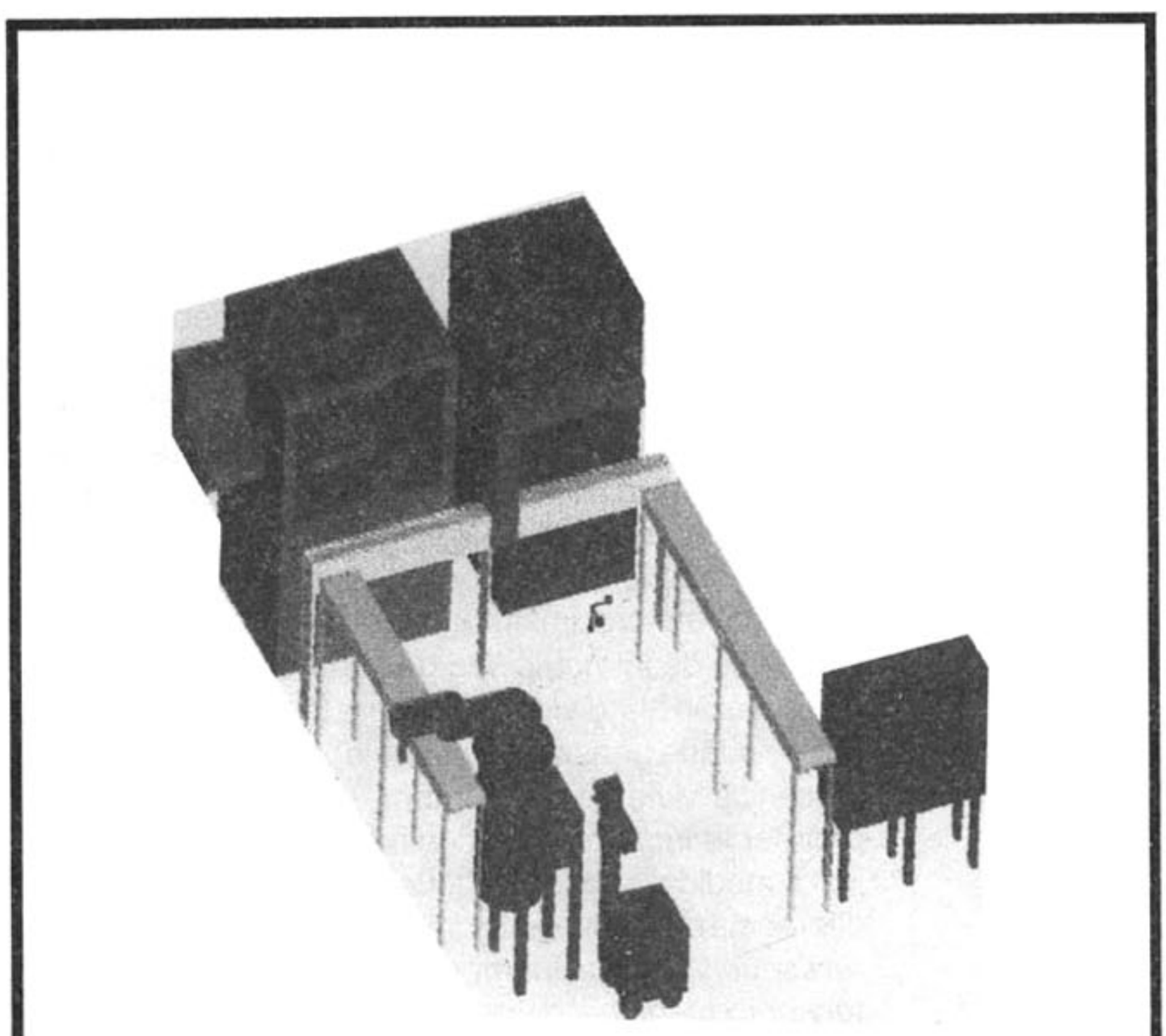
Metodología híbrida para modelado de sistemas CIM



❒ **Elliot Motato Escobar, M.Sc.**
Ingeniero Mecánico
Universidad del Valle.

❒ **José Antonio Abadía N, M.Sc.**
Ingeniero Electricista
Profesor Titular
Universidad del Valle.

❒ **José Isidro García M.**
Ingeniero Mecánico
Universidad del Valle.

Grupo de Robótica y Prodúctica

RESUMEN

En este trabajo se expone una metodología de modelación para procesos de producción, desarollados en sistemas de manufactura integrada por computador (CIM). Esta técnica permite validar el modelo concebido sin necesidad de realizar análisis matemáticos complejos. El modelo es transformado fácilmente a diagramas lógicos tipo LADDER. Este tipo de diagramas puede ser implementado en cualquier controlador lógico programable (PLC).

PALABRAS CLAVES:

Redes de Petri, Metodología Híbrida, Sistemas CIM.

ABSTRACT

This work presents a modeling methodology for production process in computer manufacturing systems. This technique permits a validation of the obtained model without complex mathematical analysis.
This model is easily transformed in LADDER Logic diagrams. This type of diagrams can be implemented on any programmable logic controller (PLC).

KEYWORDS:

Petri Nets, Hybrid Methodology, CIM Systems.

* La Revista recibió este artículo en enero de 2.000

1. INTRODUCCIÓN

La tecnología CIM fusiona técnicas de automatización y sistemas informáticos; esta integración genera problemas de diseño, problemas operativos y de planeación, los cuales difieren radicalmente de los sistemas de fabricación convencionales. Los procesos en los sistemas flexibles de manufactura tienen un comportamiento por eventos discretos y, por lo tanto, la tarea de simular y modelar una célula se ha hecho tradicionalmente mediante la utilización de diversas herramientas que se aproximan a esta característica. Las Redes de Petri (RdP) como herramienta gráfica y matemática suministran un ambiente uniforme para el modelado y análisis de sistemas CIM. Una de las ventajas de usarlas es que el mismo modelo puede ser usado en construcción de simuladores y controladores.

El problema general en el modelado de sistemas de manufactura es el siguiente: *Dadas las especificaciones físicas de un sistema de manufactura, modelar dicho sistema con una red de Petri, de forma tal que la estructura de la red y su marcado inicial hagan que dicha red sea viva, reversible y limitada.* [1].

Estas tres propiedades son importantes cuando se desea implementar y operar el sistema.

Su significado es:

1. **Limitación**
   La limitación o seguridad implica que la cantidad de elementos procesados o almacenados al mismo tiempo por un CIM es finita.

2. **Vivacidad**
   La vivacidad implica la ausencia de bloqueos. Esta propiedad garantiza que un sistema puede fabricar sus productos exitosamente. Además asegura que todo el proceso modelado puede ejecutarse.

3. **Reversibilidad**
   La reversibilidad implica que el sistema posee un comportamiento cíclico, y por tanto es posible realizar un proceso repetidamente.

2. SISTEMAS CIM

El estudio y el análisis de técnicas de producción ha permitido clasificarlas en tres tipos:

1. Alto volumen - baja flexibilidad
2. Volumen medio - flexibilidad media
3. Bajo volumen - alta flexibilidad.

Los sistemas de manufactura integrados por computadora (CIM), son una tecnología de producción que integra computadoras, dispositivos de manipulación de material, robots y máquinas de control numérico computarizado, con el fin de obtener un sistema de producción de volumen medio - flexibilidad media.

Los sistemas de manufactura de alto volumen-baja flexibilidad son máquinas diseñadas para desarrollar un tipo de trabajo especifico. El uso de equipo altamente especializado es costoso, inflexible, destinado a grandes volúmenes y para fabricar uno o dos tipos de piezas.

En el rango de volumen bajo - alta flexibilidad de producción se pueden incluir las Máquinas Herramientas de Control Numérico Computarizado (*MHCNC)*, equipos de gran flexibilidad que pueden fabricar distintas familias de partes. En una MHCNC se tiene un menor volumen de producción y el costo por unidad producida es mayor.

La tecnología CIM puede suministrar diferentes niveles de flexibilidad. Estos niveles son:

1. Sistemas especiales de manufactura
2. Sistemas flexibles de manufactura (FMS)
3. Células flexibles de manufactura.

La célula es la unidad más flexible dentro de la tecnología CIM, en esta, un grupo de MHCNC es utilizado para procesar varias familias de partes. La integración de las diferentes MHCNC se realiza por medio de un sistema de control común.

Un sistema especial de manufactura es la unidad menos flexible de la tecnología CIM, es apropiada para obtener volúmenes de producción altos. La secuencia de operaciones en este tipo de sistemas es especia lizada y dedicada a una sola familia de partes.

La FMS tiene las características de flexibilidad naturales en una célula pero superando a estas en el volumen de producción entregado. Bajo el control de una computadora, en una FMS, las partes a ser manufacturadas en las MHCNC u otros módulos de trabajo pueden ser procesadas aleatoria o secuencialmente [2].

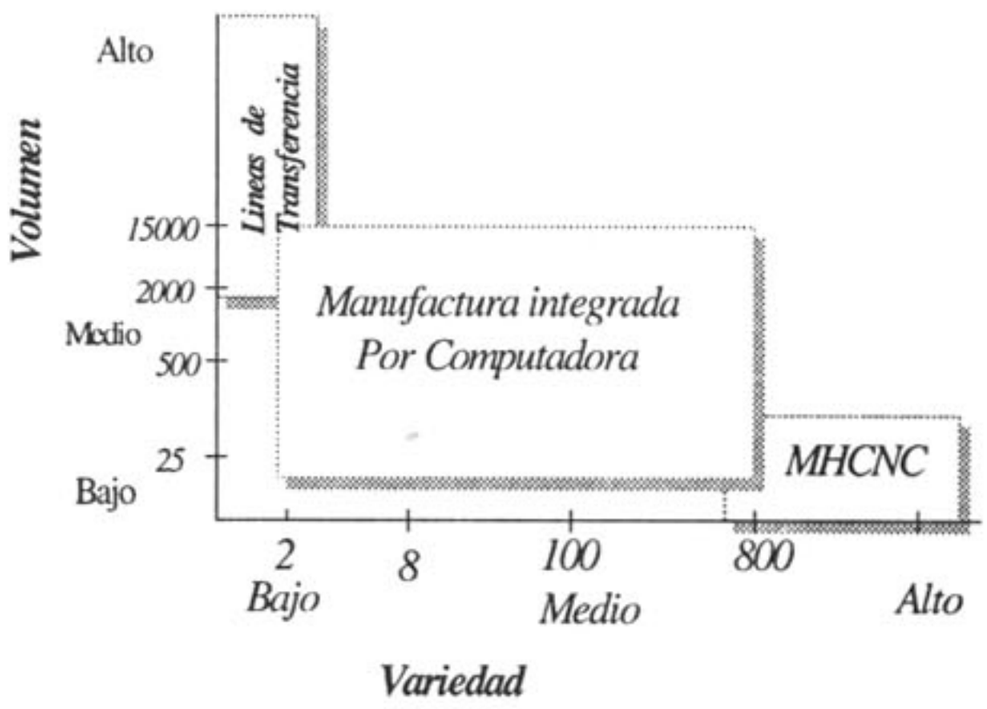


Figura 1. *Clasificación de los sistemas de producción*

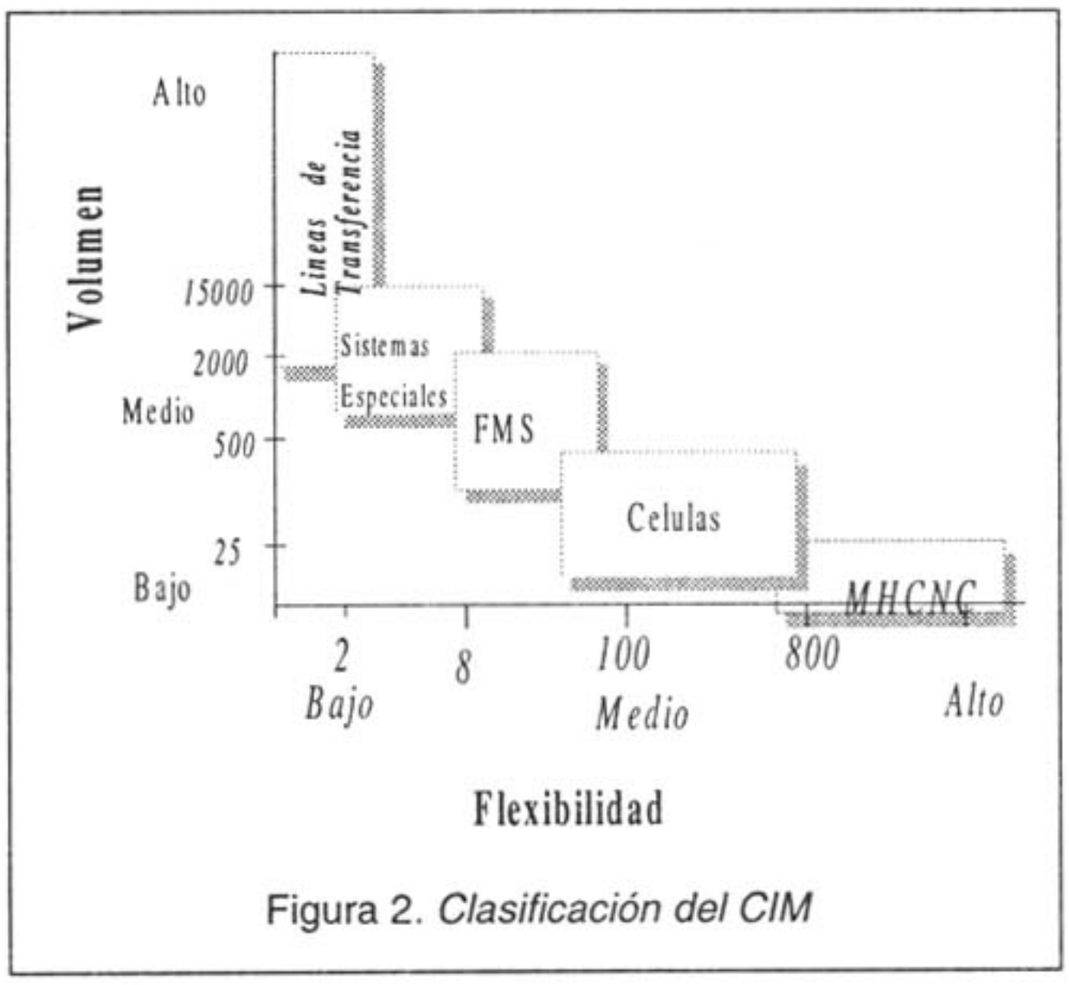


Figura 2. *Clasificación del CIM*

3. MODELADO DE SISTEMAS CIM

El modelado de sistemas CIM se divide en dos pasos:
1. Síntesis del modelo
2. Análisis de las propiedades.

Los trabajos de síntesis se desarrollan alrededor de dos tendencias básicas: Las metodologías Bottom-up y Top-down.[3]
El análisis de las propiedades de la red es importante cuando se desea determinar si el sistema es funcional. Existen varios métodos para realizar el análisis de una RdP:
1. Análisis por enumeración [4]
2. Análisis por transformación [5]
3. Análisis estructural [6]
4. Análisis por simulación.

Los métodos correspondientes a los tres primeros grupos se denominan *métodos estáticos*, su aplicación conduce a resultados exactos. Los métodos de simulación se denominan métodos dinámicos y permiten una cierta confianza en la descripción.
Cuando se análizan redes complejas con muchos lugares y transiciones, es difícil evaluar las propiedades de la red únicamente usando métodos estructurales
La metodología de análisis por enumeración tampoco es útil cuando se analizan sistemas complejos, esto se debe a que se genera un problema de explosión de estados, ocasionado por el gran numero de probabilidades presentes.
Las metodologías de transformación se ven limitadas por la existencia de redes irreducibles.
La metodología híbrida es una técnica que permite obtener un modelo en RdP para sistemas estructuralmente complejos.
Partiendo de una red de primer nivel validada, y usando metodologías de síntesis bottom up-top down, se añaden de una forma gradual a esta red, subredes que representan características importantes del modelo general. Al final se obtiene un modelo útil para la construcción del controlador del sistema.
En el estado de diseño *Top-down* se comienza con una red de Petri que describe de forma generalizada el sistema, seguido de un refinamiento gradual, el cual describe mas detalladamente el modelo.
En el estado de diseño *Botton-up*, se agregan a la RdP los lugares que representan recursos.

Existen dos tipos de recursos en un sistema CIM:
1. Recursos cuyo número es determinado en la etapa previa de diseño. (robots, máquinas, bandas transportadoras, etc.)
2. Recursos cuyo número puede variar a medida que el sistema funciona: pallets o número de partes a ser procesadas en el sistema.

Los lugares que representan *operaciones* se definen como *lugares tipo Pa*. Este tipo de lugares tiene un marcado inicial igual a cero.
Los *lugares tipo Pb* se usan para representar recursos constantes (robots, bandas) Los lugares *tipo Pc* se usan para representar recursos variables o almacenes.
La metodología híbrida define dos tipos de estructuras, las cuales se utilizan para representar el compartimento de recursos:
1. Exclusión paralela mutua (PME)
2. Exclusión secuencial mutua (SME).

Una *PME* es una estructura que modela un recurso utilizado por diferentes procesos en paralelo. Cada proceso es limitado por una o más transiciones de inicio y parada. En general, se pueden presentar varias actividades entre el inicio y la parada de un proceso; el uso de una PME asegura que la red resultante conservará las propiedades básicas y no será necesario el desarrollo de análisis adicionales.

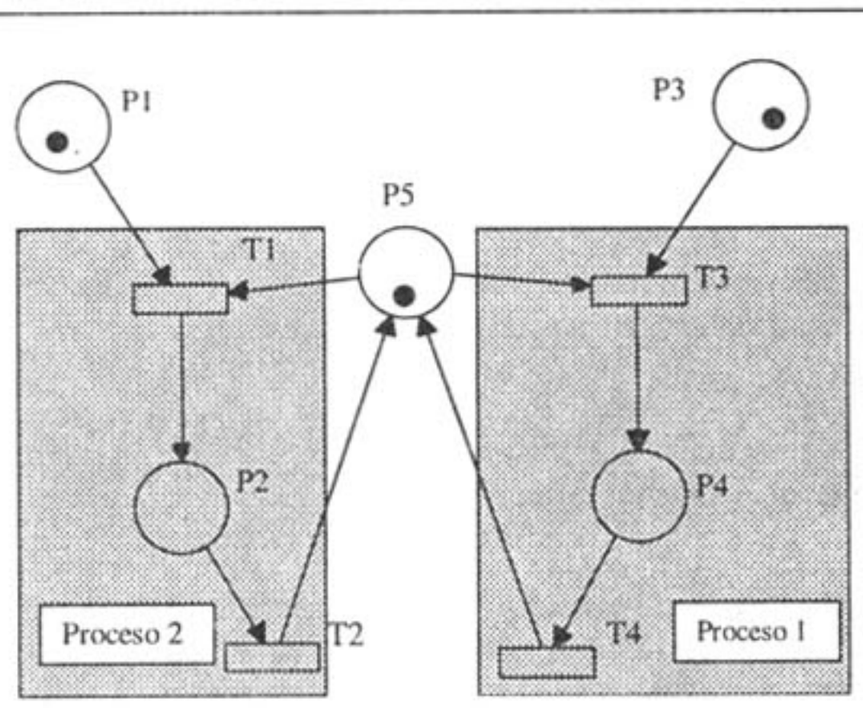


Figura 3. *Exclusión mutua paralela*

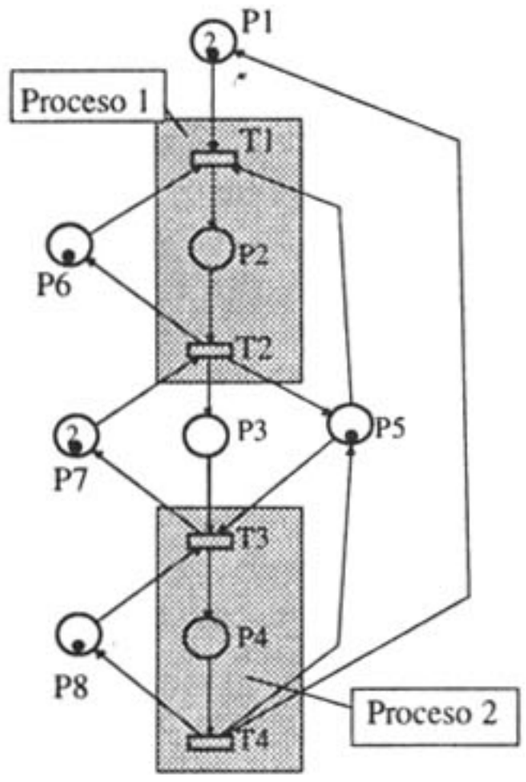


Figura 4. *Exclusión mutua secuencial*

En la figura 3 se presenta una PME, *p5* representa el recurso compartido y el par de transiciones *(t1, t2)* y *(t3, t4)* definen dos procesos paralelos. Està estructura garantiza que la red con el lugar *p5* tiene las mismas propiedades básicas que sin *p5.*

Una *SME*, modela un recurso compartido por un grupo de procesos relacionados secuencialmente. La figura 4 representa una SME. *P5* es el recurso compartido y el par de transiciones *(t1,t2)* y *(t3,t4)* definen dos procesos secuenciales relacionados.

Al igual que una PME, una SME conserva las propiedades de comportamiento cuando se adiciona esta estructura a una red que inicialmente es viva, limitada y reversible.

4. METODOLOGÍA HÍBRIDA

Esta metodología se resume en 6 pasos:

1. *Paso 1:* Inicie el proceso de síntesis con una red viva limitada y reversible, esta red debe representar el modelo en su primera etapa o de forma generalizada.
2. *Paso 2:* Usando la metodología *top-down*, descomponga las actividades al nivel de detalle deseado. En este paso los lugares *Pa,* que representan procesos se expanden en cada fase de refinamiento.
3. Adicione los lugares que representan recursos no compartidos en cada actividad que lo requiera. En este paso se crean *PME* simples, es decir se adicionan lugares tipo Pb usados únicamente por un proceso.
4. Adicione los lugares que representan los buffers de almacenamiento, (lugares tipo Pc). Cada buffer de almacenamiento tendrá un numero inicial de tokens que indica la capacidad de almacenamiento del buffer.
5. Adicione los lugares que representan compartimento de fuentes y los cuales forman PME no simples
6. Adicione los lugares que representan las SME y calcule la capacidad de tokens entre las PME y el marcado mínimo para asegurar vivacidad.[1]

5. APLICACIÓN

Para exponer esta metodología se utilizará el modelo de FMS propuesto para el laboratorio de CIM en [7] e ilustrado en la figura 5 y en la gráfica inicial de este documento.

La familia de partes que puede procesar esta célula son sólidos de revolución de un diámetro máximo de 200 mm y piezas prismáticas de peso máximo de 10 Kg con un volumen aproximado de 200 milímetros cúbicos.

Sus componentes son:

1. Estación de mecanizado (torno-fresa-robot articulado)
2. Estación de ensamble (robot scara-mesa)
3. Sistema de Transporte (bandas de entrada y salida)
4. Almacén automático (AS/RS)
5. Robot móvil (AGV).

A continuación se obtiene el modelo que representa la construcción de una pieza conformada por tres elementos. Para la producción de una pieza de este tipo se requieren tres procesos:

1. Proceso de fabricación del elemento 1
2. Proceso fabricación elemento 2
3. Procesos fabricación elemento 3

La secuencia de fabricación para cada elemento es la siguiente:

1. El AGV selecciona y captura sobre el AS/RS la materia prima para cada elemento

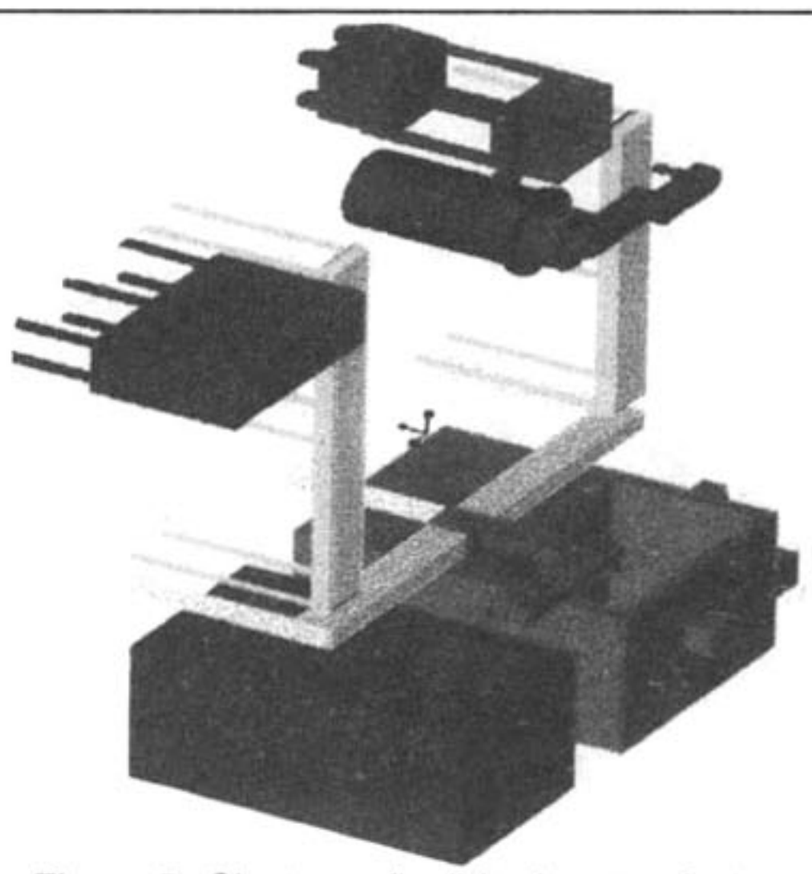


Figura 5. *Sisatema flexible de manufactura*

2. El AGV transporta la materia prima desde el AS/RS hasta la banda de entrada
3. La materia prima es transportada en la banda de entrada hasta estación de maquinado
4. Proceso de torneado-fresado
5. El elemento maquinado es transportado en la banda de salida hasta estación de ensamble.
6. El robot SCARA ensambla los tres elementos maquinados y crea la pieza.
7. El AGV almacena la pieza terminada en el AS/RS.

El sistema propuesto tiene 6 recursos compartidos: robot Scara, robot articulado, torno, fresa, mesa de ensamble, AGV.
Se supone que en todo momento:

1. Siempre hay materia prima
2. Sólo se puede procesar una pieza al tiempo en la célula
3. Sólo se puede procesar un elemento al tiempo en cada estación.

Paso 1. Selección de red de primer nivel validada:
Inicialmente se representa cada proceso por medio de redes de Petri sencillas.
La descripción de los lugares y transiciones de las redes anteriores es la siguiente:
P1: Disponibilidad del sistema para producción de una pieza tipo 1
P2: (P5,P8)*:* Proceso de selección y transporte de materia prima para elemento 1(2,3) hasta la estación de mecanizado.
P3: (P6,P9): Proceso de maquinado de elemento 1(2,3) y carga del mismo sobre banda de salida
P4: (P7,P10): Proceso de transporte del elemento 1(2,3) hasta estación de ensamble y carga del mismo en mesa de ensamble
P15: El AGV almacena la pieza terminada en AS/RS.
T1: Inicio de producción del elemento 1
T2: (T5,T8): La materia prima para fabricar elemento 1 (2,3) esta cargada en el torno
T3: (T6,T9): El elemento 1 (2,3) esta cargado sobre banda de salida
T4: (T7): El elemento 1 (2,3) esta cargado en la mesa de ensamble
T10: Ensamble finalizado
T15: Almacenamiento de pieza finalizado.
Para integrar los tres procesos se requiere de una estructura de sincronización triple. Al incluirla y fusionar las tres redes repre-sentadas en 6, se obtiene la red de la figura 7.
P11, P12, P13 y *P14* son los lugares de control de la estructura de sincronización. Esta estructura permite que solo un elemento sea procesado al tiempo en cada estación.
Se usa el árbol de cobertura para determinar si la red de primer nivel es viva, limitada y reversible (figura 8) en este se prueba que:

- La red de primer nivel es *viva*, puesto que es posible alcanzar cualquier marcado por medio una secuencia de disparos de transiciones determinada.
- La red es *limitada* ó 1-limitada (red segura) para el marcado inicial propuesto, debido a que nunca se tendrá mas de un token en cualquier lugar.
- La red es *reversible*. En esta red se puede alcanzar cualquier nudo, en particular el marcado inicial presentado en la figura 7, a partir de cualquier nudo.

Paso 2. Refinamiento de lugares representando operaciones:
Para la red de la figura 7, los lugares que la constituyen se pueden clasificar de la siguiente manera:
Lugares tipo *Pa* ={P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9 P10, P11, P12, P13, P14, P15}
Lugares tipo Pb ={∅}
Lugares tipo Pc = {P1}
En este paso se descomponen y refinan los lugares tipo *Pa* o lugares de operación.
En la red de primer nivel, cada lugar tipo *Pa* es realmente un macrolugar que representa muchas ope-

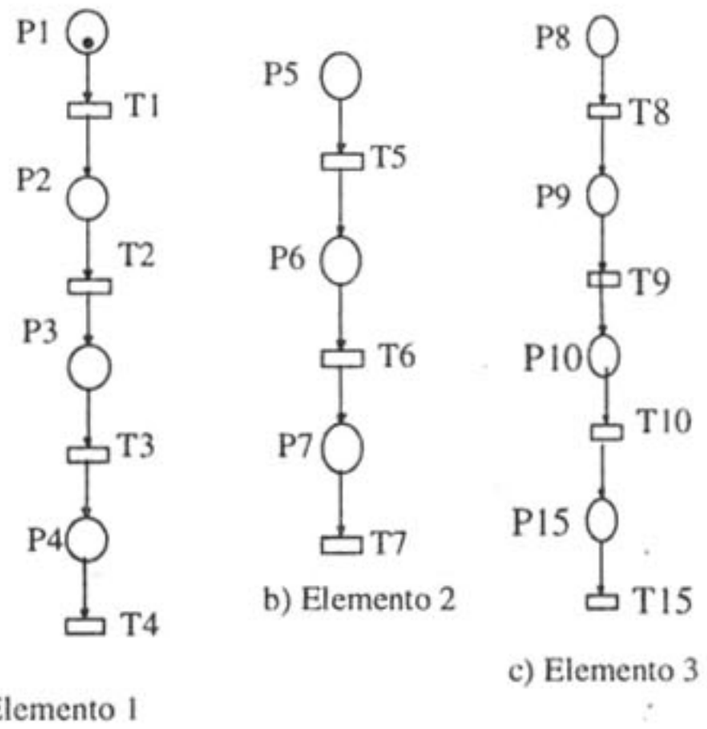


Figura 6. *Redes iniciales*

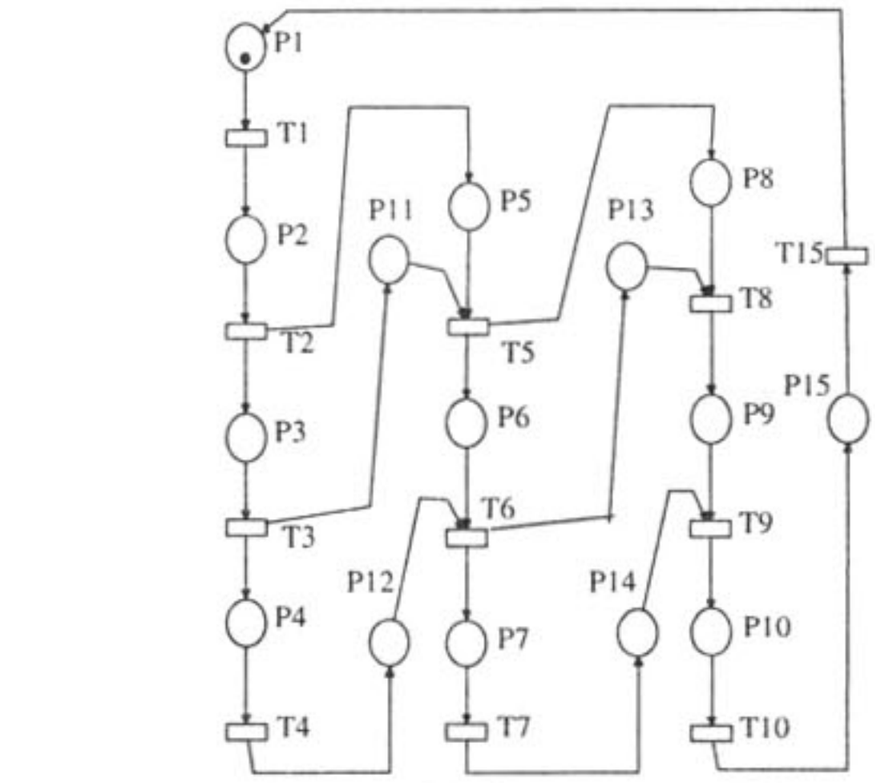


Figura 7. *Red de primer nivel*

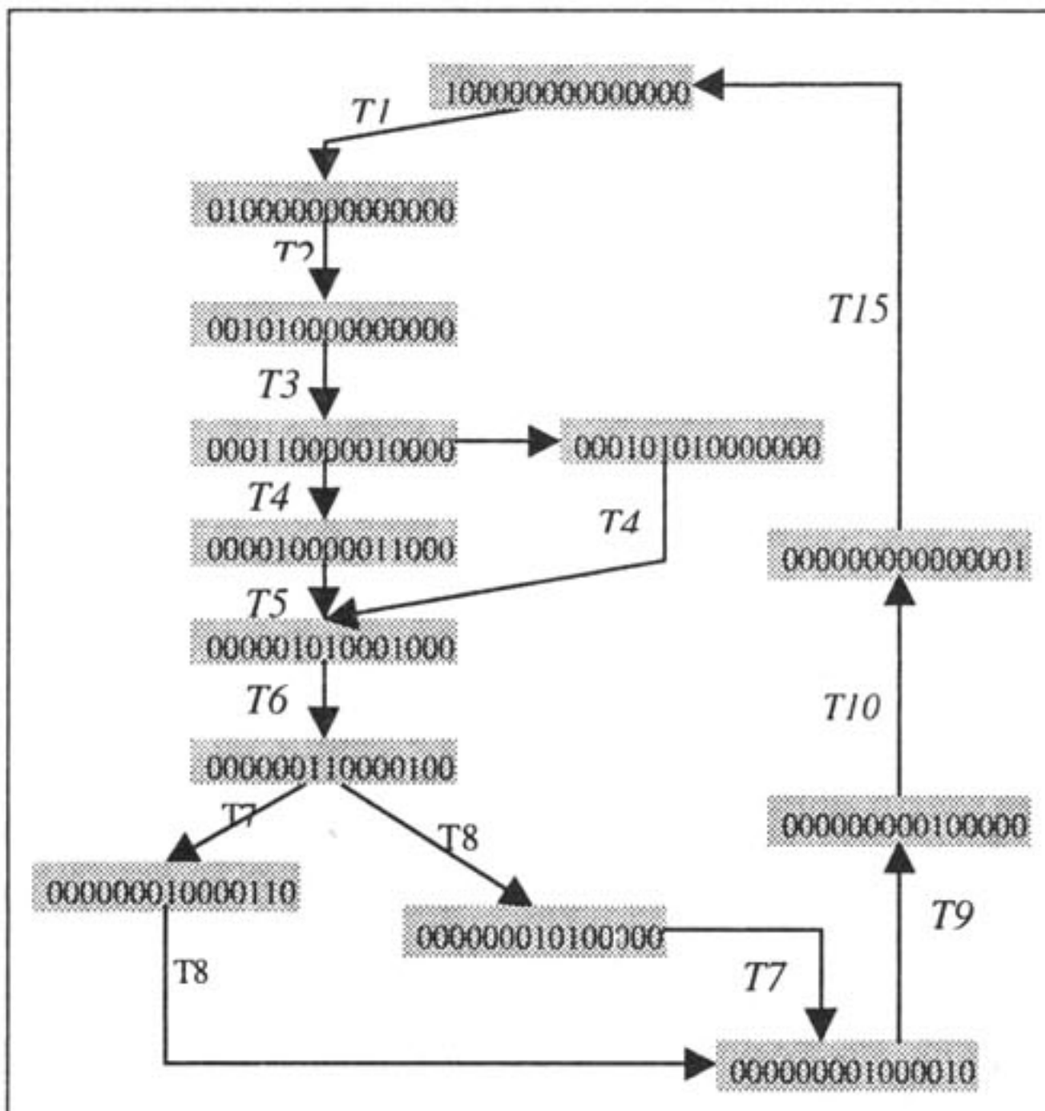


Figura 8. *Árbol de cobertura para la red figura 7*

raciones, el refinamiento se realiza reemplazando cada macro-lugar por uno de los cuatro módulos básicos de diseño descritos en [1]. En este caso se usa el módulo secuencial.

Reemplazando cada lugar de operación (lugares tipo Pa) por módulos básicos de diseño tipo secuencial se obtiene la red de la figura 9. Esta red conserva las propiedades básicas de la red de primer nivel validada.

El significado de los lugares adicionales de la red de la figura 9 es:

P21 (P51,P81): El AGV selecciona y transporta la materia prima para elemento 1(2,3) hasta banda de entrada.

P22 (P52,P82): La materia prima para fabricar el elemento 1(2,3) es transportada en la banda de entrada hasta la estación de mecanizado.

P31 (P61, P91): Proceso de torneado para elementos 1(2,3) respectivamente.

P32 (P62, P92): Proceso de fresado para elementos 1(2,3) respectivamente.

P41 (P71,P101): El elemento maquinado 1(2,3) es transportado en banda de salida hasta estación de ensamble.

P42 (P27,P102): El robot SCARA carga el elemento maquinado 1(2,3) en la mesa de ensamble.

Paso 3. Creación de Lugares representando recursos no compartidos:

No existen recursos no compartidos en este sistema. Los robots, el AGV, el torno y la fresa son compartidos por los tres procesos de producción, por lo tanto no se producen cambios en la red de la figura 9 ni se adicionan lugares tipo Pb en este paso.

Paso 4. Creación de Lugares representando buffers de almacenamiento.

No existen almacenes intermedios dentro de este sistema.

No se adicionan lugares tipo Pc a la red descrita en la figura 9.

Paso 5. Creación de Lugares representando recursos compartidos paralelamente:

Los recursos compartidos paralelamente son:

1. AGV
2. Robot SCARA
3. Robot articulado
4. Mesa de ensamble
5. Torno
6. Fresa.

Estos recursos son compartidos por los tres procesos principales descritos en la figura 6. Esta característica es modelada por medio de seis PME, como lo muestra la figura 10.

Para este caso particular cada recurso representa una exclusión paralela triple o 3-PME y su inclusión en la red validada no influye sobre las propiedades básicas de la red.

Los lugares añadidos a la figura 10 son los siguientes:

P17: Disponibilidad del AGV.

P21: Disponibilidad del robot SCARA

P20: Disponibilidad del robot articulado

P18: Disponibilidad del torno

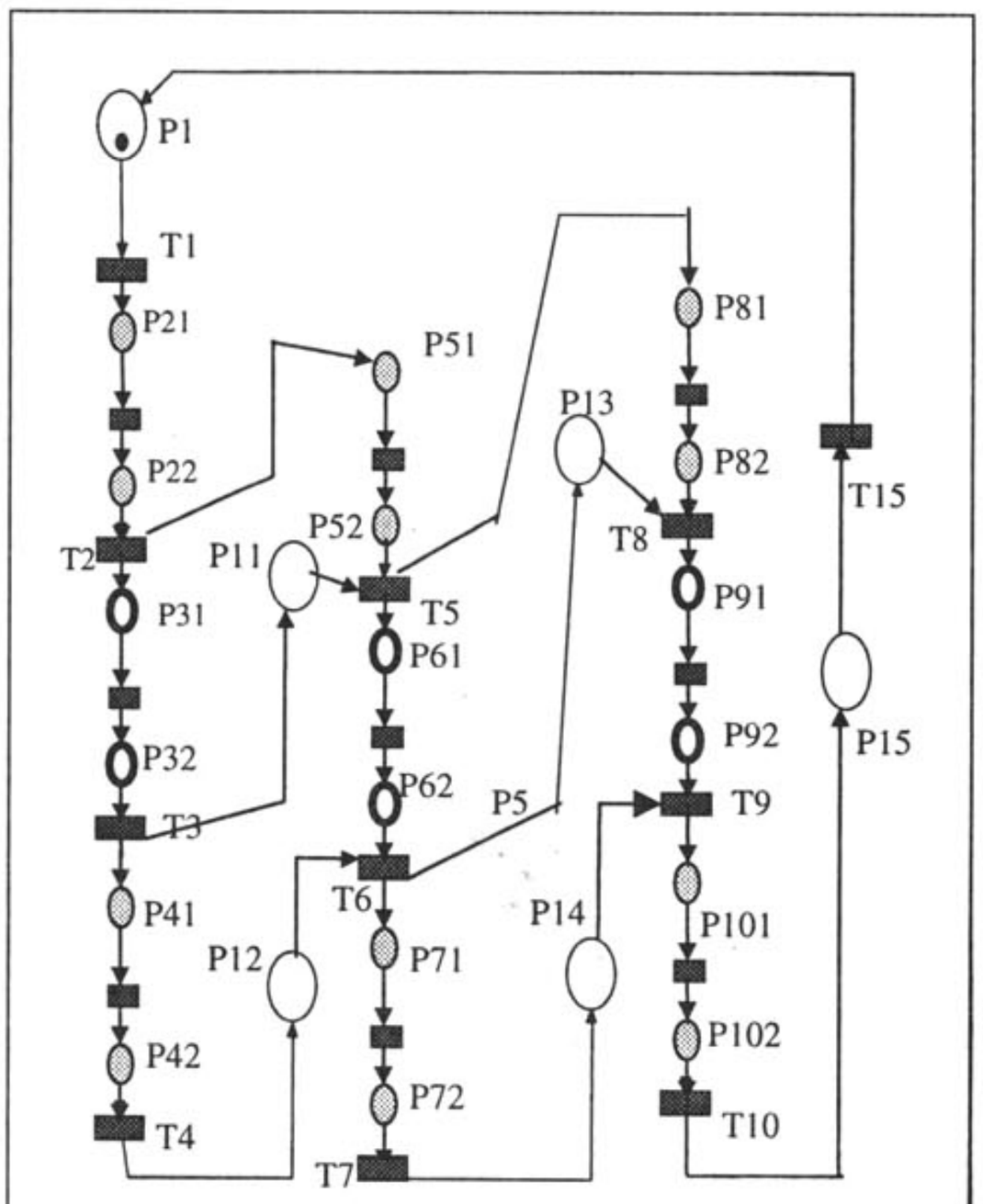


Figura 9. *Red resultante al refinar lugares Pa*

P19: Disponibilidad de la fresa
P22: Disponibilidad mesa de ensamble

Paso 6. Creación de Lugares representando Recursos Compartido Secuencialmente

No existen para el sistema propuesto recursos compartidos secuencialmente, por lo que no es necesario adicionar estructuras SME. La red de Petri que modela la producción de una pieza compuesta por tres elementos es finalmente la red de la figura 10.

6. ALGORITMO DE CONTROL

La red de Petri ilustrada en la figura 10, puede ser usada para crear el algoritmo de control de secuencias del CIM propuesto en [7], para lograr esto, se requiere transformar esta red en un lenguaje compatible con el hardware usado por controlador.

El controlador de secuencias propuesto en [7] para la célula es un PLC comercial [9]. La RdP anterior debe ser transformada en un Diagrama lógico tipo LADDER [9] o en un diagrama tipo GRAFCET [8].

Para realizar esta transformación se deben tener en cuenta tres puntos importantes:

1. Las entradas del sistema se representan como transiciones en las Redes de Petri y como contactos normalmente abiertos o cerrados cuando se usan diagramas lógicos tipo LADDER.
2. Las salidas del sistema se representan como los lugares en las Redes de Petri y como bobinas en la representación tipo LADDER.
3. Al activarse una entrada (transición para una RdP/ contactos para diagrama LADDER), se deben desactivar las salidas (lugares para RdP/ bobinas para diagrama LADDER) anteriores.

Para realizar la transformación se trabaja con las equivalencias descritas en [8] para estructuras lógicas AND, OR, paralelismo y sincronización. Para ilustrar lo anterior se transformará la red de la figura 7 en un diagrama lógico LADDER.

Asignación de entradas/salidas			
Entradas		Salidas	
I0,0	T1	**O0,0**	P1
I0,1	T2	**O0,1**	P2
I0,2	T3	**O0,2**	P3
I0,3	T4	**O0,3**	P4
I0,4	T5	**O0,4**	P5
I0,5	T6	**O0,5**	P6
I0,6	T7	**O0,6**	P7
I0,7	T8	**O0,7**	P8
I0,8	T9	**O0,8**	P9
I0,9	T10	**O0,9**	P10
I0,10	T15	**O0,10**	P11
		O0,11	P12
		O0,12	P13
		O0,13	P14
		O0,14	P15

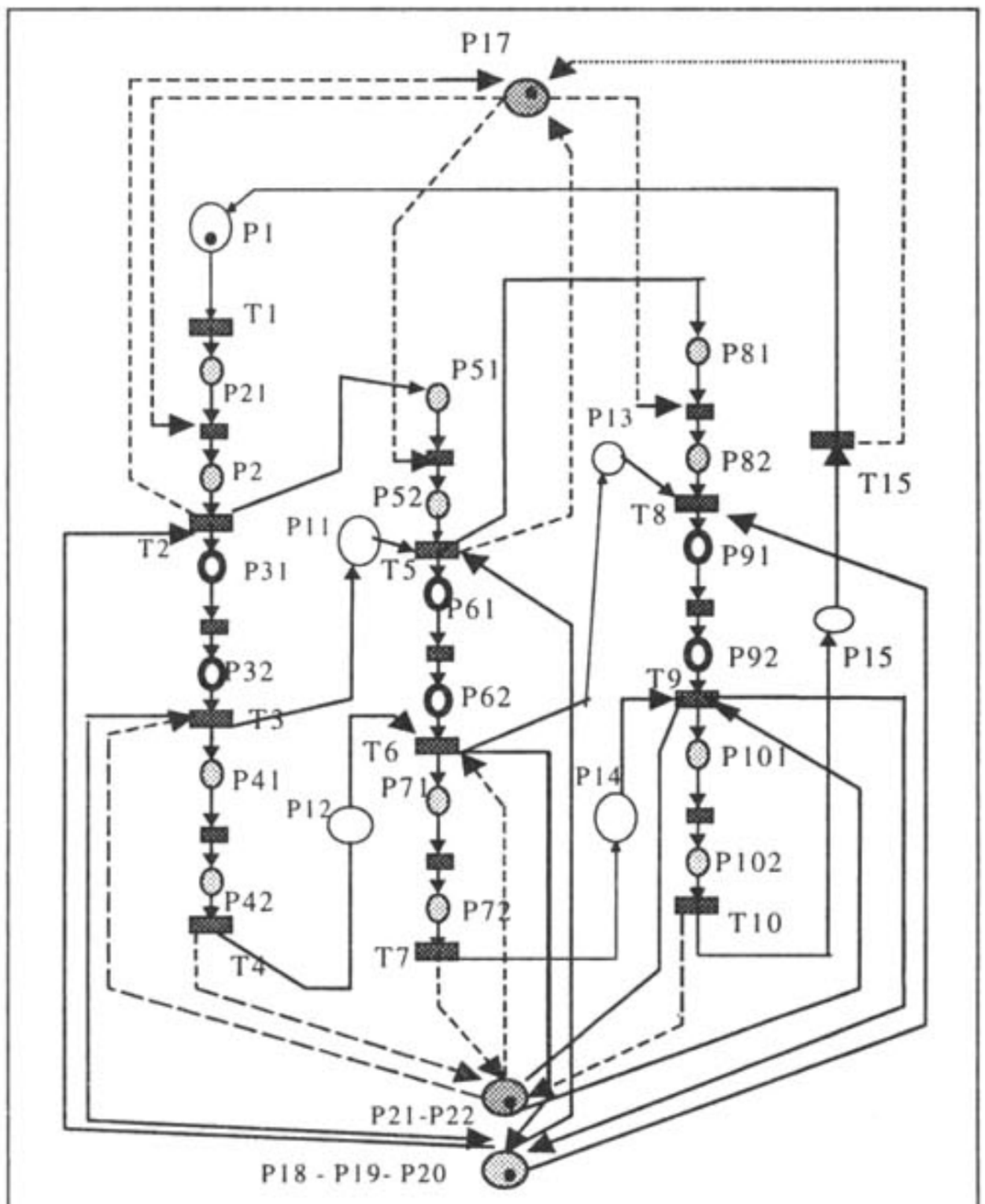


Figura 10. *Modelo final del sistema*

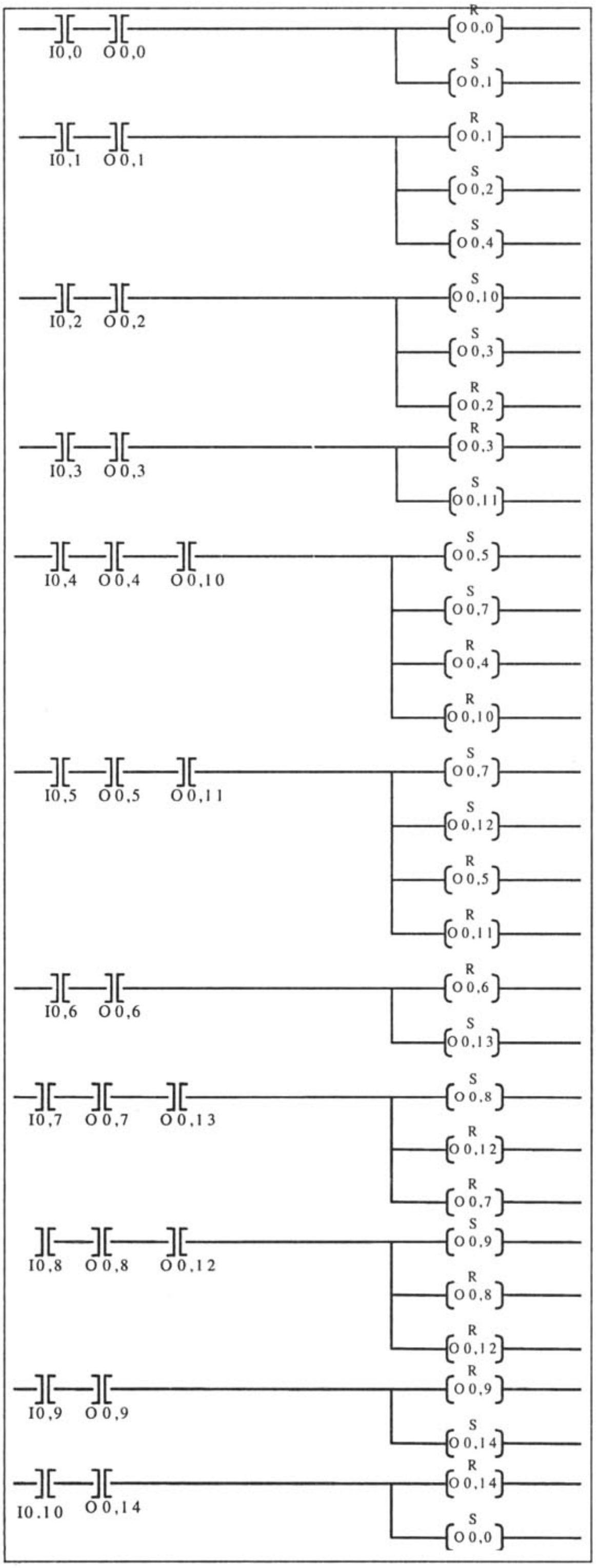
Inicialmente se realiza una tabla de asignación de entradas y salidas del PLC a los lugares y transiciones de la red. Con esta tabla y con base a la RdP de la figura 7 se obtiene el diagrama LADDER representa el control de secuencias de procesos para una pieza compuesta por tres elementos (No incluye las PME).
Ver diagrama LADDER en la página siguiente:

7. CONCLUSIONES

La metodología híbrida permite obtener modelos válidos con redes de Petri para sistemas CIM. Estos modelos representan procesos de producción y generalmente son estructuralmente complejos. Con esta técnica se evita el análisis matemático característico de las metodologías estructurales, de enumeración y reducción que para redes complejas no es sencillo.
La Red de Petri puede ser fácilmente transformada a un diagrama lógico LADDER, este finalmente representa el programa de control de secuencias para el proceso de estado discreto particular.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1.] ZHOU MengChu, DICESARE F, DESROCHERS A.A. "A Hybrid Methodology For Synthesis of Petri Nets Models for Manufacturing Systems". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. Vol 8, No. 3. 1992. pp 350 - 361.



[2.] MALEKI R. *Flexible Manufacturing Systems.* New Jersey : Prentice Hall 1991

[3.] ZHOU *MengChu, Petri Net Synthesis For Discrete Event Control of Manufacturing Systems.* Kluwer Academic Publisher. Boston, 1993.

[4.] DESROCHERS A.A, *Applications of Petri Nets in Manufacturing Systems.* IEEE Press. New York, 1995

[5.] SILVA M, *Las Redes de Petri en la Automática y La Informática*, Editorial AC, Madrid, 1985.

[6.] DICESARE F, *Practice of Petri Nets in Manufacturing.* Chapman & Hall. London, 1993.

[7.] MOTATO E, *Planeacion Dinamica de Procesos de Manufactura,* Tesis Magister en Automatica, Univalle, 1999

[8.] ZHOU MengChu, *Petri Nets in Flexible and Agile Automation.* Kluwer Academic Publisher, Boston 1995

[9.] Manual PLC Telemecanique TSX-17

AUTORES

Elliot Motato E. Ingeniero Mecánico, Universidad Autónoma de Occidente. Magíster en Automática, Universidad del Valle. Área de Sistemas Avanzados de Manufactura.

José Antonio Abadía N. Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle, Magíster en Ingeniería Eléctrica y Computadores, University of South Carolina. Área de interés: Inteligencia Artificial y Robótica.

José Isidro García M. Ingeniero Mecánico, Universidad Autónoma de Occidente. Candidato a Magíster en Automática de la Universidad del Valle. Área de interés: Robótica e Instrumentación.