

## SIMULACIÓN EN TIEMPO REAL DE PROCESOS DISCRETOS CONCURRENTES

### RESUMEN

El proceso de automatización de procesos industriales requiere de la sistematización de procedimientos que faciliten el diseño, el desarrollo y la implementación de los programas que deben ejecutar los sistemas electrónicos donde residen los programas de mando. Estos programas adquieren diversas apariencias que dependen de la tecnología utilizada para implementar dicha automatización, es decir, de si se usan autómatas programables o PLC, microcontroladores procesadores digitales de señales DSP u cualquier otra tecnología. El análisis y control de sistemas con tareas paralelas y concurrentes requiere de la construcción de modelos eficientes. El método de redes de Petri permite evaluar el paralelismo y la concurrencia eficientemente a través de un procedimiento sistemático

**PALABRAS CLAVES:** Redes de Petri, automatización industrial, concurrencia, paralelismo, autómatas programables.

### ABSTRACT

*The automation of industrial process requires of the systematizing of procedures that facilitate the design, development, and implementation of the programs that should execute the electronic system where the control programs reside. These programs acquire diverse appearances. This depends of the technology used to microcontrollers, Digital Signal Processing or DSP or any other technology. The analysis of concurrent and parallel system requires efficient models. Petri Nets method is one existing way of would evaluate the parallelism and concurrence in an efficient way.*

**KEYWORDS:** *Petri nets, industrial automation, concurrent, parallelism, programmable logic controller.*

### 1. INTRODUCCIÓN

El diseño e implementación de la lógica que resuelve un problema de automatización industrial donde se deben ciertas secuencias en función del estado de señales de entrada, señales de salida, cumplimiento de tiempos, conteo de eventos o cumplimiento de otras condiciones, es un proceso que puede ser llevado a cabo a partir del simple conocimiento de las instrucciones de los dispositivos donde se va implementar la solución, concatenadas entre si a través de alguna estrategia, la cual puede conducir a un diseño eficiente o no, dependiendo de la habilidad y el conocimiento del diseñador. Esta técnica de diseño se denomina *mandos concatenados*, y se caracteriza por ser muy subjetiva y generalmente difícil de actualizar o modificar cuando alguna característica del proceso cambia. Otra característica de esta técnica es que no es potable, y por lo tanto, cuando se cambia la tecnología sobre la que está implementada, debe construirse de nuevo el diseño, casi desde el inicio. De la misma forma que es una condición deseable que las nuevas tecnologías sean compatibles con el tipo y magnitud de las señales físicas involucradas en los procesos existentes, también es deseable que los programas ya construidos en las soluciones de algunos

### SIGILFREDO ARREGOCÉS

Ingeniero Electricista, Ms.C  
Profesor Titular  
Universidad Tecnológica de Pereira  
sigiarrego@utp.edu.co

### JHON JAIME ROBBY G.

Tecnólogo Electricista.  
Profesor Auxiliar  
Universidad Tecnológica de Pereira  
jjrobby@utp.edu.co

### ANTONIO ESCOBAR Z.

Ingeniero Electricista, M. Sc.  
Profesor Titular  
Universidad Tecnológica de Pereira  
aescobar@utp.edu.co

problemas de automatización sean potables entre tecnologías, y mas aun, que la misma técnica de diseño sea independiente del sistema o del equipo donde va a residir la solución. Las técnicas de solución de mandos secuenciales y Redes de Petri son ejemplos de métodos sistemáticos que permiten la elaboración de soluciones para tareas de automatización, de las cuales siguen procedimientos independientes de las características particulares del proceso y pueden ser implementados usando cualquier otra tecnología.

En este trabajo se presenta la solución a un problema de automatización típico que comparte un mismo recurso, su implementación en tiempo real utilizando una maquina universal construida por los autores de este articulo. Aunque el problema toma la forma de un sistema particular: dos subsistemas móviles independientes que permiten un producto desde dos lugares de carga diferentes hasta un sitio de descarga común, ver la figura 2, la solución de este problema es al mismo tiempo la solución de otros problemas, que pueden tener una apariencia diferente y que involucran variables diferentes, pero que al ser formulados son idénticos a este problema desde el punto de vista lógico.

## 2. PROTOTIPO INDUSTRIAL DE MAQUINA UNIVERSAL AUTOMÁTICA.

La enseñanza del control de procesos automáticos discretos no solamente requiere de modelos eficientes sino del desarrollo de maquinas que nos permitan validar en la practica estos modelos. Es por eso que presento la construcción de un prototipo industrial de maquina universal automática, con fines didácticos para la enseñanza, que nos permite la simulación y validación en tiempo real del paralelismo y concurrencia en procesos automáticos de producción.

### 2.1. Descripción de la maquina

La maquina esta construida por:

- . 2 tornillos sin fin.
- . 2 reguladores de velocidad para motores trifásicos.
- . Sensores (4) de posición infrarrojo.
- . autómata programable que permite generar perfiles de velocidad, aceleración y automatizar la maquina.
- . 2 accionamientos mecánicos para carga muerta variable que permiten controlar y simular el par de la maquina

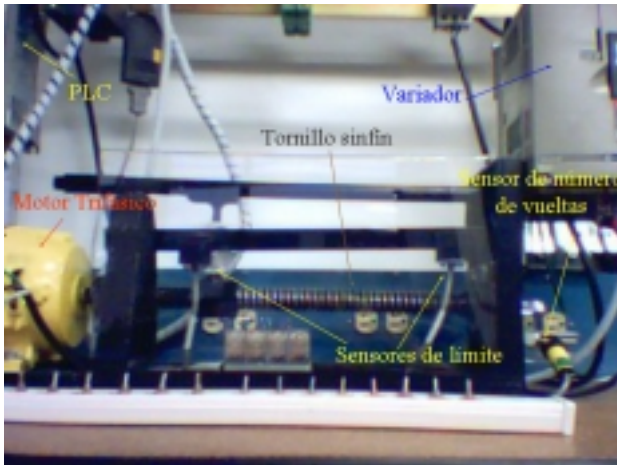


Figura 1: Prototipo construido para la simulación

### 2.2. Operación de la maquina

Una vez obtenido el modelo discreto, a través de las Redes de Petri, las acciones se asimilan a la memoria de imagen de las salidas del autómata y las entradas físicas que hacen que el sistema cambie de sentido se asimilan a la memoria de entrada y las entradas periféricas del autómata programable.

Los lugares marcados en las Redes de Petri que corresponden a transiciones vivas, se asimilan alas memorias internas de bit previamente activas.

Con las consideraciones anteriores se desarrolla el programa para el control de la maquina, utilizando lenguaje listado de instrucciones en S7 (lenguaje de programación de autómatas programables para autómatas programables Siemens).

El autómata programable nos permite:

- . Generar perfiles de velocidad y aceleración.
- . Hacer control de posición.
- . Hacer control de velocidad y aceleración.
- . Hacer control de par.
- . Generar concurrencias y paralelismos.
- . Simular procesos en tiempo real concurrentes.
- . Generar procesos secuñciales y de operaciones simultaneas.
- . Generar perfiles de posición.
- . Generar procesos cíclicos con acción combinacional y secuencial.

## 3. APLICACIÓN DE LAS REDES DE PETRI A LA AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS.

La red de Petri es un grafo orientado formado por un conjunto de dos tipos de elementos: lugares (representados por circunferencias) y transiciones (representados por segmentos de recta) los cuales están interconectados por arcos así:

$$R = \langle P, T, a, b \rangle \quad (1)$$

Donde,

$P$  es un conjunto finito y no vacío de lugares.

$T$  es un conjunto no vacío de transiciones.

$A: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  es la función de incidencia previa.

$B: T \times P \rightarrow \mathbb{N}$  es la función de incidencia posterior.

Además  $P \cap T = \text{vacío}$ , es decir, los lugares y las transiciones son conjuntos disyuntos.

**Definición 1:** El marcado  $M$  de una red  $R$  es una aplicación de  $P$  en  $\mathbb{N}$ , o sea, la asignación de un numero entero no negativo (numero de marcas) a cada lugar.

**Definición 2:** una transición  $t \in T$  esta sensibilizada por el marcado  $M$  si cada uno de sus lugares de entrada posee al menos  $\alpha(p, t)$  marcas. Es decir, se exige que para todo

$$p \in t, M(p) \geq \alpha(p, t). \quad (2)$$

**Regla de evolución del marcado:** dispara una transición sensibilizada  $t$  es la operación que consiste en eliminar  $\alpha(p, t)$  marcas de cada lugar  $p \in t$  y añadir  $\beta(p, t)$  marcas a cada lugar  $p \in ti$  con  $M_i \rightarrow t \rightarrow M_j$  representando el hecho de que  $t$  esta sensibilizada por  $M_i$  si se alcanza  $M_j$ . Es decir al disparar  $t$  se obtiene:

$$M_j(p) = M_i(p) + \beta(p, t) - \alpha(p, t) \quad (3)$$

Para todo  $p \in P$

## 4. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE AUTOMATIZACIÓN.

La figura 2 muestra el esquema del problema con el que se ilustra la técnica de solución y su posterior implementación. El sistema mostrado consta de dos vagones que pueden desplazarse independientemente y transportar un producto desde tolvas independientes y

transportarlo hasta un depósito general. Se denominan A y B, y viajan por dos carrileras diferentes desde sus respectivas tolvas (tolva A y tolva B), donde se encuentran accionando los microinterruptores LSRA y LSRB, hasta un punto común donde se encuentra un puente móvil P. A partir de este punto, determinado por los microinterruptores LSPA y LSPB, los dos vagones se desplazan por una trayectoria compartida hasta donde se encuentra el dispositivo general. Cada vagón inicia su recorrido cuando un operador de la orden de marcha correspondiente MA o MB, y el vagón B queda en un ciclo indefinido de carga y descarga mientras que el vagón A cada que realiza un ciclo de carga y descarga, permanece en el punto de carga hasta que se pulse de nuevo Marcha A: MA. El inicio del ciclo indefinido para B, después de pulsar MB, y la ejecución de un único ciclo para A, cada que se pulsa MA, son eventos asíncronos, es decir, son eventos independientes. Por lo anterior, es probable que exista una colisión entre los vagones en el trayecto compartido. Para resolver esta dificultad, se propone que B tenga prioridad sobre A cuando los dos vagones se encuentran realizando su ciclo simultáneamente. De acuerdo a lo anterior, si se acciona MA, se genera un ciclo de trabajo para el vagón A en el cual los sensores se accionan en secuencia LSRA-LSPA-LSF-LSRA- LSRA. En caso que la trayectoria compartida se encuentre ocupada, debe esperar en la posición LSPA a que la trayectoria quede libre y realizar el cambio en el puente móvil P, el cual por defecto permanece cerrado la trayectoria del vagón B. si se acciona MB se genera un ciclo de trabajo ininterrumpido en el cual los sensores se accionan en secuencia LSRB-LSPB-LSF-LSPB-LSRB.

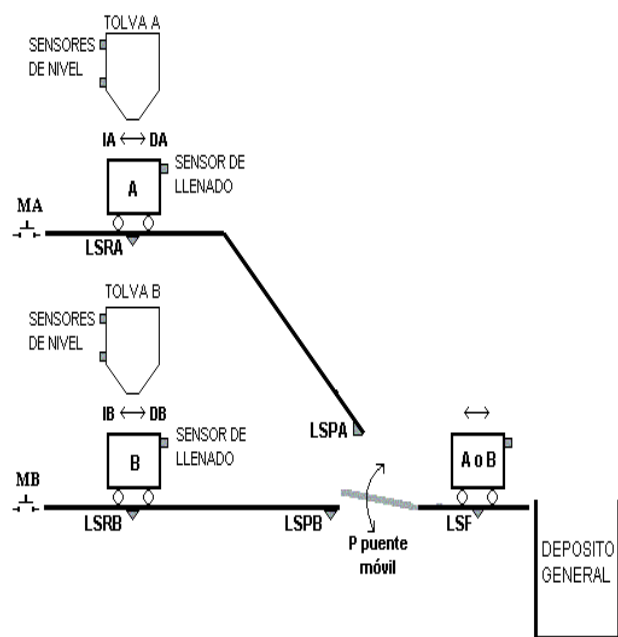


Figura 2. Esquema del sistema

### 5. SOLUCIÓN USANDO REDES DE PETRI

La figura 3 muestra la red que soluciona este y todos los problemas que tengan modelos lógicos similares. Para esta red se hacen las siguientes consideraciones previas:

- Los lugares marcados 1 y 2 se deben asimilar al lugar de arranque y continuidad del flujo lógico del problema.
- El vagón que llegue primero después de haber cumplido el segundo trayecto, (LSF-LSPA) y (LSF-LSPB) para los vagones A y B respectivamente, debe ser responsable de habilitar la ruta compartida, colocando la marca en el lugar marcado con el No. 3.
- El sistema electromecánico P debe estar habilitando permanentemente la trayectoria del carro de mayor prioridad (vagón B).
- Los sensores en el extremo derecho se deben convertir desde el punto de vista lógico, en un solo sensor LSF.
- Los sensores de los extremos: LSFA y LSF4, los cuales no aparecen en el esquema de la figura 2, aunque colocados en trayectorias distintas, se convierten en uno solo (LSF, el cual si aparece en la figura 2) a través de la señal M0.0.

O	LSFA	; Lee el sensor LSF3.
O	LSFB	; Lee el sensor LSF4, establece
=	M0.0	una función OR entre las dos
U	M0.0	lecturas y guarda su
=	LSF	resultado en la posición
		M0.0

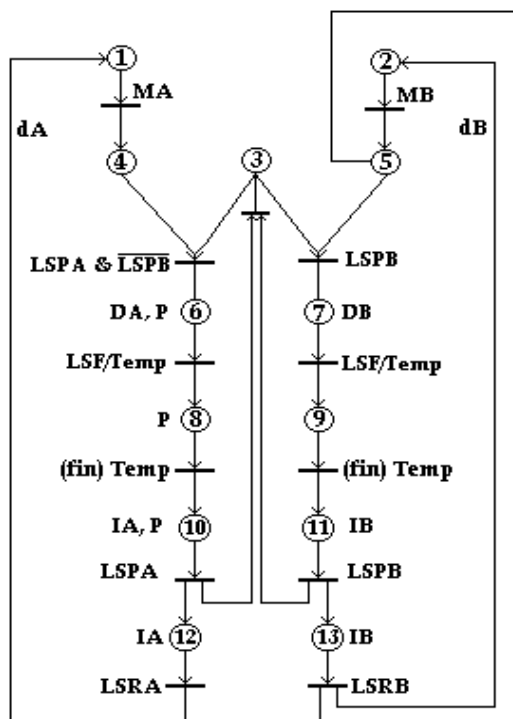


Figura 3. Descripción funcional del sistema con red de Petri

**5.1. Segmento no 1:**

**5.1.1. Marcado del lugar no 3**

La marca No. 3 nos permite dar vivacidad al lugar No. 3, el cual permite a cualquiera de los dos usuarios (vagón A o vagón B) saber si la trayectoria compartida se encuentra liberada, asimilados a esta vivacidad a "1" logico en la posición de memoria M0.1 que se debe colocar si se cumplen las siguientes condiciones:

- a) Que los carros se encuentren en el extremo izquierdo (LSRA y LSRB activos).
- b) Que se pulse marcha (MA/MB)

Cuando cualquiera de los dos carros comience a recorrer el segundo trayecto a la derecha (dA o dB) ésta posición de memoria debe ser borrada y solo debe ser colocada en el instante en que comience el recorrido inverso (iA ó iB) del primer trayecto respectivamente.

```

U (
U   LSRA
U   MA
O
U   LSRB
U   MB
)
S   M 1.0
U   A iA
UN  LSF
O
U   A iB
UN  LSF
)
R   M 1.0
    
```

**5.2. Segmento no.2 de los lugares 1 y 2 a los lugares 4 y 5**

**5.2.1. Lugar No. 4**

El vagón A inicia su marcha a la derecha en el primer trayecto (dA), una vez se active la marcha y cumpla la condición inicial de encontrarse en el extremo izquierdo, accionando el sensor LSPA. Su marcha debe ser detenida cuando se cumpla el estado logico (LSPA & LSPB & M1.0).

```

U (
U   MA
U   LSRA
)
S   M1.2
U (
U   LSPA ;
UN  LSPB
UN  M1.0
)
R   M1.2
=   dA
    
```

**5.2.2. Lugar No. 5**

El vagón B tiene prioridad sobre la trayectoria concurrente. Cuando se pulse la marcha y se encuentre en condiciones iniciales avanza a recorrer el primer trayecto hacia la derecha de A (dA) y solo se detiene en el cruce de vía al accionar LSPA. Si la trayectoria compartida se encuentra ocupada (LSPA & M0.1).

```

U (
U   LSRB
U   MB
)
S   M 1.1
U (
U   LSPB
UN  M 1.0
UN  M 1.0
)
R   M 1.1
U   M 1.1
=   dB
    
```

**5.3. Segmento No. 3**

**5.3.1. Lugar No 7**

Siempre y cuando el lugar No. 3 se encuentre marcado (M1.0 = "1" lógico) el vagón B continua su marcha derecha a través del puente móvil y hacia el segundo tramo, hasta tocar el sensor LSF.

```

U (
U   M 0.1
U   LSPB
)
S   M 1.3
U   LSF
R   M1.3
U   M1.3
=   DB
    
```

**5.3.2. Lugar No. 6**

Siempre y cuando el lugar No. 3 se encuentre marcado (M1.0 = "1" lógico) y el vagón A se encuentre en la posición extrema derecha del primer trayecto accionando el sensor LSPA, se debe activar P y el vagón avanza a la derecha dB del segundo trayecto.

```

U (
U   M1.0
)
S   M 1.4
U   LSF
R   M 1.4
U   M 1.4
=   P
U   M 1.4
=   DA
    
```

**5.4. Segmento No 4: Transición los lugares No. 8 y No. 9 de la red petri**

**5.4.1 Lugar No. 9**

Una vez que el vagón B toca el sensor LSF del extremo derecho del segundo trayecto, se detiene y comienza a correr su tiempo de retardo o de descarga en el depósito general.

```

U    LSF
L    S5T#80S
SE   T1
U    T1
=    M1.5
    
```

**5.4.2. Lugar No 8**

Una vez que el vagón A acciona al sensor LSF del segundo trayecto se detiene y comienza a correr su tiempo de retardo o de descarga en el depósito general y coloca el cambio de línea o puente P.

```

U    LSF
L    S5T#100S
SE   T2
U    T2
=    M1.6
U    M1.6
=    AP
    
```

**5.5. Segmento No. 5, transición a los lugares 10 y 11**

**5.5.1. Lugar No. 11**

Una vez se termine el tiempo de espera de la descarga del vagón B se inicia la marcha izquierda del segundo trayecto.

```

U    M1.5
S    M1.7
U    M1.7
=    IB
    
```

**5.5.2. Lugar No. 10**

Una vez se termine el tiempo de espera de la descarga del vagón B se inicia la marcha izquierda del segundo trayecto. Y además debe mantener activo la salida a la salida AP que establece el cambio de rieles hacia la trayectoria que debe cumplir el vagón A.

```

U    M1.6
S    M2.0
U    M2.0
=    AP
U    M2.0
=    IA
    
```

**5.6. Segmento No. 6, Transición a los lugares 12 y 13**

**5.6.1. Lugar No. 13**

Una vez activado el sensor LSPB por el vagón B que se mueve en sentido izquierdo dentro del segundo trayecto (IB), en este instante debe activarse la trayectoria concurrente colocando la marca del lugar No. 3 y continuar la marcha izquierda a través del primer trayecto del vagón B (iB) y se detiene cuando activa el sensor LSRB.

```

U(
U    LSPB
U    IB
)
S    M1.0
U    LSRB
R    M1.7
=    IB
    
```

**5.6.2. Lugar No. 12**

Una vez activado el sensor LSPA por el vagón A que se mueve en sentido izquierdo dentro del segundo trayecto (IA), en este instante debe habilitarse la trayectoria concurrente colocando la marca del lugar No. 3 y avanzar a la izquierda en el primer trayecto del vagón A y se detiene cuando activa el sensor LSRA.

```

U(
U    LSPA
U    iA
)
S    M1.0
U    LSRA
R    M2.0
=    iA
    
```

**5.7. Segmento No. 7**

Este es un segmento que permite reiniciar el proceso B, es decir que en forma activa se queda el vagón B recorriendo la trayectoria de derecha a izquierda y de izquierda a derecha en los dos trayectos eventualmente alternara la trayectoria concurrente con el vagón A.

```

U    LSRB
S    M1.1
U(
U    LSPB
UN   M1.0
)
R    M1.1
U    M1.1
=    DB
    
```

**5.8. Segmento No. 8**

El carro comienza su recorrido hacia la izquierda en el segundo trayecto (iA) y se debe colocar en testimonio o marca avisando al carro B la vía o segundo trayecto está libre, asimilada por los autores de este artículo como un valor "1" lógico en la posición de memoria de bit 15.0.

Para que comience el recorrido del segundo trayecto debe estar accionando al sensor infrarrojo LSF1 y su marcha solo se detiene cuando acciona el sensor infrarrojo LSR1.

U LSF1 ; Se lee el estado lógico del  
S M1.5 sensor LSF1 activa la salida  
U LSR1 IA (marcha a la izquierda  
R M1.5 del primer trayecto), el  
U M1.5 recorrido se detiene cuando el  
= IA carro A acciona el sensor  
U M1.5 infra-rojo LSR1, colocado en  
S M15.0 el extremo izquierdo del  
primer trayecto.

### 5.9. Segmento No. 9

Una vez que el carro A deja la vía despejada colocó un testimonio de que el segundo trayecto se encuentra libre (M15.0 = "1" lógico) el carro B inicia su recorrido a la derecha dentro del primer trayecto, siempre y cuando se encuentre en el extremo izquierdo del primer trayecto accionando al sensor infrarrojo LSR2, esperando que le despejen la vía.

U LSR1 ; El carro B se encuentra en el  
S M 0.7 extremo izquierdo y el carro  
U( A no tiene ocupada la vía  
U LSF2 arranca y solo se detiene  
UN DA cuando cumpla el recorrido  
)  
R M 0.7 derecho del primer tramo, es  
U M 0.7 decir cuando accione el  
= M 0.7 sensor infrarrojo LSF2.  
= DB

### 5.10. Segmento No. 10

Una vez que el carro detiene su marcha derecha en el primer trayecto activa el sensor infrarrojo LSF2 y se detiene; si la vía o trayecto compartido está libre, el sistema debe ir y buscar si la posición de memoria M15.0 está en "1" lógico y ratificarlo. Si esto se da, el carro B avanza a la derecha del segundo trayecto compartido, con la certeza de que se encuentre libre y solo se detiene cuando acciona al sensor infrarrojo LSF y empieza su retardo en el extremo derecho del segundo trayecto.

U(  
U M 15.0  
U LSF2  
)  
S M 1.0  
U M 1.0  
L S5T#3S  
U T3  
= M 1.1

### 5.11. Segmento No. 11

Cuando el carro B termina su tiempo de permanencia o retardo en el extremo derecho del segundo trayecto comienza su recorrido a la izquierda del segundo tramo IB hasta que accione el sensor infrarrojo LSF2.

U M 1.1 ; Se lee el fin de la  
S M 1.2 temporización o tiempo de  
U LSF2 permanencia en el extremo  
R M 1.2 derecho del segundo trayecto  
U M 1.2 del carro B, avanza hacia la  
= IB izquierda LSF2 hasta tocar el  
sensor infrarrojo y se  
detiene.

### 5.12. Segmento No. 12

El carro B continúa su marcha hacia la izquierda (IB), pero dentro de la trayectoria correspondiente al primer trayecto, este recorrido se detiene cuando acciona el sensor infrarrojo LR2. Una vez inicia este último recorrido debe avisar o dejar testimonio que la trayectoria concurrente se encuentra libre colocando un "1" lógico en la posición de memoria M 15.0.

U LSF2 ; Se lee el sensor LSF2. Si está  
S M 1.3 accionado avanza a la  
U LSR2 izquierda del último tramo y  
R M 1.3 se detiene cuando activa al  
U M 1.3 sensor infrarrojo LSR2.  
= IB apenas avanza a la izquierda,  
U M 1.3 para recorrer el último tramo  
= M 15.0 habilita la trayectoria  
concurrente

## 6. CONCLUSIONES.

La implementación de la automatización de procesos donde se realizan tareas paralelas y que comparten recursos, puede ser fácilmente realizada usando Redes de Petri, las cuales conducen a una solución que es independiente de la tecnología del sistema electrónico donde va a residir dicha solución. Así mismo, es relativamente sencillo trasladar el diseño desarrollado a un PLC o a cualquier otro sistema de desarrollo.

El campo de los automatismos es demasiado amplio y se necesita contar con una herramienta de diseño que nos permita el desarrollo de problemas complejos las Redes de Petri, es una de ellas.

## BIBLIOGRAFÍA.

- [1] SILVA, Manuel. Las Redes de Petri: en la automática y en la informática. Editorial AC, Madrid 1999.
- [2] ARREGOCÈS, Sigilfredo. ESCOBAR, Antonio. ROBBY, Jaime. Notas del curso de control de Procesos, programa de Tecnología Eléctrica UTP.