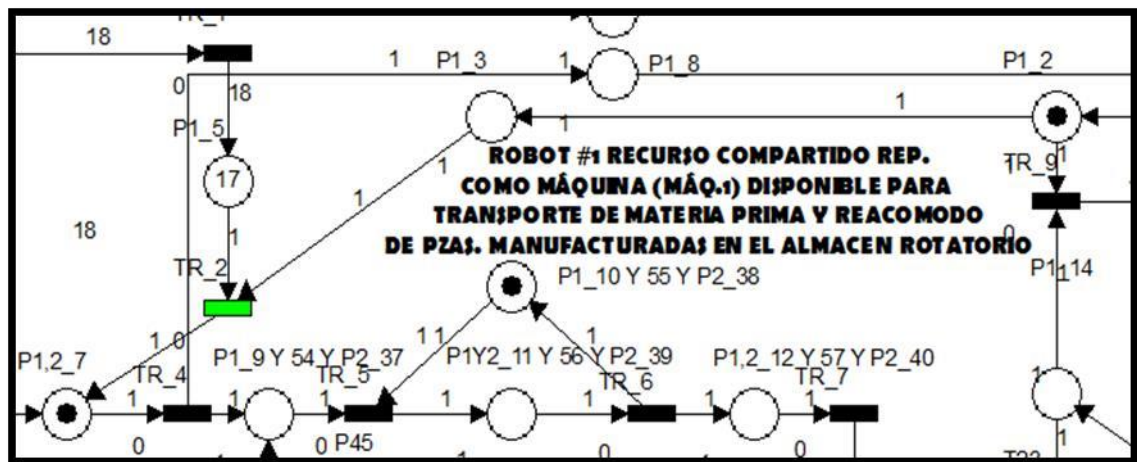
Dicha distribución, dará pie a la entrada de material al primer robot establecido como recurso compartido (Robot #1).

**Robot 1**, dentro de la simulación y diseño de la Red de Petri, se hace la representación del Robot #1 bajo la configuración de una máquina compuesta por una sincronización y una concurrencia, en donde sus características descritas con anterioridad facilitan la visualización grafica de las operaciones a realizar, es decir, una vez que las condiciones de existencia de materia prima en el almacén, así como el estado de la bandera inicial sean validadas por la lógica de la Red, darán paso a la ejecución de la lógica del recurso compartido (Robot #1).



Cabe señalar, que se ha definido al Robot #1 como un recurso compartido al ser una maquina empleada para dos tareas distintas, las cuales son:

- El transporte de materia prima proveniente del almacén rotatorio hacia la banda transportadora ya sean tochos o barras.
- Ejecución del reacomodo de las piezas ya manufacturadas.

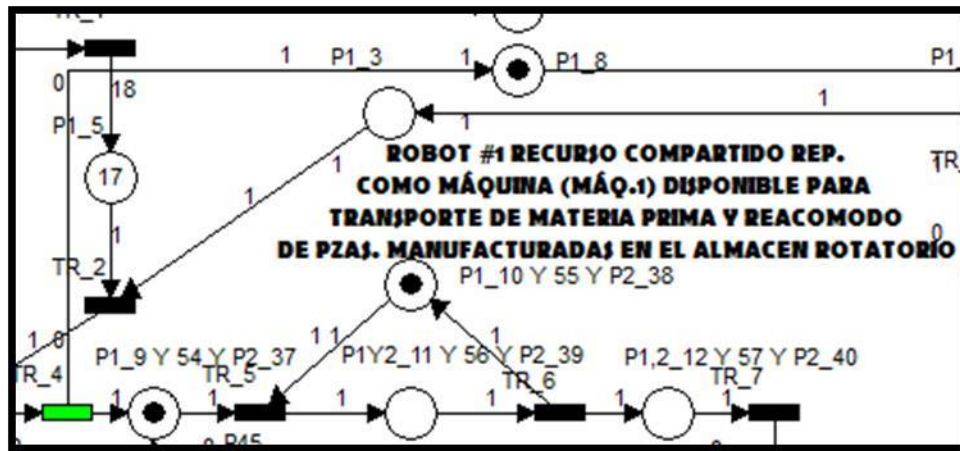


*Robot #1, representado como una máquina, en donde al existir una serie de validaciones sobre disposición de materia prima, además de la disponibilidad de este, se llevará a cabo la ejecución del transporte de material.*

Las condiciones lógicas empleadas para la inicialización de transporte de materia prima del almacén rotatorio a la banda transportadora son:

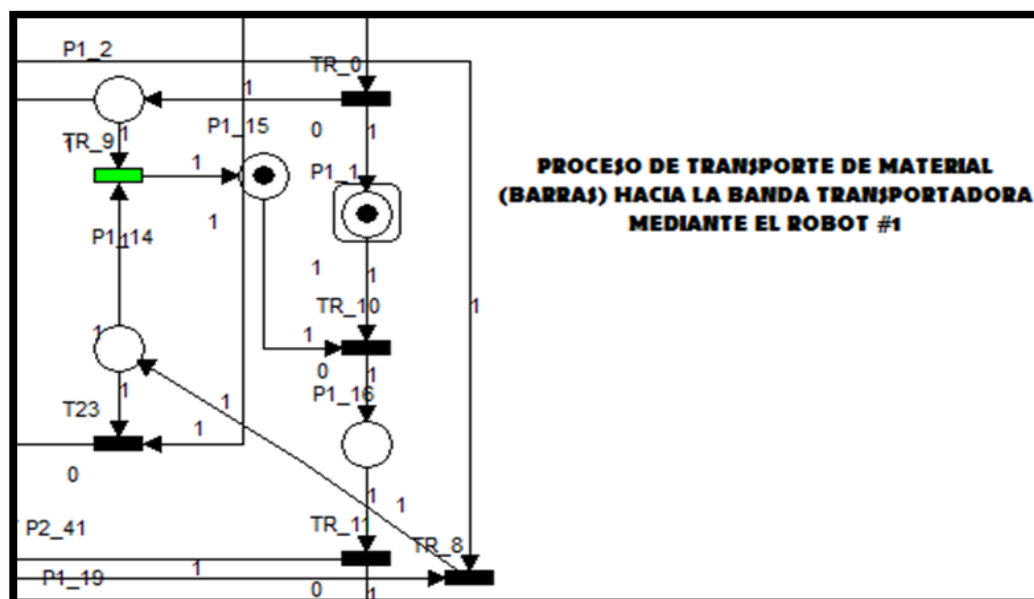
**Entradas:**

- ✓ Existencia de materia prima por manufacturar, ya sean tochos o barras, esto, en función del estado en el que se encuentre el sistema.
- ✓ Verificación de la disponibilidad del Robot #1, con la finalidad de que no se generen conflictos lógicos en el sistema productivo.

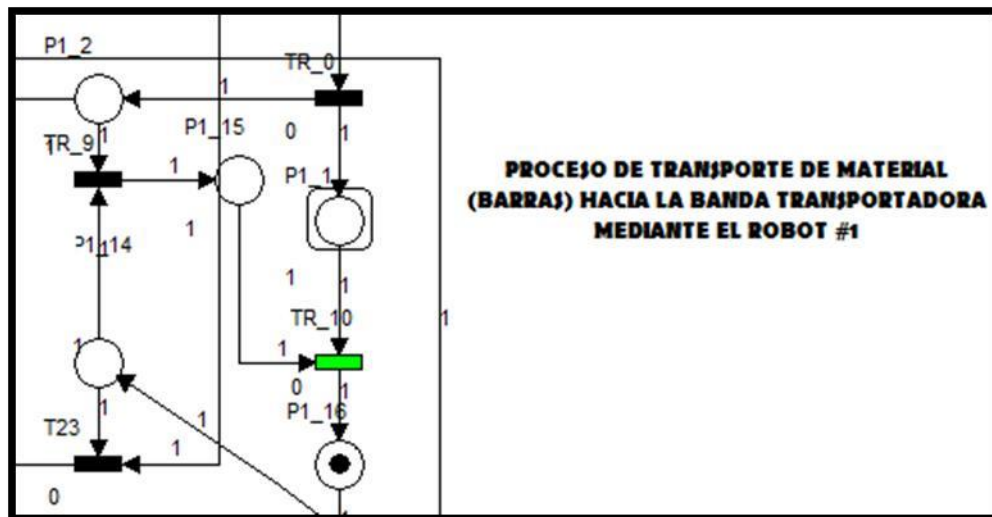


**Salidas:**

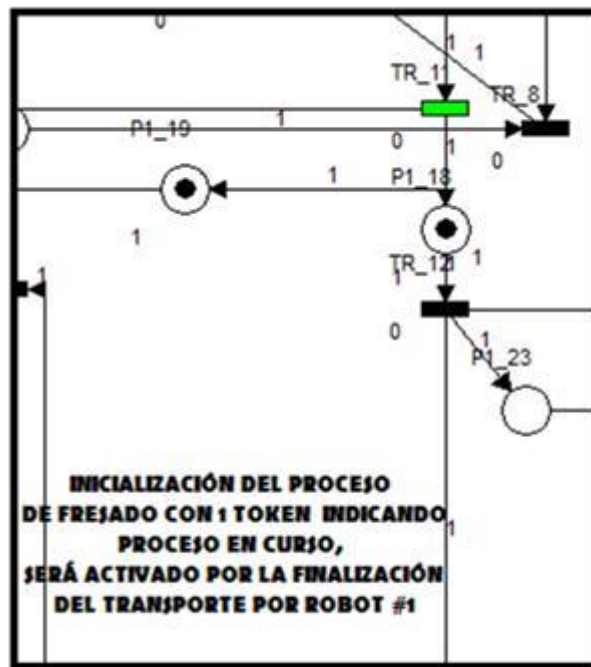
- ✓ Transporte de materia prima proveniente del almacén rotatorio hacia la banda transportadora.
- ✓ Ocupando la conjunción de las validaciones acerca de la existencia de material, así como la inicialización de su transporte, se da paso a un estado de espera, en el cual se indica que existe una operación de la maquina como se muestra en la siguiente figura.



- ✓ Posterior al estado de la finalización del transporte de la materia prima a la banda transportadora, mediante una transición se llega al estado en el que la materia prima se encuentra posicionada en la banda, representado como se muestra a continuación.



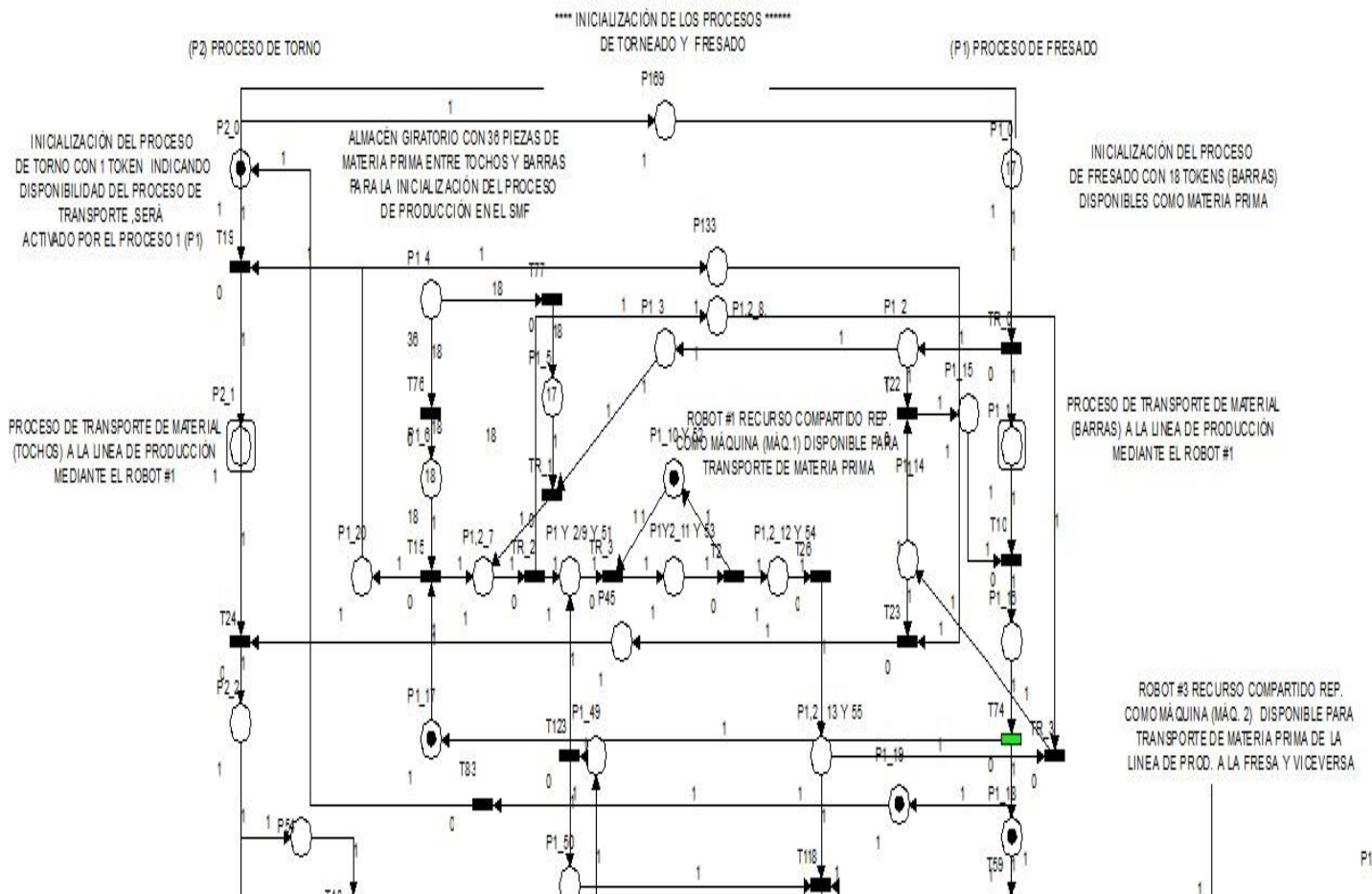
- ✓ Una vez colocada la primer pieza de materia prima (barra) en la banda transportadora, mediante una transición se genera una estructura de distribución, a partir de la cual, se lleva a cabo la realización de una concurrencia o paralelismo de los procesos, pues al realizarse la primera operación correspondiente al transporte de la primer barra a la banda, y tras estar colocado en esta, comienzan a entrar en operación las condiciones lógicas para la realización de los procesos en paralelo, dando pauta a que una vez que se dé dicha validación, se inicialice el transporte del siguiente tipo de material (tocho) empleando el recurso compartido definido como Robot #1.



- ✓ Una vez generada la transición anteriormente descrita para la ocurrencia de procesos en paralelo, se contempla una estructura de distribución bajo el concepto de procesos paralelos o concurrentes en el sistema, lo cual da pauta al cumplimiento de la condición de disponibilidad del proceso de transporte al template de tochos mediante el Robot#1 como recurso compartido.



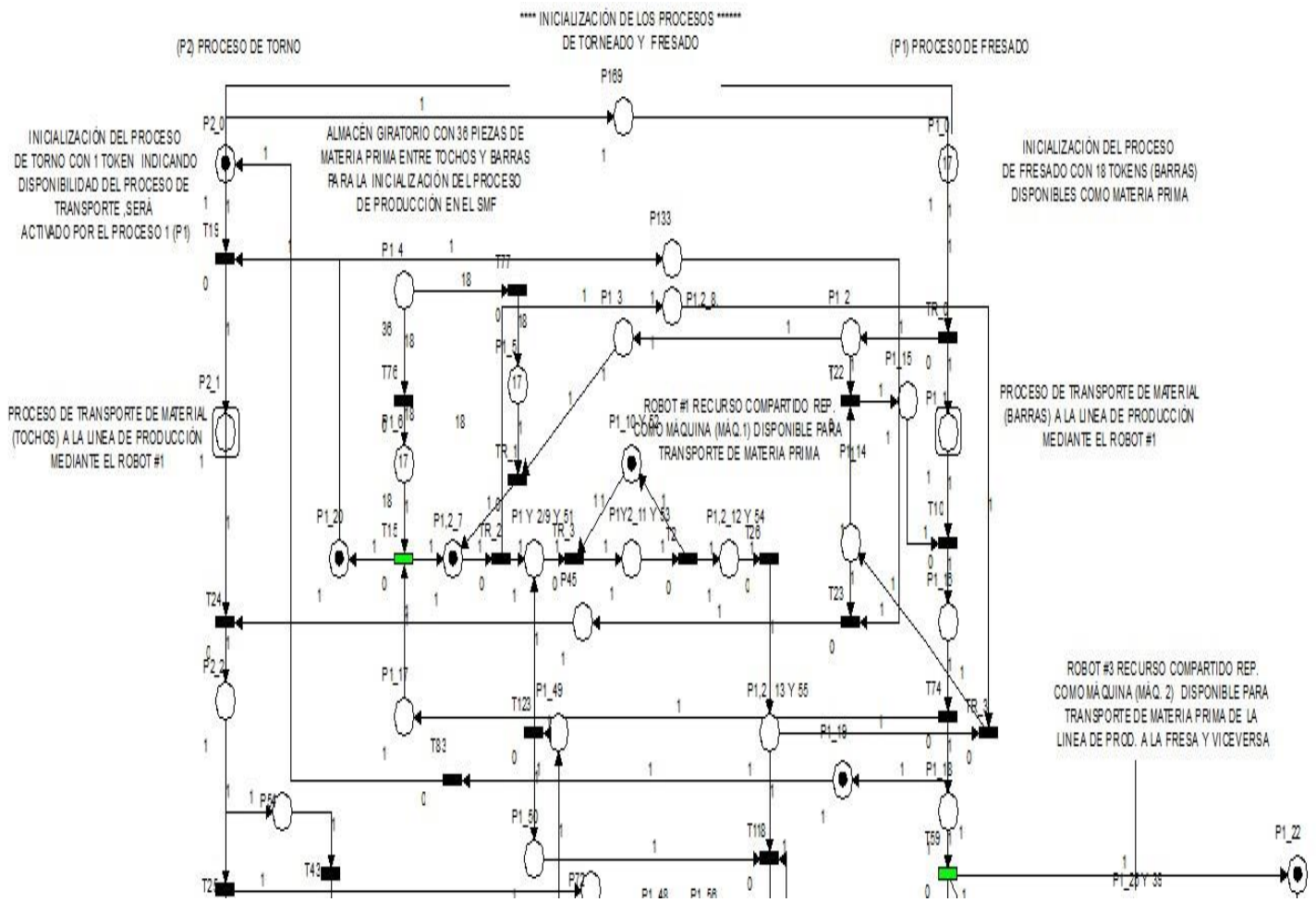
DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO  
BASADO EN RDP APLICABLE A UNA CELDA DE  
MANUFACTURA FLEXIBLE



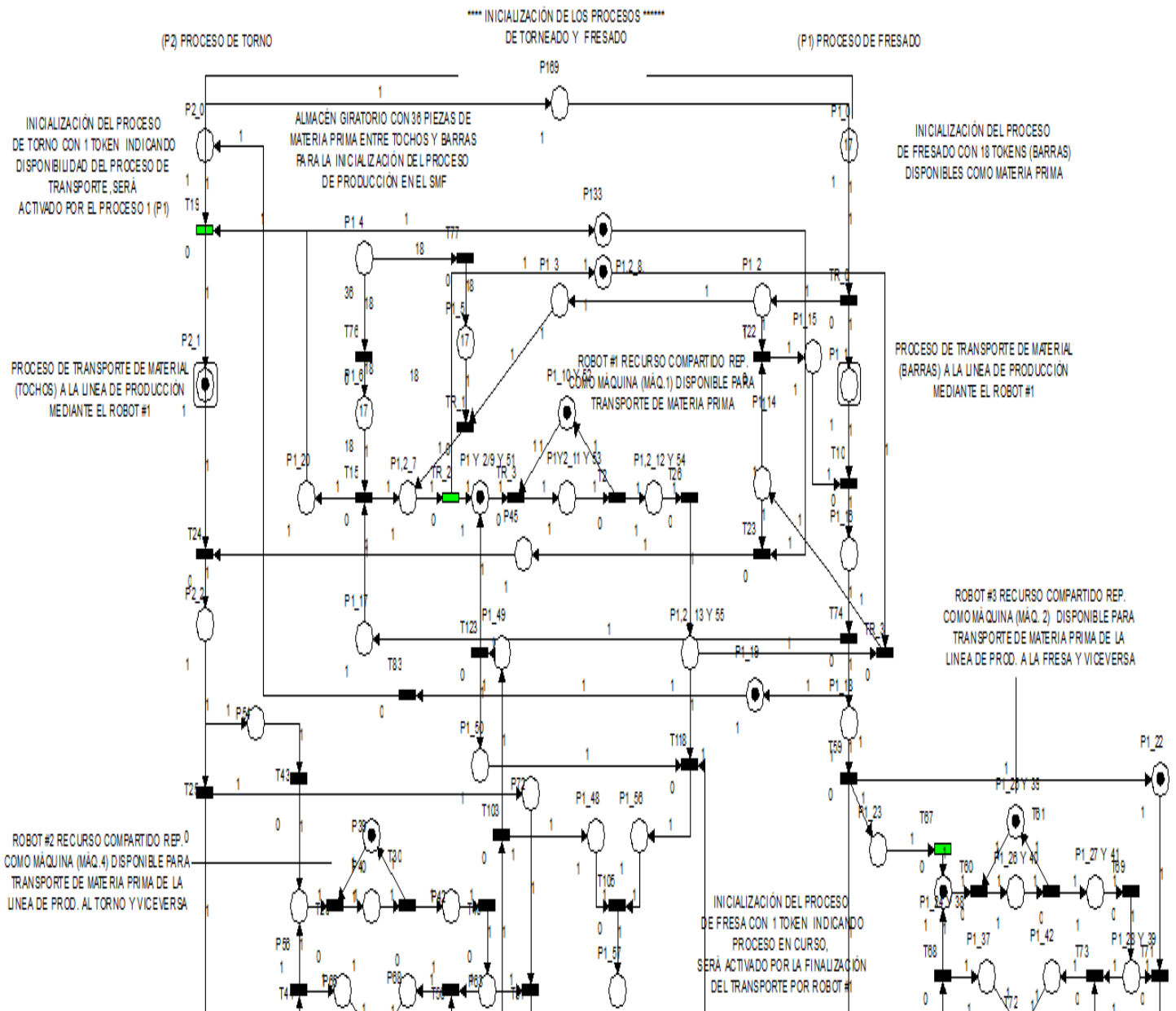
Así mismo, es entrada de la transición de estado del almacén de tochos conjuntamente con material disponible para comenzar con el proceso de Inicialización de torno desde la transportación de la pieza del almacén giratorio a la banda de producción.



DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO  
BASADO EN RDP APLICABLE A UNA CELDA DE  
MANUFACTURA FLEXIBLE



Es importante señalar, que es aquí en donde comienza el paralelismo de ejecuciones de manufactura en el sistema, ya que justo en este estado se tiene la transportación de la barra a la fresa mediante el recurso Robot#3 a partir de la representación de (MAQ.2)



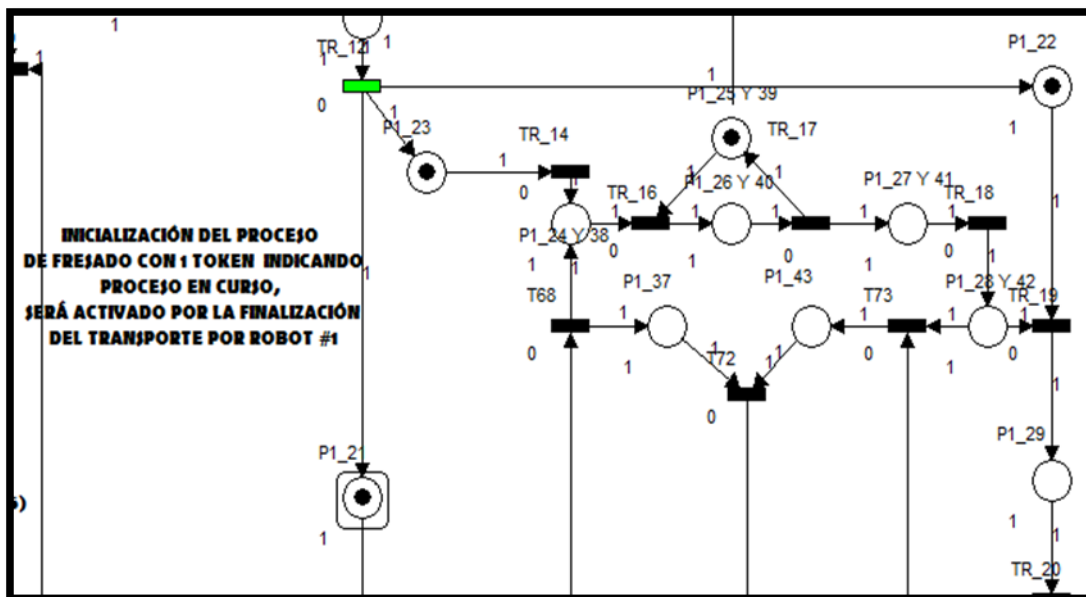
A continuación, se describe a detalle el proceso de fresado, para guiar al lector a este como el primer establecido en el algoritmo, ya que por determinación en el equipo de trabajo se coordinó inicializar tareas CNC con Fresa por tiempos mayores en la elaboración de su manufactura.





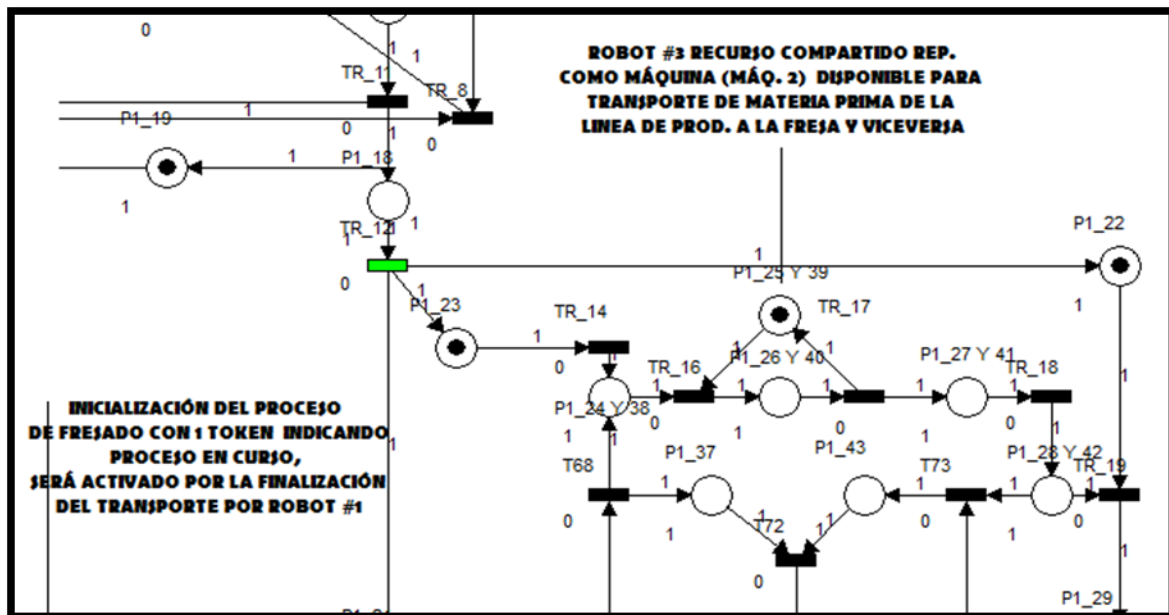
### Inicialización del proceso de fresado.

- ✓ A partir de las condiciones anteriormente descritas, y tras ubicar la materia prima (barras) sobre la banda transportadora, se lleva el material del punto donde fue colocado hacia donde se ubica el centro de maquinado CNC, en donde se ejecutara el proceso de fresado, tras una validación previa de material, es decir, mediante un sensado del template se identificará si el material colocado sobre el pallet es el adecuado para la realización del proceso, lo cual garantiza que no existirán errores en la manufactura del material, así como de la disponibilidad del centro de maquinado.
- ✓ Una vez realizada la validación, se ocupará de una distribución, en donde la marca (token) se dirige hacia el indicador de estado de espera, lo cual indica que existe la inicialización del proceso de fresado, en donde se requiere del Robot #3 para el transporte del material (barra) de la banda transportadora hacia el centro de maquinado.





**Robot 3**, al igual que para la representación del Robot #1, dentro de la simulación y diseño de la Red de Petri, se hace la representación del Robot #3 bajo la configuración de una máquina compuesta por una sincronización y una concurrencia, permitiéndonos visualizar de una manera gráfica las operaciones a realizar, es decir, una vez que las condiciones de existencia de materia prima en la banda transportadora, así como el estado de espera para la inicialización del proceso de fresado sean validados por la lógica de la Red, darán paso a la ejecución del proceso de transporte de las barras hacia el centro de maquinado. Este robot se ha definido como un recurso compartido tras efectuar las tareas de transporte de material (barras) de la banda transportadora hacia el centro de maquinado CNC con operación de fresa, además de realizar la tarea de colocar nuevamente la pieza ya manufacturada sobre la banda transportadora, para que esta se dirija hacia un almacén temporal o buffer definido dentro de la misma banda.



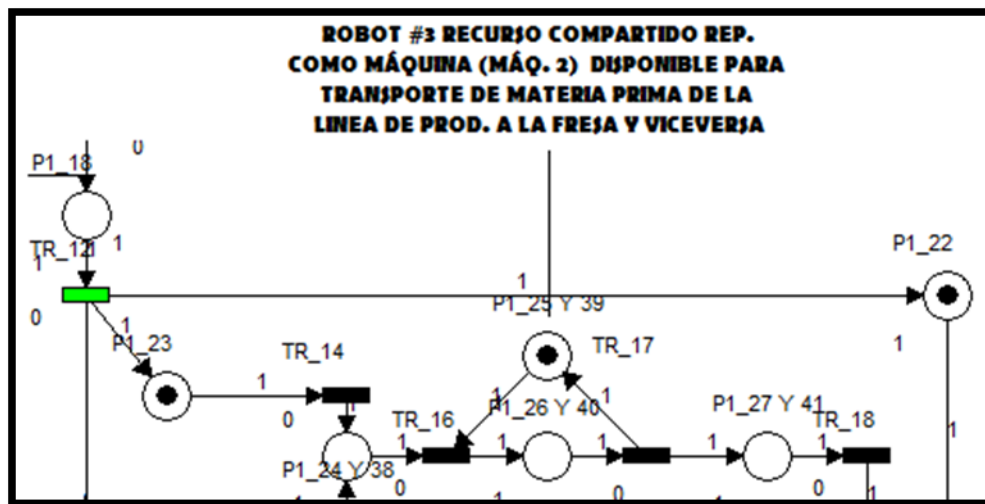
*Robot #3, representado como una máquina, en donde al existir una serie de validaciones sobre disposición de materia prima sobre la banda transportadora, además de la disponibilidad del mismo, se llevará a cabo la ejecución del transporte de material hacia el centro de maquinado CNC Fresa.*



Las condiciones lógicas empleadas para la inicialización de transporte de materia prima (barras) de la banda transportadora hacia el centro de maquinado son:

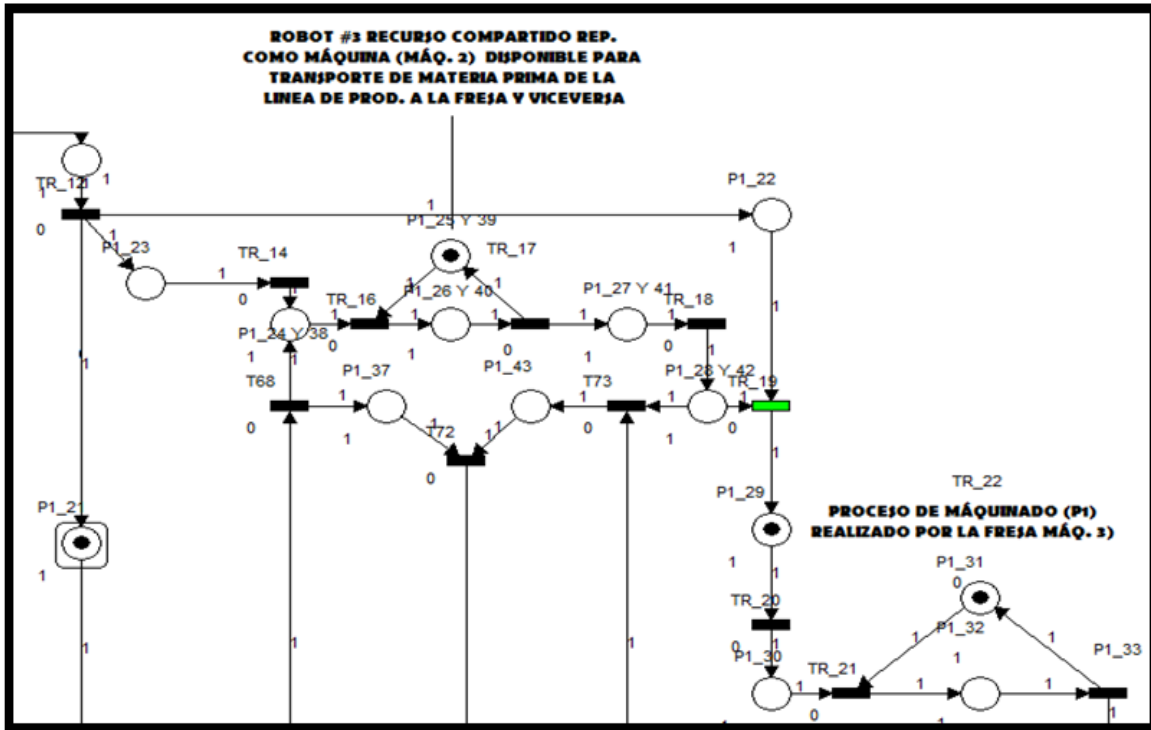
### Entradas:

- ✓ Presencia del template con material adecuado sobre el pallet.
- ✓ Verificación de la disponibilidad del Robot #3, con la finalidad de que no se generen conflictos lógicos en el sistema productivo.



### Salidas:

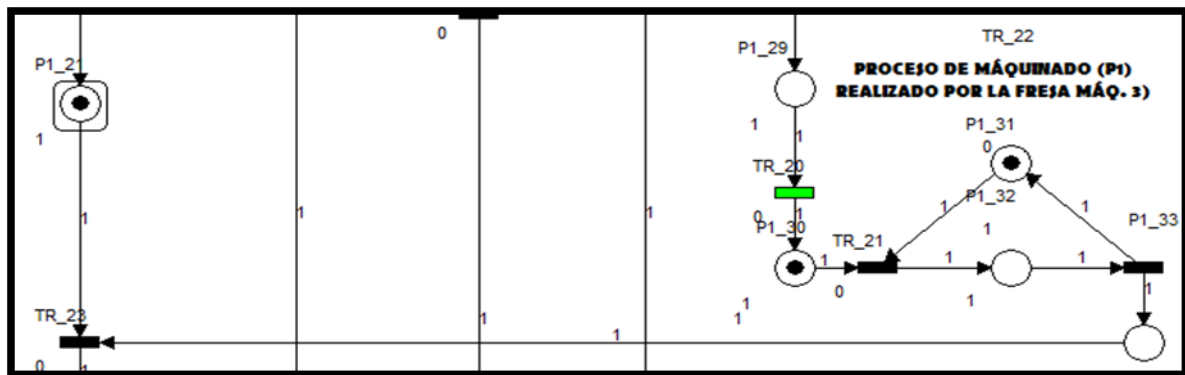
- ✓ Empleando la conjunción de las validaciones acerca de la existencia de material sobre la banda, así como la inicialización de su transporte, se da paso a un estado de espera, en el cual se indica que se ha inicializado el proceso de fresado.
- ✓ Transporte de materia prima (barras) proveniente de la banda transportadora hacia el centro de maquinado (fresa).
- ✓ La transición de salida de la maquina (Robot 3) viene dada por una conjunción entre la finalización del transporte del material, así como por el estado de espera del sistema, lo cual dará lugar a la entrada de la inicialización del proceso de fresado en el centro de maquinado CNC.



Posterior a las condiciones mencionadas con anterioridad, se inicializará el proceso de fresado dentro de la entidad delimitada por la maquina número 3, cabe señalar, que el indicador del estado de espera acerca del proceso de fresado incluye los tiempos desde que el Robot 3 toma el material, lo deposita en el centro de maquinado, y se lleva a cabo el proceso de manufactura.



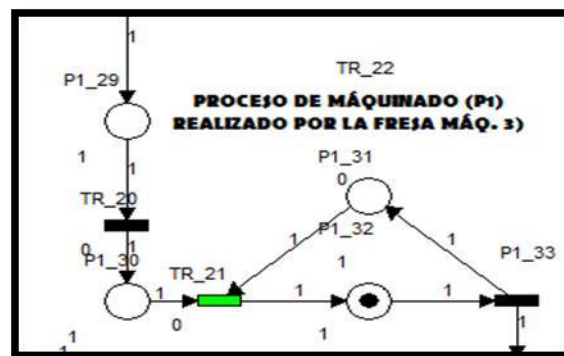
**Centro de maquinado CNC (Fresa),** como se ha venido manejando la representación de las maquinas dentro del desarrollo y simulación de la Rdp bajo un esquema que permite visualizar los estados por los cuales pasa la materia prima al ser procesada se ilustra de la siguiente manera:



Las condiciones lógicas empleadas para la inicialización del proceso de manufactura de torno son:

**Entradas:**

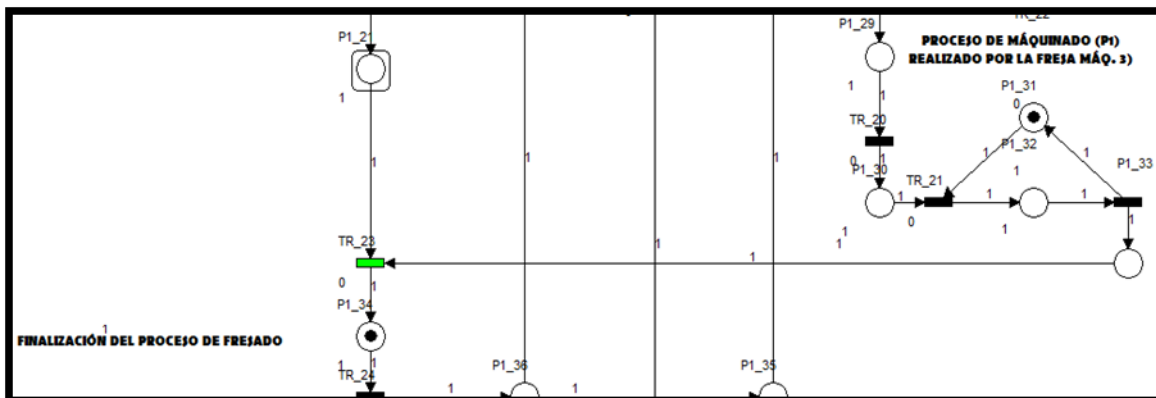
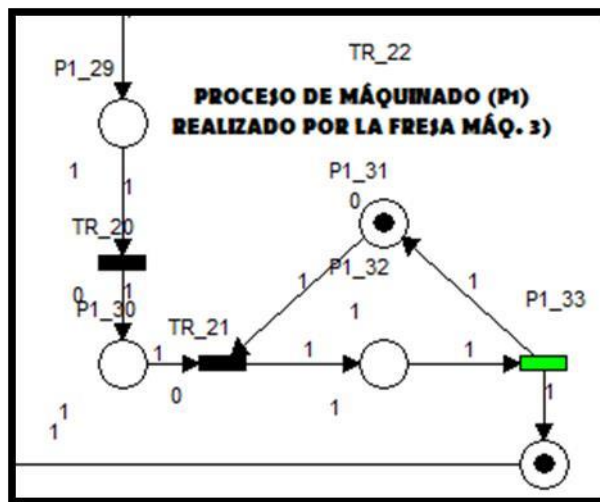
- ✓ Disponibilidad del centro de maquinado CNC, con la finalidad de que no se generen conflictos lógicos en el sistema productivo.
- ✓ Finalización del proceso de transporte de la barra hacia el centro de maquinado.





**Salidas:**

- ✓ Obtención de la pieza ya manufacturada.
- ✓ Entrada a una transición que indique la finalización del proceso de fresado y posteriormente se inicialice el proceso de transporte del material manufacturado del centro de maquinado hacia la banda transportadora.

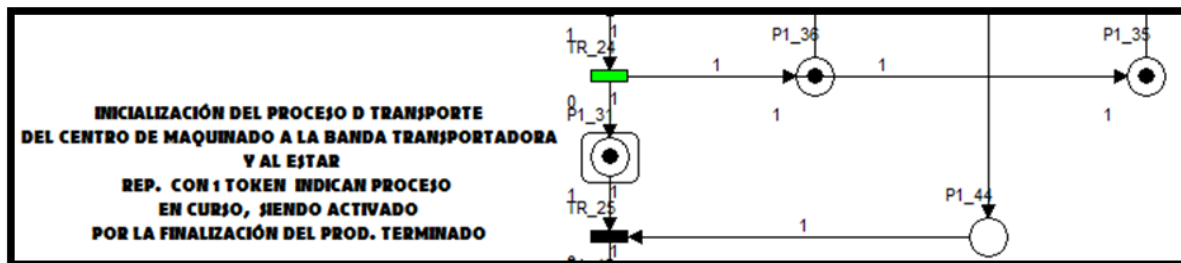




## Inicialización del proceso de transporte de la barra ya manufacturada del centro de maquinado hacia la banda.

Para la inicialización del proceso de transporte del producto ya manufacturado hacia la banda transportadora, se deben llevar a cabo una serie de consideraciones lógicas bajo los esquemas de las configuraciones vistas anteriormente, aunque deben de tratarse con especial cuidado y de una forma clara en la asignación de las variables de entradas y salidas al tratarse de un recurso compartido el cual ejecuta tareas distintas en diferentes estados del sistema como se muestra a continuación.

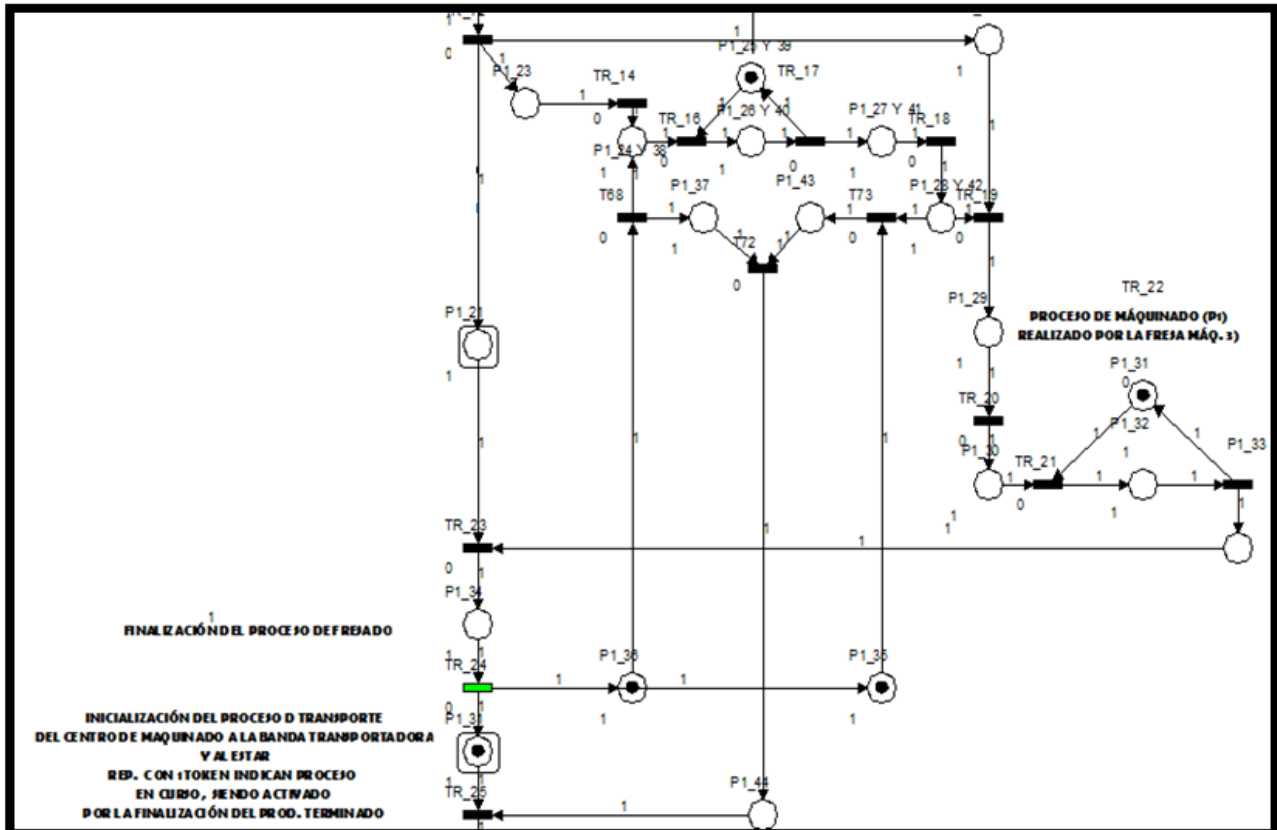
Una vez que se ha finalizado el proceso de manufactura en la fresa, se tiene el siguiente esquema:



En donde la transición de salida del estado anterior, lleva a una distribución de marcas o tokens para alcanzar los estados siguientes en el sistema sin que estos tengan conflictos en la ejecución de los procesos.



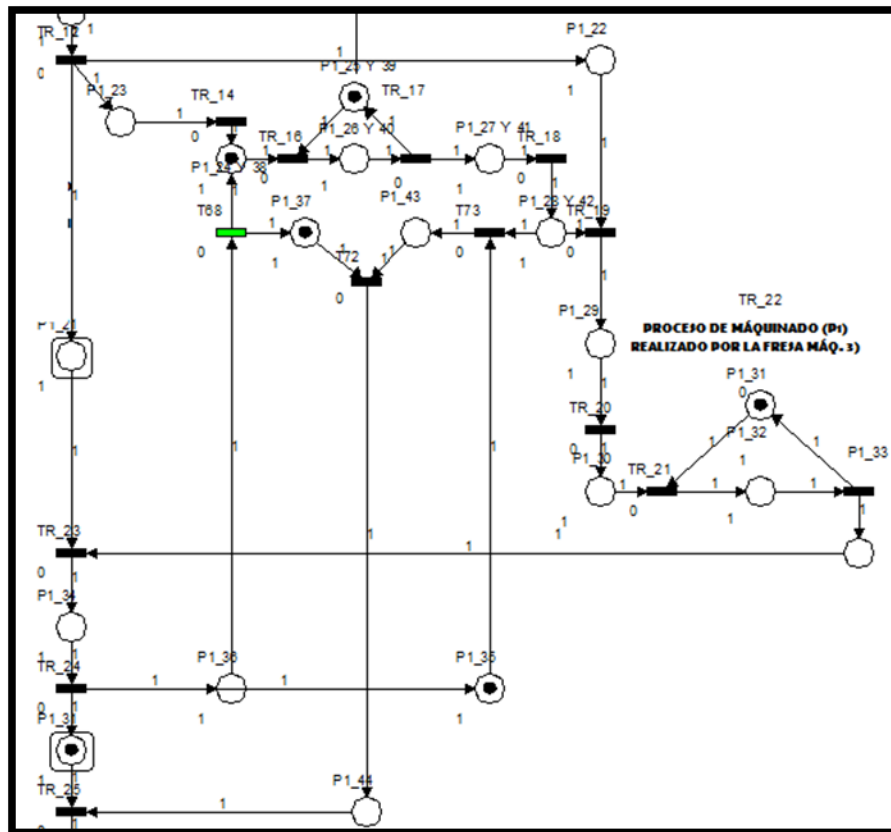
A partir de la distribución mencionada, y en conjunto con una serie de consideraciones lógicas, el Robot #3 ejecutara su segunda tarea asignada, la cual es el reacomodo de la pieza ya manufacturada en la banda.







Una vez realizada la distribución de las marcas, se hace la primera validación para el inicio del transporte de la pieza, aunque cabe señalar que, de la salida de la distribución, se integró otra del mismo tipo, con la finalidad de que se asegure que el sistema se encuentra en un estado que permita ejecutar la segunda tarea del Robot 3 como se muestra a continuación:

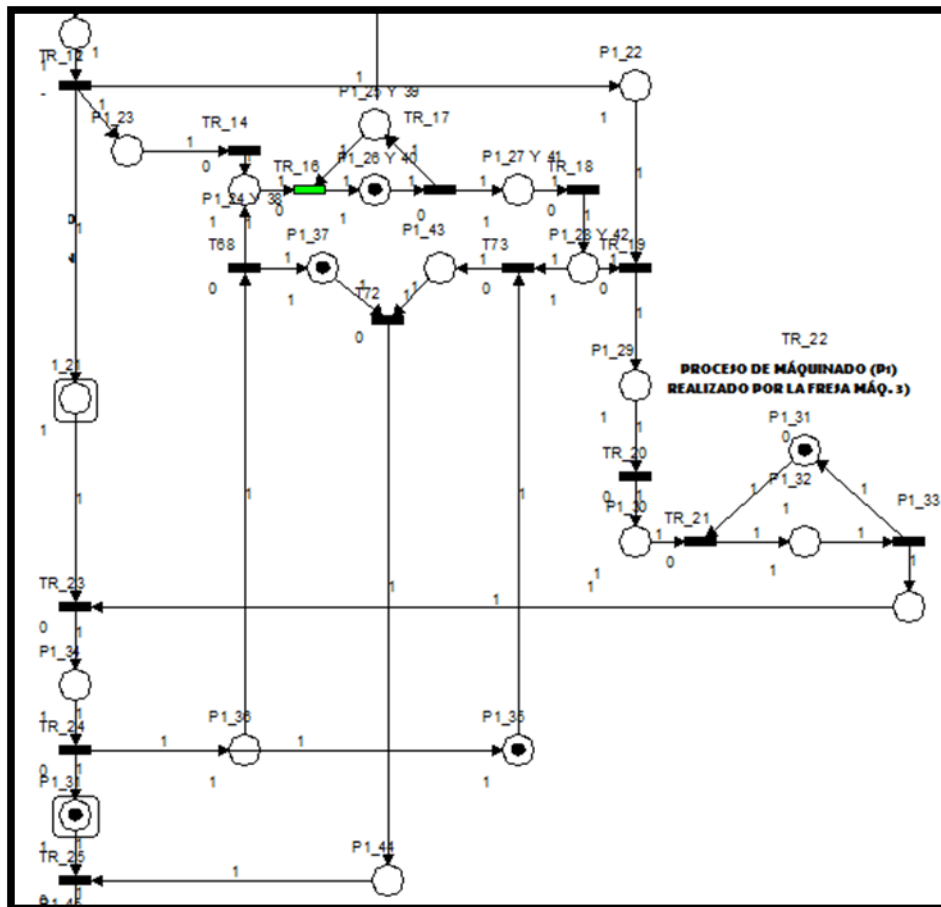




Las condiciones lógicas empleadas para la inicialización del transporte de la pieza manufacturada hacia la banda transportadora son:

**Entradas:**

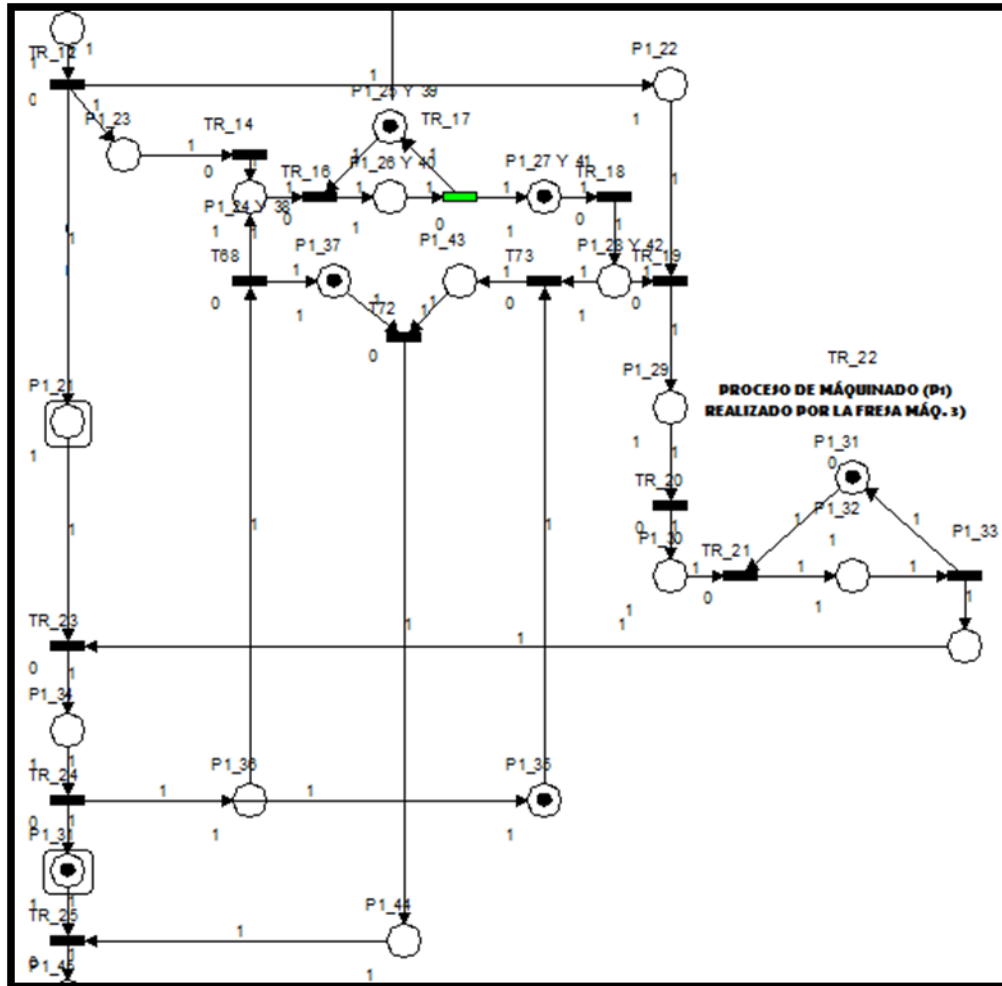
- ✓ Finalización del proceso de manufactura, en este caso, el de fresado.
- ✓ Estado de espera en el sistema para la ejecución del proceso.
- ✓ Verificación de la disponibilidad del Robot #3, con la finalidad de evitar conflictos lógicos en el sistema productivo.





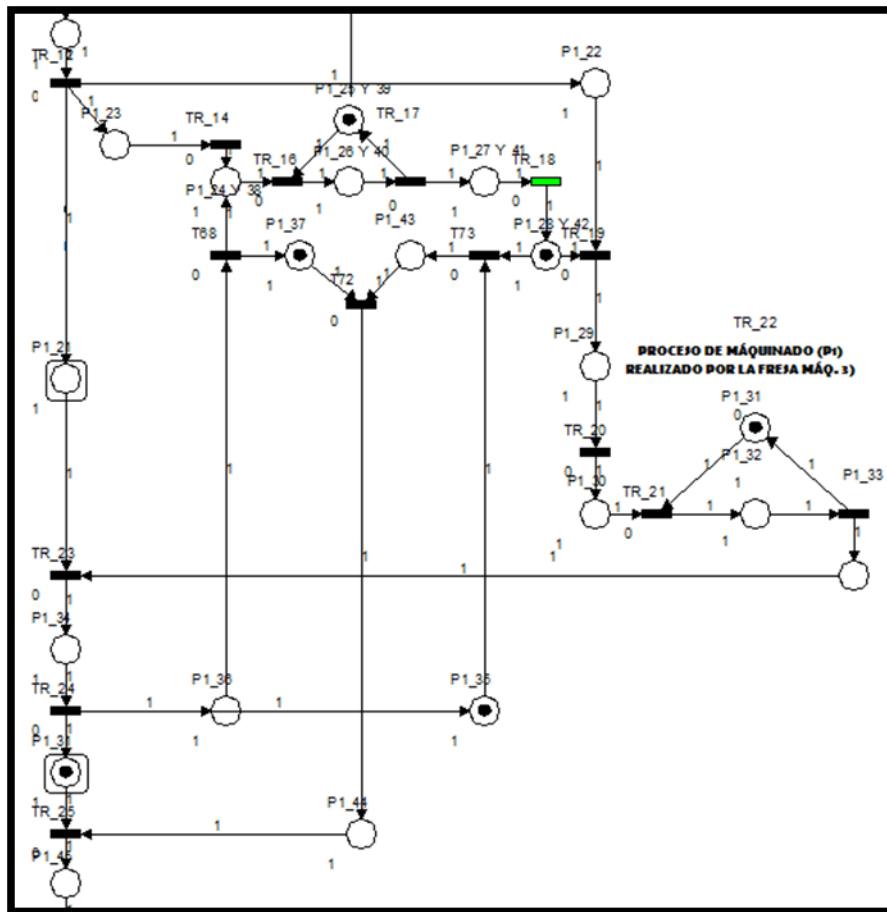
**Salidas:**

- ✓ Transporte de la pieza manufacturada hacia la banda transportadora.



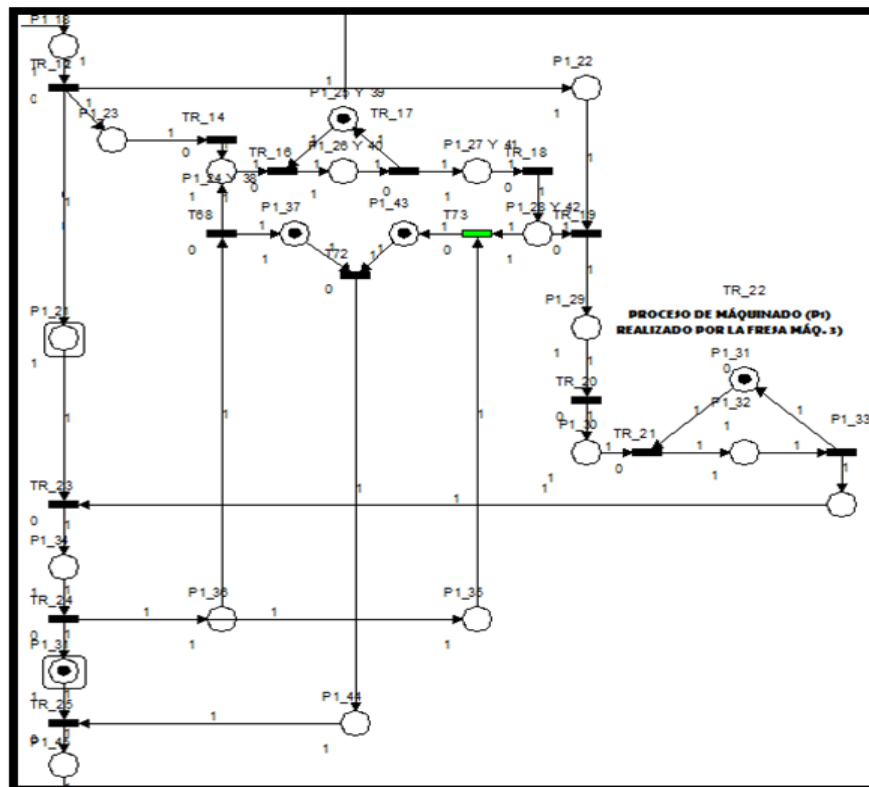


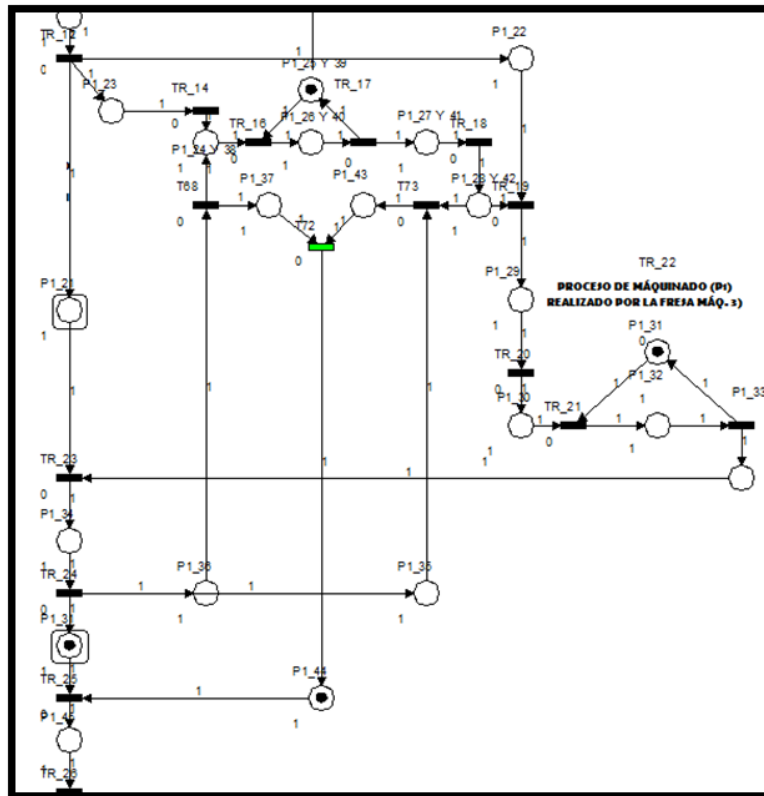
- ✓ Mediante el empleo de una estructura de conjunción proveniente de la salida del Robot 3, en conjunto con la salida de la distribución, se asegura que la pieza ya manufacturada será reincorporada a la banda transportadora.



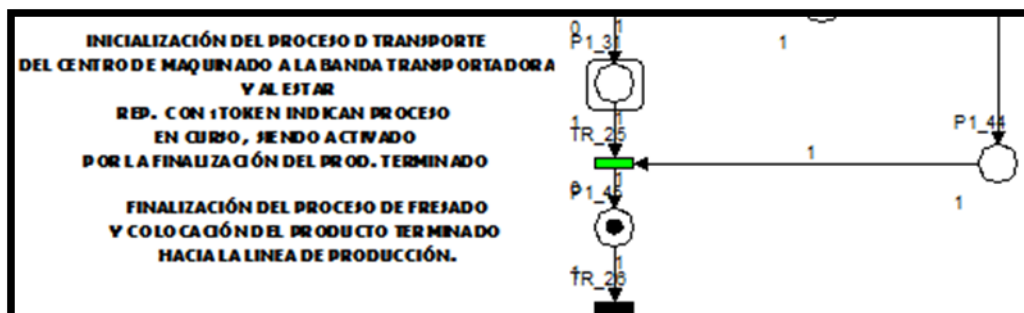


- ✓ Ocupando la conjunción de las validaciones del transporte de la pieza, así como el estado en el que el Robot 3 ejecutara su segunda tarea asignada, se da paso a una transición en el sistema, en donde se llevara a la finalización del proceso del transporte de la pieza ya manufacturada.





- ✓ Finalmente, a partir de una conjunción se llega a un estado que indique la finalización del proceso de fresado, en donde se incluye la reincorporación de la pieza terminada en la banda transportadora.



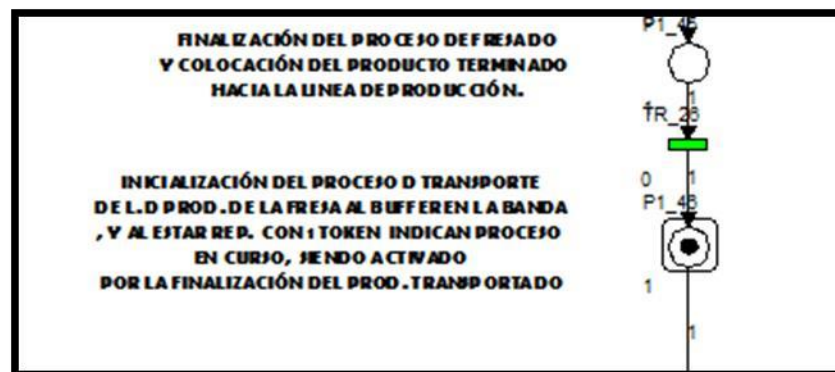


## Inicialización del proceso de transporte de la barra ya manufacturada de la banda transportadora hacia el buffer o almacén temporal.

En esta parte del desarrollo de la Red de Petri, se considera un área de almacenamiento temporal, también conocida como buffer, y es identificada mediante una plaza cuya capacidad será de 6 tokens, en donde se irán contabilizando las piezas que vayan arribando tras haber sido manufacturadas independientemente del centro de maquinado de procedencia, con la finalidad de que posteriormente sean reacomodadas en el almacén giratorio mediante el Robot #1, ya que como se recuerda al lector, también es un recurso compartido y una de sus tareas asignadas es la del reacomodo de material ya procesado.

Cabe señalar, que esta consideración es debida a una similitud presente en la Celda de Manufactura de manera física, pues existe una zona de la banda en donde se irán acomodando grupos de 6 templates con piezas ya manufacturadas en espera de ser reintegradas en el almacén rotatorio.

Una vez finalizado el proceso de la reincorporación del material procesado hacia la banda, tenemos una transición que da pie al siguiente estado del sistema:



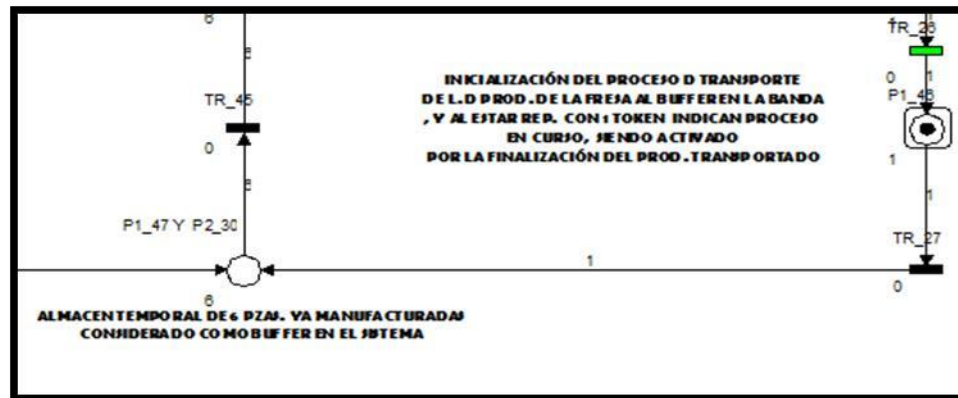


**Almacén temporal o buffer**, esta parte será una sección propia de la banda transportadora, cuya finalidad será almacenar de manera temporal 6 templates con material previamente manufacturado, para que posteriormente sea reubicado en el almacén rotatorio, cabe mencionar, que el número de templates acumulados en el almacén temporal puede ser modificado por el programador sin afectar la operación del sistema.

Las condiciones lógicas empleadas para la inicialización del transporte de la pieza manufacturada hacia el buffer o almacén temporal son:

**Entradas:**

- ✓ Transición de salida proveniente de la finalización de la reincorporación de la pieza manufacturada a la banda.

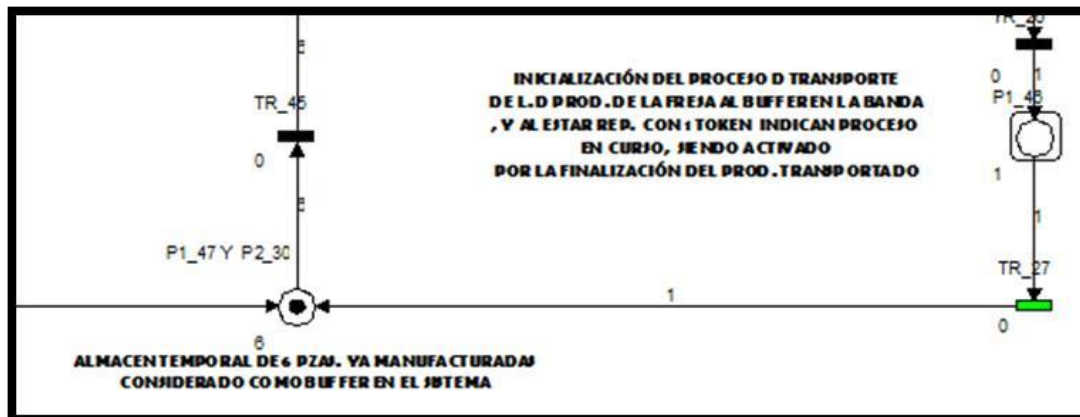






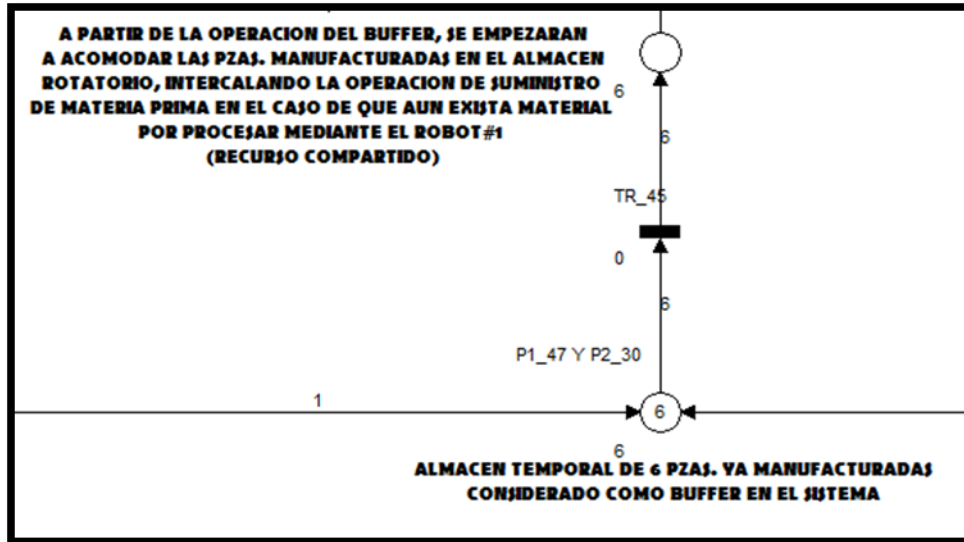
### **Salidas:**

- ✓ Transporte del material ya procesado hacia el buffer o almacén temporal.

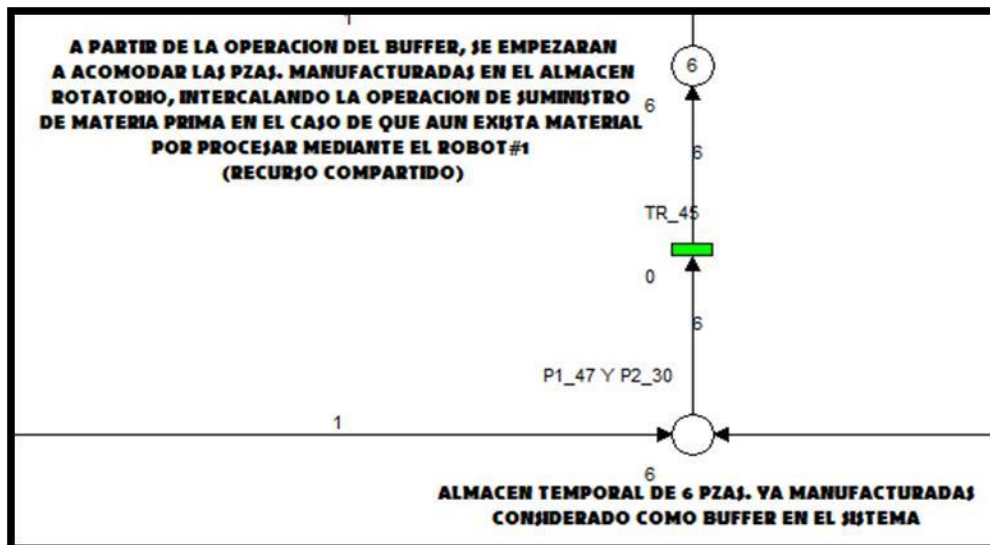


Cabe recalcar, que, a la plaza contemplada como almacén temporal, le ha sido asignado un peso de seis tokens, cuya capacidad es referente a los templates con las piezas terminadas, las cuales deben estar dentro del área del buffer antes de ser reacomodadas.

La observación anterior es fundamental para la comprensión del presente trabajo de tesis, pues debido a que la lógica del sistema fue planteada para que el Robot #1 tenga asignada la tarea del reacomodo de las piezas manufacturadas una vez lleno el buffer y a su vez intercalando el suministro de material para manufacturar conlleva a uno de los objetivos planteados en el desarrollo del trabajo, el cual es la utilización eficaz de los recursos ofrecidos por la CMF.

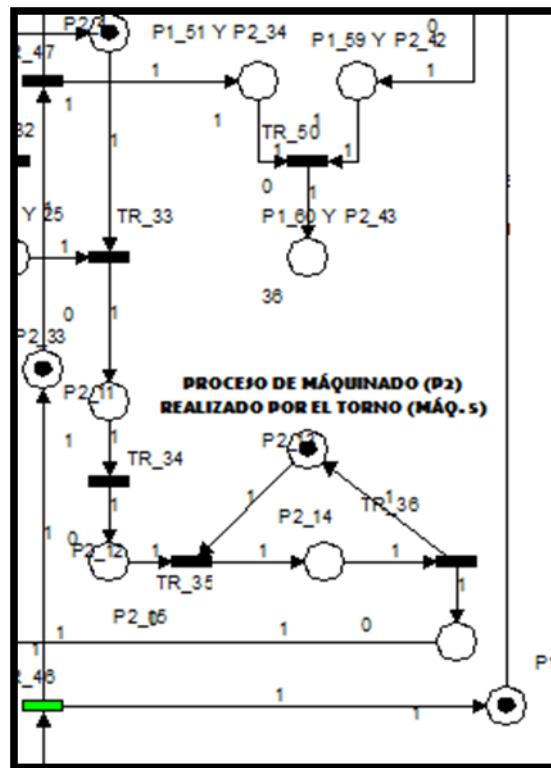


Una vez que el área del almacén temporal se encuentra con los 6 templates como se muestra en la figura siguiente, se dará pie a una transición que con lleva a un estado representado por medio de una plaza en donde se hará la validación de la condición de existencia de las piezas manufacturadas contenidas en los templates.





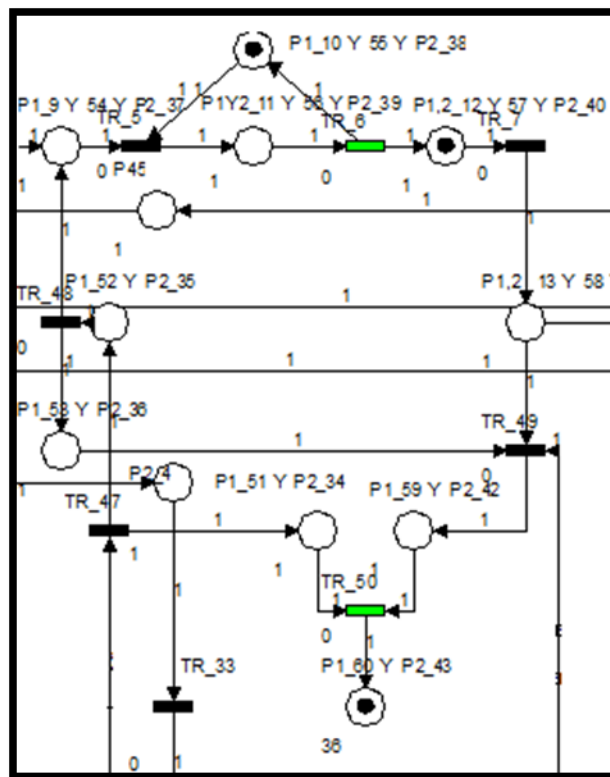
A partir de la validación anterior, se ocupará de una transición, mediante la cual se formará una distribución de tokens con la finalidad de que se asegure el transporte de piezas ya manufacturadas hacia el almacén rotatorio como se muestra a continuación:



Representación de la distribución proveniente de la transición ejecutada tras la validación de las piezas manufacturadas presentes en el buffer.



A partir de las condiciones lógicas descritas con anterioridad, se ejecutará el reacomodo de las piezas ya manufacturadas mediante el recurso compartido definido como Robot #1, en donde dicha actividad asignada, será alternada con el suministro de los materiales hacia la banda transportadora con la finalidad de aprovechar la posición del manipulador.





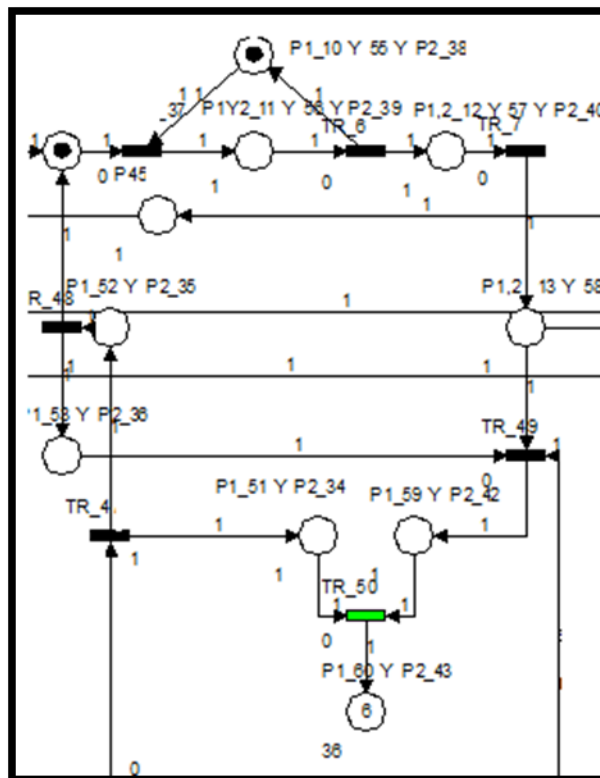
Las condiciones lógicas empleadas para la inicialización del transporte de las piezas manufacturadas provenientes del buffer son:

**Entradas:**

- ✓ Ejecución de la transición de salida proveniente del almacén temporal.
- ✓ Validación de la existencia de piezas manufacturadas.
- ✓ Disponibilidad del Robot #1, con el objeto de que no interfieran las tareas asignadas al recurso compartido.

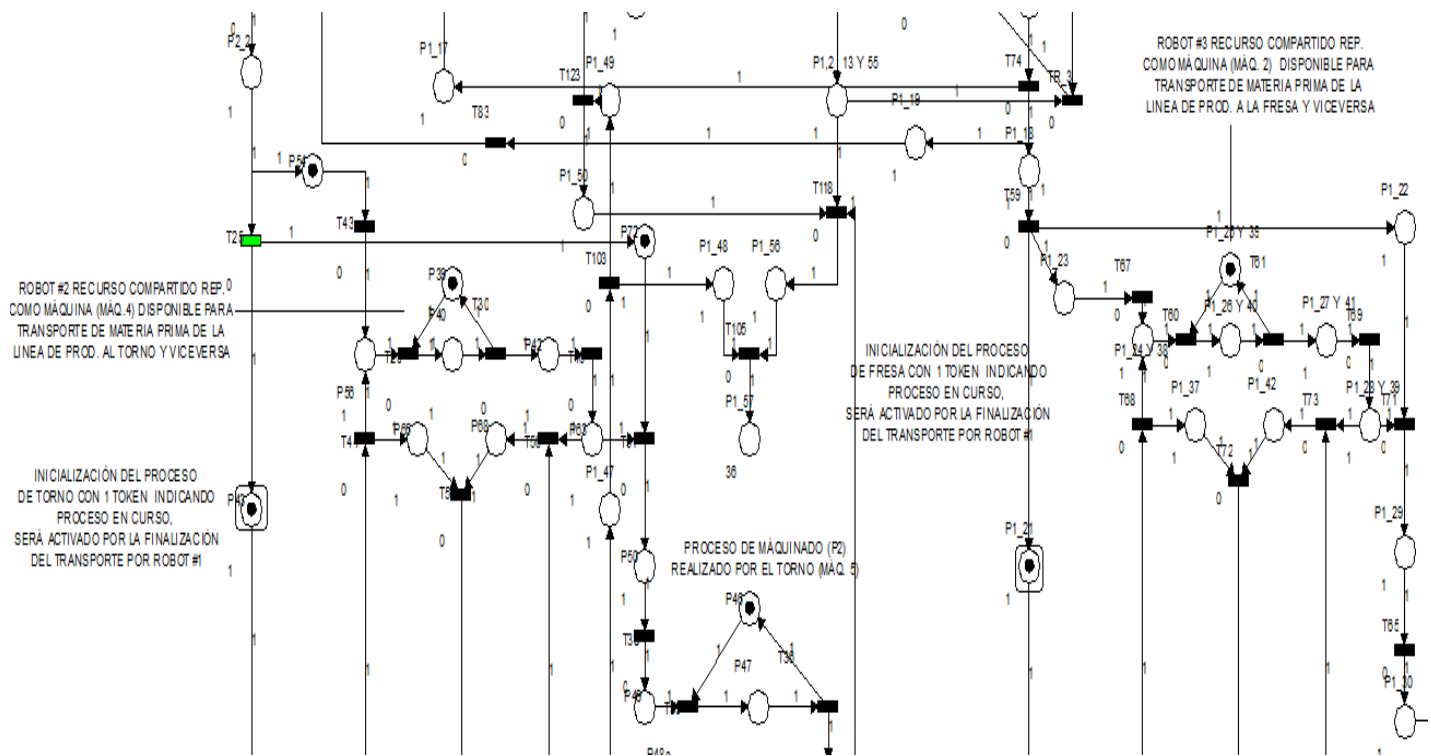
**Salidas:**

- ✓ Traslado de las piezas manufacturadas (una a una).
- ✓ Indicador de piezas manufacturadas acomodadas en el almacén rotatorio, cuya capacidad será de 36 tokens, siendo la misma para el estado de inicialización del sistema.





Es importante recalcar, que en el presente trabajo de tesis únicamente se brinda detalle del algoritmo de fresa y la inicialización del proceso de torno, ya que sería repetitivo incluir las consideraciones y estructuras para el modelado de los robots como máquinas, en este caso, para la representación del Robot#2 como transporte de tochos al centro de maquinado de fresa se denomina Maq.4, y al proceso de la manufactura en torno se le denomina Maq.5 como se muestra a continuación.





Finalmente, al igual que en el proceso del fresado, las piezas ya manufacturadas son devueltas a la banda de distribución, mediante el Robot#2 como recurso compartido, arribando al almacén temporal anteriormente descrito en el proceso de CNC con Fresa, en donde se idealizo con espacio para 6 templates continuos para evitar acumulación de piezas, los cuales al estar en dicha condición son reacomodados nuevamente con el Robot#1 (Maq.1) en el almacén giratorio como productos terminados.

### **3.7 Simulación en Promodel ®.**

Una vez desarrollado el algoritmo se procederá a la implementación del mismo sobre la CMF de la FI UNAM para posteriormente obtener resultados y conclusiones en base a la hipótesis y objetivos de este trabajo de tesis.

Tanto en la industria como en la institución educativa la simulación permite obtener una visión general del sistema de producción para poder tomar decisiones antes de realizar cualquier inversión.

La parte de implementación es el paso crítico e importante en donde se verán los resultados de los criterios y herramientas utilizados para solucionar el problema y verificar si se cumplieron los objetivos y la hipótesis planteada fue verdadera.

Para realizar la simulación del proceso de producción de manera ideal y visual se requirió de la ayuda del software Promodel®, el cual permite diseñar y analizar sistemas de producción de forma ideal, todo esto basado en capacidades gráficas y de animación.

Se eligió esta herramienta de simulación por dos razones fundamentales:

- ✓ Por su facilidad de uso y flexibilidad permite diseñar y analizar sistemas de producción.
- ✓ Es un simulador de eventos discretos y permite visualizar la dinámica de los recursos disponibles siendo el equipo e instalaciones en el sistema.



Promodel® al ser un simulador de eventos discretos permite simular y modelar sistemas de manufactura discreta es decir unidad por unidad.

Las aplicaciones más comunes simuladas en este software son: Líneas de ensamble, Sistemas de manufactura flexible, Producción por lotes, Justo a tiempo (JAT), Sistemas de producción KANBAN, Sistemas de colas.

### **3.8 Criterios para la ejecución de simulación mediante software HPSim®.**

Para poder modelar y simular el proceso es necesario cumplir y tomar en cuenta ciertos criterios.

1. Conocer en detalle el sistema y/o el problema a solucionar a través de la simulación. Es importante comprender el problema, sus detalles y características, para así dimensionar: su alcance, los datos requeridos, los comportamientos de las variables, máquinas, almacenes, recursos involucrados y disponibles en el sistema, el flujo de materia prima, las posibles interrelaciones entre máquinas y recursos, los posteriores análisis y los resultados esperados.
2. Analizar el comportamiento del sistema y enmarcarlo en un tipo de modelo que mejor podría interpretarlo: estocástico (posee variables aleatorias adaptadas al comportamiento de una distribución de probabilidad) o determinístico, continuo o discretos.
3. Seleccionar un software de simulación que permita modelar, de mejor manera, las características del sistema. Esta selección dependerá también del alcance del sistema, el modelo de simulación elegido, la información que se desea recopilar y el énfasis en el análisis del comportamiento del mismo (si se desea verificar las relaciones entre variables, validar un modelo propuesto o proponer escenarios futuros).





4. Contar con la información suficiente para modelar y posteriormente simular el sistema. Antes de proceder en la intervención del sistema, se debe tener la seguridad de contar con la información suficiente o poder acceder a las fuentes de datos, ya sea a través de documentos secundarios, o a través de fuentes primarias (por ejemplo, la observación, experimento, entre otros).

En base a los criterios descritos anteriormente se tienen las siguientes consideraciones:

1. El problema por solucionar y las características del sistema se dan a detalle en el capítulo 3.
2. El sistema se comporta de manera determinística ya que se tendrán independientemente de lo que se produzca tiempos dados por el usuario, en trabajos futuros se agregarán tiempos aleatorios los cuales deberán ser tratados de a través de distribuciones probabilísticas.
3. El software utilizado para el desarrollo del algoritmo basado en RdP fue HPSim<sup>®</sup>, el cual simula sistemas determinísticos que funcionan con eventos discretos como es el caso de estudio de este trabajo. Para la parte de la visualización se utilizó Promodel.

Una vez se ha dimensionado el sistema (enmarcado dentro de un problema a solucionar), el siguiente paso corresponde al modelado de este. El proceso de modelación conlleva a la caracterización del sistema. Los elementos básicos requeridos son los siguientes:

- **Entidades:** Identificar los elementos que serán objeto de estudio (podrán ser transportados, transformados, almacenados). Por ejemplo, en un banco la entidad ideal será el cliente; en un proceso productivo una entidad podría ser la materia prima.



- 
- **Locaciones:** Corresponden a los puntos fijos de encuentro de las entidades (zonas de almacenamiento, mesas de trabajo, zona de inspección).
  - **Rutas:** Equivale al enlace entre las locaciones, por donde se movilizará los recursos y las entidades.
  - **Recursos:** Apoyan la realización de actividades dentro del sistema. Podrán ser estáticos o dinámicos.
  - **Proceso:** Secuencia de pasos y/o programación de actividades realizadas dentro del sistema.

Tomando en cuenta las características que debe tener el sistema se tiene lo siguiente.

- ✓ Entidades: se requiere una materia prima de dos geometrías diferentes las cuales son tochos y barras de aluminio.
- ✓ Locaciones: las locaciones identificadas en la CMF de la FI UNAM consta del almacén giratorio, CNC (torno), CNC (fresa) y banda transportadora.
- ✓ La ruta establecida se basará en el diagrama de flujo obtenido a través del algoritmo desarrollado (*ver diagrama de flujo en pág.123*).
- ✓ Los recursos empleados en la CMF son los robots de carga y descarga de materia prima y producto terminado.
- ✓ El proceso se dará a través de la secuencia de pasos se obtuvo a través del algoritmo transcrito a un diagrama de flujo para posteriormente implementarlo en la CMF.



A partir de los criterios y características del sistema se procedió a la simulación en Promodel únicamente como herramienta de visualización de los ciclos paralelos.

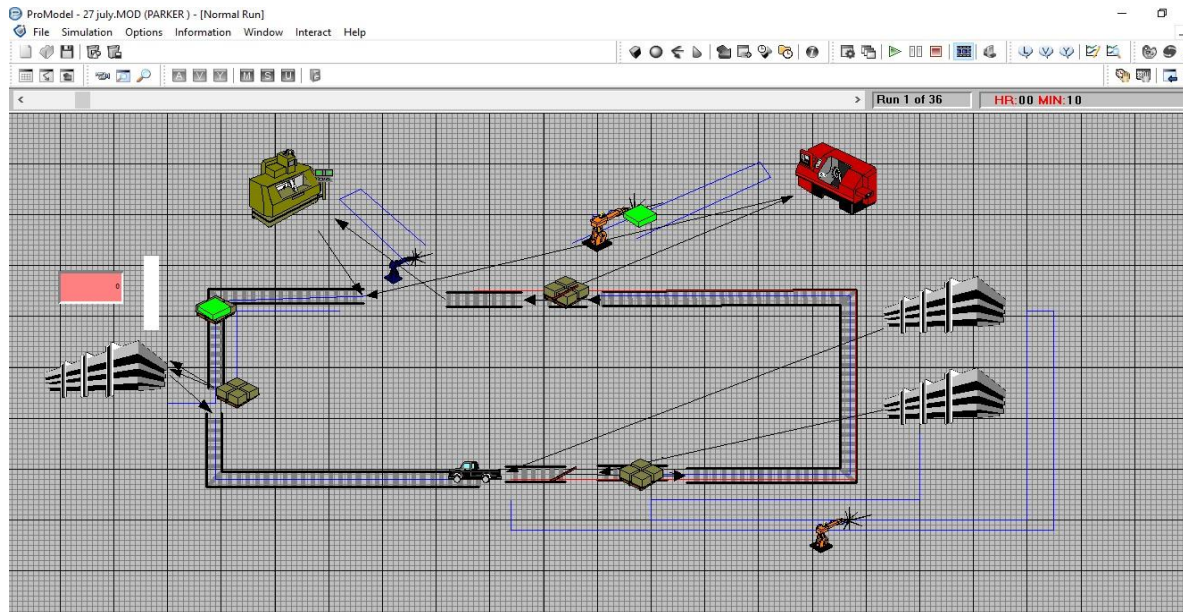


Figura 38. Simulación en Promodel® para la visualización de los procesos de manufactura.

Name	% Utilization
PALLET POSTOR	24.29
ROBOT2	22.33
CAR	24.70
ROBOT1	18.11
PALLETMP BARRA	27.90
PALLETMP TOCHO	23.60
ROBOT3	8.94
PALLETPOST FRE	8.00

Figura 39. Resultado del estatus estadístico de % de utilización de los recursos albergados en el sistema.



Finalmente, se realizó un diagrama hombre-máquina como una representación gráfica de la secuencia de los elementos que componen las operaciones que intervienen en el ciclo de manufactura albergado en la CMF. No obstante, es importante recalcar que si bien, la operación en el CMF tiene participación nula del hombre, se puede ocupar de esta herramienta con la finalidad de obtener un aproximado del porcentaje de utilización de las máquinas y recursos existentes en el sistema con la finalidad de que puedan hacerse mejoras como trabajos futuros.

CMF	TIEMPO	CARGA	ALMACEN R.	CARGA	ROBOT 1	CARGA	BANDA T	CARGA	CNC TORNO	CARGA	ROBOT 2	CARGA	CNC FRESA	CARGA	ROBOT 3
Proceso de Torno y Fresa CMF	2	8	Almacen de MP												
	4			2	Transporte de MP barra a línea de producción										
	6				2	Transporte de MP barras a CNC fresa Robot 3									
	8			2	Transporte de MP tocho a línea de producción								2	Transporte de MP barras a CNC fresa	
	10					2	Transporte de MP tocho a CNC torno Robot 2								
	15									2	Transporte de MP tocho a CNC torno				
	20														
	25											15	Maquinado del ciclo de fresa		
	30														
	32								9	Maquinado del ciclo de torno				2	Transporte de barra manufacturada a banda
	34					2	Acumulado de barras manufacturadas en buffer temporal								
	36					2	Acumulado de tochos manufacturados en buffer temporal				2	Transporte de MP tocho a CNC torno			
	40		Almacen de piezas manufacturadas	4	Reacomodo de piezas manufacturadas en el almacen										

Figura 40. Diagrama hombre máquina como referente para la estimación de la utilización de los recursos en la CMF UNAM.



De lo anterior, podemos determinar el porcentaje de utilización de cada máquina, como se resume en el siguiente cuadro:

Resumen y Análisis de la información				
Tipo	Tiempo del Ciclo Min.	Tiempo de Acción Min.	% de Utilización	% de Utilización Optima
ALMACEN R.	40.00	8.00	20.0%	85.0%
ROBOT 1	40.00	8.00	20.0%	85.0%
BANDA T	40.00	8.00	20.0%	85.0%
CNC TORNADO	40.00	9.00	22.5%	85.0%
ROBOT 2	40.00	4.00	10.0%	85.0%
CNC FRESA	40.00	15.00	37.5%	85.0%
ROBOT 3	40.00	4.00	10.0%	85.0%

Figura 41. Tabla resumen del análisis de la información obtenida por el diagrama anteriormente descrito.

Es importante recalcar, que los tiempos de operación en los centros de maquinado, los tiempos de desplazamiento de materia prima, tiempos de desplazamientos de materiales procesados y tiempos de trayectorias de los recursos son aproximados, ya que el objetivo del presente trabajo de tesis tiene un enfoque desde el punto de vista mecatrónico en cuanto a la reintegración de la CMF, comunicación de periféricos, ejecución de ciclos de manufactura paralelos, diseño del algoritmo modelo, validación e implementación, sin embargo esta herramienta Hombre máquina nos da visibilidad de que si bien la automatización ha sido correcta, el sistema presenta bajos porcentajes de utilización de los recursos, y es ahí donde entra la importancia fundamental de continuar con el modelo funcional ahora agregando nuevos casos de estudio dentro del laboratorio de manufactura de la institución, involucrando diversas áreas de la ingeniería para la aplicación de conocimientos, enriqueciendo la formación de las nuevas generaciones.



---

### 3.9 Confrontación de simulación en HPSim ® y automatización mediante PLC's.

El desarrollo del modelo del sistema previamente a la realización de la automatización que se incluirá en los dispositivos reales presenta varias ventajas:

- ✓ Al modelar se tienen en cuenta los aspectos más importantes del sistema y se obvian los que no afectan al funcionamiento global, incluso siendo más complejos muchas veces que los que realmente interesan, por lo tanto, al momento de ejecutar la implementación sobre el sistema estaremos trabajando con un sistema simplificado.
- ✓ Para comprobar si la automatización es correcta se pueden "enfrentar" la automatización con el modelo del sistema en un programa de simulación de la herramienta empleada. Con ello, además, podemos hacer un análisis del comportamiento del sistema automatizado, es decir, podemos ver cómo será (idealmente) la producción.
- ✓ Finalmente, si lo anterior se traduce al dispositivo de control automático la automatización realizada mediante la herramienta de modelado (en nuestro caso la RdP a los controladores lógicos programables "PLC" siguiendo el diagrama de flujo *ubicado en pág. 123*) nos puede dar visibilidad de que el diseño de la Red ha sido funcional. La característica adicional respecto al caso anterior es que ahora se tiene una simulación en tiempo-real dentro del propio dispositivo de control. Comprobando así que está bien realizada la automatización, además de una buena ejecución de implementación sobre el dispositivo de control.
- ✓ Garantizando así la reducción a casi la mitad (según estimaciones) del tiempo empleado en corrección de errores de implementación de la automatización del sistema obteniendo una asignación eficaz de los equipos.



---

## **CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.**

### **4.1 Conclusiones.**

Para el análisis de la CMF UNAM, se realizaron pruebas experimentales sobre su conducta cualitativa, cuantitativa y performance, los cuales fueron corroborados mediante simulaciones en el software HPSim con el fin de asegurar que el modelo del algoritmo propuesto se comportara de la manera esperada.

A partir del modelo de la Red de Petri se realizaron implementaciones mediante controladores lógicos programables (PLC's) verificando así la funcionalidad de la utilización de los recursos compartidos durante la ejecución de los ciclos de manufactura de forma paralela asegurando la inexistencia de colisiones en el sistema.

La simulación del modelo de la Red de Petri por medio del software sirvió a los propósitos del presente trabajo como complemento a la aproximación de la modelación y programación bajo condiciones hipotéticas.

Por lo tanto, pudimos comprobar que las Redes de Petri son una herramienta gráfica y matemática de modelado, de análisis y diseño aplicable a sistemas dinámicos, siendo una herramienta prometedora para describir y estudiar el procesamiento de la información en sistemas que están caracterizados por ser concurrentes, distribuidos, paralelos y discretos, solo que en el caso del presente trabajo de tesis el análisis matemático resultante de la ecuación de estados en forma matricial no fue práctico debido a su dimensión.

Con la obtención del análisis del modelado de la CMF se pudo realizar de una manera más simplificada y ordenada la programación Ladder destinada a los controladores lógicos programables (PLC's). Dicho modelado sirvió como estructura base para consideraciones lógicas que conllevaron a la relación de ejecución entre procesos, es decir, la comunicación entre los periféricos.



---

## 4.2 Análisis de resultados.

En base a los resultados obtenidos, hemos de recalcar que el modelado del sistema fue bastante extenso, debido a que se tomaron en cuenta todas las condiciones lógicas de operación entre procesos (torneado y fresado), así como las variantes que hacen del sistema dinámico, es decir, se tuvo especial atención en las variables de entrada/salida para poder garantizar la funcionalidad del sistema.

De lo anterior, se realizó el estudio y análisis previo de la CMF, para posteriormente elegir las RdP generalizadas para el desarrollo, diseño e implementación del algoritmo, esto a partir de llevar el algoritmo funcional del software HPSim a un diagrama de flujo para posteriormente trasladarlo a un lenguaje de escalera y programarlo en los controladores lógicos programables (PLC's) del sistema para así administrar las operaciones dentro de la CMF. Después de la adopción del algoritmo sobre el CMF se ejecutó la puesta en marcha con el equipo de trabajo quienes realizaron la reintegración del sistema para validar la funcionalidad de la aplicación de la RdP, llegando a la conclusión de que esta herramienta ha sido fundamental para la automatización de líneas, debido a que ahorra tiempos en la programación a prueba y error, y así mismo conduce a la utilización de los recursos albergados en la celda de forma paralela y siendo funcional para la toma de decisiones en la ejecución de los procesos de manera independiente.





---

### 4.3 Trabajos a futuro.

Como trabajos a futuro se consideran los siguientes puntos con la finalidad de tener un estudio más robusto del sistema y así enriquecer más las practicas dentro del laboratorio de Manufactura avanzada con las nuevas generaciones:

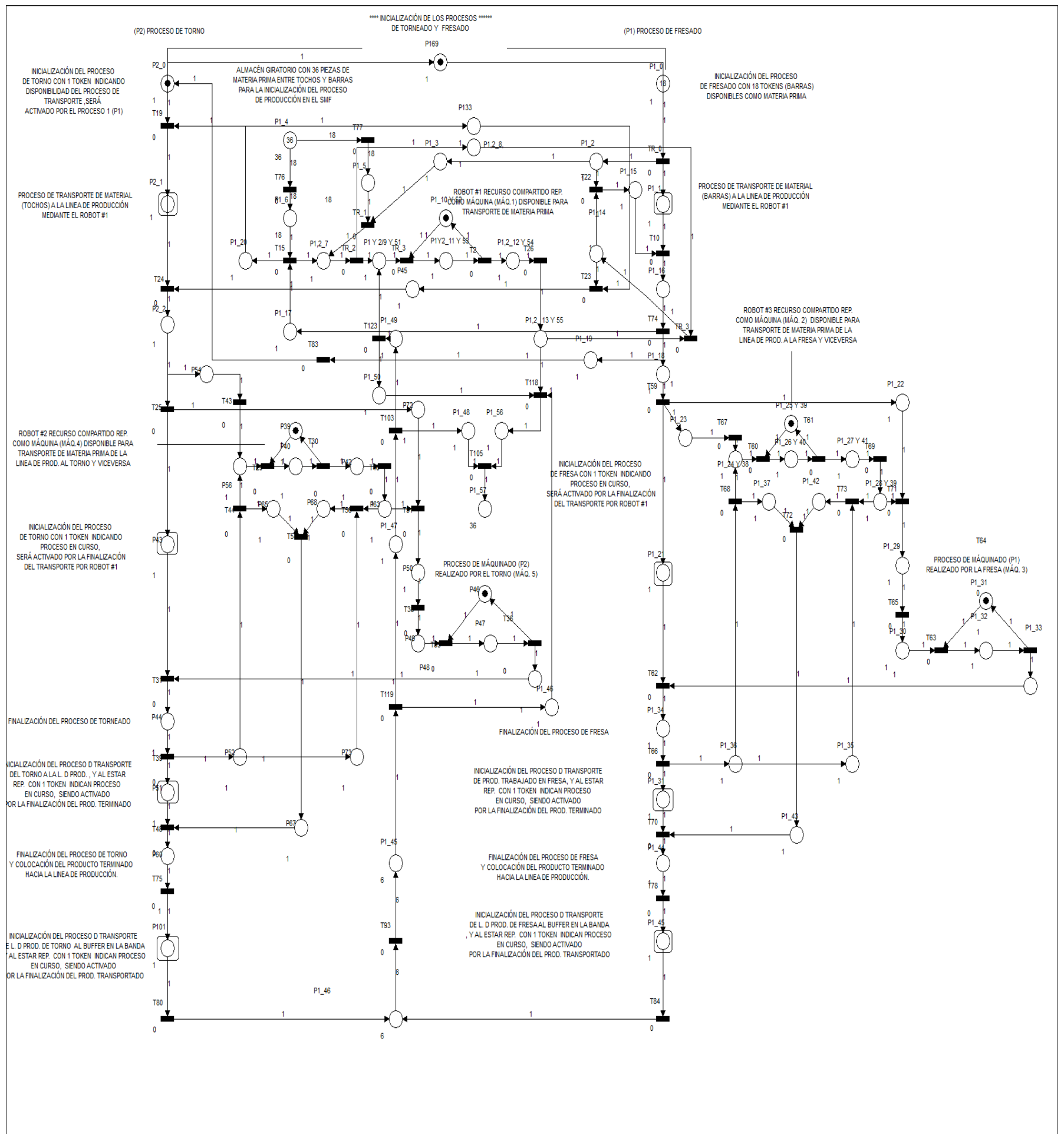
- ✓ Reintegración del sistema de visión para que la CMF sea considerada como un SMF
- ✓ Estudio de los tiempos de producción.
- ✓ Mejora continua y de procesos.
- ✓ Integración de procesos de manufactura dentro del CMF
- ✓ Estudio y análisis de costos de preparación de materiales, producción y procesos mediante modelos probabilísticos.
- ✓ Planeación y control de la producción.



## Red de Petri bajo el Software HP Sim®.

Una de las partes fundamentales en el desarrollo de la Red de Petri, ha sido el manejo y la utilización adecuada de los recursos compartidos como lo señala el objetivo establecido al inicio del presente trabajo de tesis, pues llevar a cabo una asignación adecuada de los recursos albergados en el sistema es una tarea que conlleva a la consideración de una serie de condiciones lógicas para la realización de las distintas tareas asignadas a determinadas máquinas.

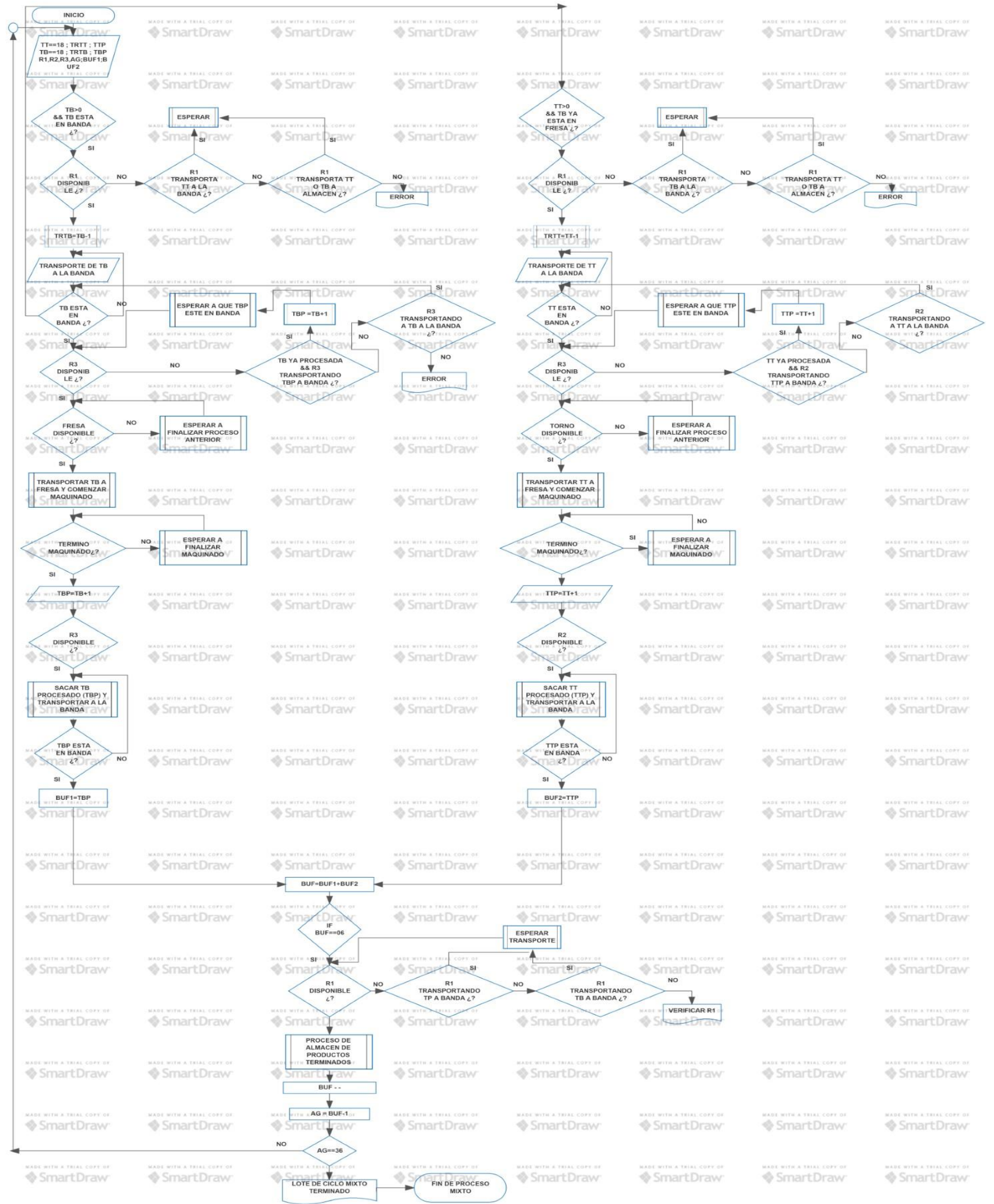
Sin más preámbulo, a continuación, se mostrará la Red de Petri generalizada, la cual condujo a la generación del algoritmo representado en un diagrama de flujo, dando solución y resultados favorables a la elaboración del presente trabajo de tesis.





### Diagrama de flujo correspondiente a la RoP de la CMF.

A partir de la solución mediante Redes de Petri generalizadas se generó un diagrama de flujo como base para el seguimiento y aplicación del algoritmo dentro de la Celda de Manufactura Flexible, en donde se consideran las condiciones lógicas bajo las cuales debe ser reprogramado el sistema para ejecutar los procesos de torneado y fresado de manera simultánea empleando de una asignación eficaz de los recursos ofertados por el sistema.





## Bibliografía.

- [1] Mikell P. Groover. (1997). Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos Y Sistemas. Ed: Pearson Educación.
- [1.1] MIKELL P. GROOVER. Automation, Production Systems, and Computer integrated manufacturing, 3rd Ed.2008, Prentice Hall, USA.
- [1.3] <http://manufacturabustos.blogspot.com/2008/> Consulta: 26 Abril 2019
- [1.4] <https://es.slideshare.net/TethAzraelCortsAguilar/clulas-de-manufactura-itszapopan> Consulta: 26 Abril 2019
- [1.5] Rincón G., Pérez M, Hernández, S. Modelo de Calidad (MOSCA+) para evaluar software de simulación de eventos discretos
- [1.6] <https://diplomadogestioncalidadsoftware2015.wordpress.com/norma-iso-9126/calidad-interna-y-externa/eficiencia/> Consulta: 26 Mayo 2019.
- [2] [http://ing.unne.edu.ar/pub/informatica/Alg\\_diag.pdf](http://ing.unne.edu.ar/pub/informatica/Alg_diag.pdf) Consulta: 26 Mayo 2019.
- [2.1] Donald Ervin Knuth. (1980). Algoritmos fundamentales, Volumen 1: El arte de programar ordenadores. Ed: Reverte.
- [3] [http://163.10.22.82/OAS/estructuras\\_de\\_grafos/definicin.html](http://163.10.22.82/OAS/estructuras_de_grafos/definicin.html) Consulta: 26 Mayo 2019.
- [4] Guasch Petit, Antonio; Piera Eroles, Miquel Ángel; Casanovas García, Josep; Figueras Jové, Jaume (2002). Modelado y Simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios. Barcelona. Ed: UPC Universidad Politécnica de Catalunya.



- [5] Redes de Petri, Automatización industrial. Dpto. de Ingeniería Electrónica, de Sistemas Informáticos y Automática. Universidad de Huelva.
- [6] Tesis: Motor de ejecución de Redes de Petri (2004). Dr. Demián Gutiérrez.  
Universidad de los Andes Mérida, Venezuela.
- [7] Kurt Jensen (1997): “Coloured Petri Nets: Basic concepts, Analysis Methods and Practical Use” Springer Verlag.
- [8] Narciso Farías, Mercedes Elizabeth (2007). Tesis de Doctorado “Metodología para la resolución de problemas de optimización mediante la exploración del espacio de estados generado a partir de modelos de Redes de Petri Coloreadas.”. Universidad Autónoma de Barcelona.
- [9] Tesis: Sistemas a eventos discretos, una aproximación a la Teoría de redes de Petri y Grafcet. Johanna Stella Castellanos Arias. (Octubre 2008). Facultad de ingeniería Mecatrónica. Universidad militar Nueva granada.
- [10] Fundamentos de Automatización – Modelado de Sistemas para la Programación de Autómatas.
- [11] Tesis de Doctorado: “Redes Configurables Modelización & Verificación.” María Luisa Llorens (2003). Universidad Politécnica de Valencia. Depto. de sistemas informáticos y computación.
- [Mur89] T. Murata. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. In Proc of the IEEE, volume 77, pages 541-580, April 1989.



- [Fin90] A. Finkel. Reduction and Covering of Infinite Reachability Trees. Information and Computation
- [Pet81] J. L. Peterson. Petri Net Theory and the Modeling of Systems. Englewood Cliffs, Ed: Prentice-Hall, USA, 1981.

[12] Tesis: "Navegación de un robot humanoide mediante Redes de Petri y Lógica Difusa" Federico Furlan Colin (2013). Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Computación.

[13] Álvarez Marina/Recuero Alfonso (1996). Aplicación de las Redes de Petri en la construcción. Consejo de investigaciones científicas Boadilla del Monte Madrid, España.

- [VRIES95] B. VRIES de y L. J. SOMERS: "Message exchange in the building industry". Automation in Construction Vol. 4, 1995, pp 91-100.

[14] <https://cortec.es/servicios/torno-y-fresadora/> Consulta: 26 Mayo 2019.