

## **Celda flexible automática separadora de materiales modelada con redes de Petri**

### **Automatic flexible material separation cell modeled with petri nets**

DOI: 10.46932/sfjdv3n5-020

Received in: August 23<sup>th</sup>, 2022

Accepted in: September 19<sup>th</sup>, 2022

#### **Domingo Velázquez Pérez**

Doctorado en Planeación Estratégica y Dirección de Tecnologías

Institución: Universidad de Guadalajara

Dirección: Av. Independencia Nacional, #151, Autlán de Navarro, Jalisco

Correo electrónico: domingov@cucsur.udg.mx

#### **Luis Isidro Aguirre Salas**

PhD on Electrical Engineering

Institución: Universidad de Guadalajara

Dirección: Av. Independencia Nacional, #151, Autlán de Navarro, Jalisco

Correo electrónico: isidro.aguirre@academicos.udg.mx

#### **Gerardo Núñez -González**

Doctorado en Ingeniería

Institución: Universidad de Guadalajara

Dirección: Av. Independencia Nacional, #151, Autlán de Navarro, Jalisco

Correo electrónico: gerardo.nunezg@academicos.udg.mx

#### **Pedro Barboza Jiménez**

Master en Ingeniería Electrónica

Institución: Universidad de Guadalajara

Dirección: Av. Independencia Nacional, #151, Autlán de Navarro, Jalisco

Correo electrónico: pedro.barboza@academicos.udg.mx

#### **Francisco Javier Pelayo Cortés**

Doctorado en Planeación Estratégica y Dirección de Tecnologías

Institución: Universidad de Guadalajara

Dirección: Av. Independencia Nacional, #151, Autlán de Navarro, Jalisco

Correo electrónico: franciscojav@cucsur.udg.mx

### **RESUMEN**

En este artículo se muestra el diseño y construcción de una celda flexible didáctica para la separación automática de objetos de diferentes materiales. La celda es controlada mediante un microcontrolador PIC16F876 y monitoreada desde una computadora mediante una interfaz gráfica de usuario. Se utilizaron las redes de Petri interpretadas (RPI) para modelar la celda y diseñar los controladores. La celda fue programada para realizar dos funciones: separar piezas de acuerdo a la naturaleza del material (plástico, vidrio y metal) en contenedores particulares, y separar los objetos de metal en contenedores diferentes en secuencias definidas por el usuario, por ejemplo de 2 en 2. La interfaz gráfica permite arrancar y detener la celda, seleccionar entre las funciones de control, además de mostrar una animación del estado de la celda en tiempo real. La aplicación muestra un conteo por cada tipo de material separado y depositado en cada contenedor, guardando un registro en una base de datos.

**Palabras clave:** automatización, microcontroladores, celdas de manufactura flexible, redes de petri, control automático.

## **ABSTRACT**

This paper shows the design and construction of a flexible didactic cell for the automatic separation of objects of different materials. The cell is controlled by a PIC16F876 microcontroller and monitored from a computer through a graphical user interface. Interpreted Petri nets (IPN) were used to model the cell and design the controllers. The cell was programmed to perform two functions: to separate parts according to the nature of the material (plastic, glass and metal) into particular containers, and to separate the metal objects into different containers in user-defined sequences, for example 2 by 2. The graphical interface allows starting and stopping the cell, selecting among the control functions, as well as displaying an animation of the cell status in real time. The application displays a count for each type of material separated and deposited in each container, saving a record in a database.

**Keywords:** automation, microcontrollers, flexible manufacturing cells, petri nets, automatic control.

## **1 INTRODUCCIÓN**

La evolución de la industria automatizada y la integración tecnológica orientada al aumento de la productividad y de la calidad del producto, provocan una mayor exigencia en la preparación de los profesionistas que demanda la industria (Fernández et al., 2022). Históricamente se puede decir que el tratamiento de los automatismos lógicos se ha basado en el álgebra de Boole y en la teoría de autómatas finitos. No fue hasta la década de los setenta que se dispuso de herramientas como las Redes de Petri (RP), para el diseño y análisis de automatismos secuenciales y concurrentes, sus características hacen que, para algunos problemas las RP funcionen de una manera natural (Petri, 1962). Karl Adam Petri, en su tesis doctoral indica que las redes de Petri comparadas con otros modelos de comportamiento dinámico, gráfico, como los diagramas de las máquinas de estados finitos, las RP ofrecen una forma de expresar los procesos que requieren sincronía. Las RP pueden ser analizadas de manera formal y obtener información del comportamiento dinámico del sistema de modelado.

En la actualidad existen diversos sistemas que han sido concebidos a partir de la necesidad de capacitación en las industrias con alto nivel de automatización, han logrado reproducir y emular el funcionamiento de una fábrica, permitiendo el estudio de las diferentes problemáticas que se presentan en el ámbito real, derivados de las necesidades de los sectores productivos (SMC, 2012). Debido a esto surge la inquietud por desarrollar un Sistema Didáctico, Automatizado, diseñado mediante RP, denominado Celda Flexible Automática Separadora de Materiales, controlado y monitoreado desde una computadora a través de una interfaz gráfica, permitiendo al usuario capacitarse, resolviendo problemas que se pueden presentar durante los procesos productivos reales.

La automatización y la robótica son conceptos que están estrechamente relacionados (Ibarra et al. 2021). Hablando en un lenguaje industrial, la automatización se define como un área de la Mecatrónica

que emplea sistemas mecánicos-eléctricos basados en computadoras para la operación y control de procesos. Por consiguiente, podemos indicar que la robótica es una diversidad de la automatización industrial.

Groover (1995), menciona que hay tres clases muy amplias de automatización industrial:

- Automatización fija: La automatización fija se utiliza cuando el volumen de producción es muy alto, y por tanto se puede justificar económicamente el alto costo del equipo especializado.
- Automatización programable: se emplea cuando el volumen de producción es relativamente bajo y hay una diversidad de producción a obtener.
- Automatización flexible: La automatización flexible, por su parte, es más adecuada para un rango de producción medio. Estos sistemas flexibles poseen características de la automatización fija y de la automatización programada. Los sistemas flexibles suelen estar constituidos por una serie de estaciones de trabajo interconectadas entre sí, por sistemas de almacenamiento y manipulación de materiales, controlados en su conjunto por una computadora.

La experiencia de países industrializados que cuentan con un alto grado de automatización y emplean un número elevado de robots, demuestra que merced a éstos se eleva la productividad en porcentajes adecuados para su Producto Interno Bruto. Los robots permiten producir con mayor rapidez, exactitud y calidad una cantidad creciente de bienes y servicios. La aplicación y desarrollo de la automatización para la producción industrial competitiva, deberá fundarse en los resultados de una capacitación eficiente y una educación tecnológica adecuada. Debiéndose contar con los recursos necesarios y la infraestructura correspondiente (Vargas, 1995).

## **2 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO**

Como lo comenta Balbo (2001), para la modelación de sistemas se pueden utilizar las redes de Petri toda vez que fueron desarrolladas en la búsqueda de métodos naturales, simples y poderosos para la descripción y análisis de flujos de información y control de sistemas. En las redes de Petri, el estado del sistema deriva de la combinación de variables de estado locales que permiten una representación directa de la concurrencia, la causalidad y la independencia.

Las redes de Petri poseen un atractivo importante para el modelo y simulación de sistemas, dado que integran en el mismo formalismo gráfico la representación del sistema y el entorno de animación respectivo. Además, el modelo de Petri es suficientemente general como para representar una gran variedad de sistemas y, es especialmente idóneo para todos aquellos que tienen un comportamiento asíncrono, son distribuidos, actúan en paralelo y/o son no deterministas. De forma similar a los diagramas de flujo de datos y a los autómatas finitos, las redes de Petri realizan una abstracción a nivel funcional. Su modo de operación es no determinista y permiten reflejar, entre otros aspectos, la ejecución concurrente

de distintos procesos, representar la disponibilidad de recursos, imponer restricciones de acceso a datos compartidos, y representar la evolución dinámica de los sistemas (Sánchez, 2000).

### 3 DESARROLLO

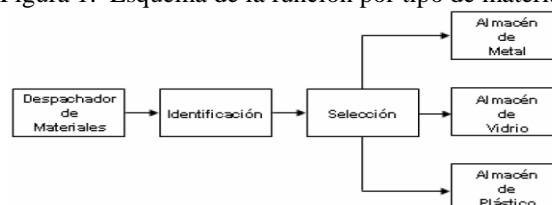
La celda flexible automática separadora de materiales posee un controlador capaz de realizar dos o más procesos por lo que se denomina celda flexible, debido a que no está restringido a un solo proceso, además que puede adecuarse fácilmente a distintos productos, dentro de las propiedades físicas y características dimensionales. Los procesos o funciones de la celda flexible consisten en: 1) Separación de cada tipo de material en un almacén diferente, 2) Separación de metal en dos almacenes en secuencia de dos en dos y otros tipos de materiales en otro almacén.

Los procesos de la celda flexible fueron modelados con redes de Petri interpretadas (Sanchez, 2000), con el propósito de facilitar el diseño del controlador. Un lector interesado en profundizar en los conceptos de redes de Petri utilizados en este trabajo puede consultar (Murata, 1989). Primero se modela cada uno de los procesos por etapas de la celda y así proceder a fusionar cada uno de los modelos adquiridos y obtener como resultado un modelo general del proceso.

### 4 DISEÑO DE UN CONTROLADOR PARA LA SEPARACIÓN DE MATERIAS EN DISTINTOS ALMACENES

Este modelo es analizado para determinar que posee las propiedades deseadas y que refleja fielmente el comportamiento del proceso de la celda flexible para después diseñar un controlador para cada función o especificación. La primera función consiste en limitar a que cada material se almacene en un contenedor diferente de acuerdo a su tipo, es decir que el metal se envíe al almacén 1, el vidrio al almacén 2 y el plástico al almacén 3. La figura 1 muestra el esquema de esta función.

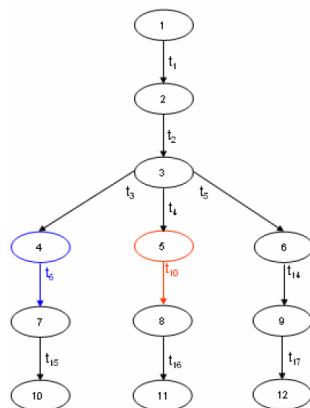
Figura 1. Esquema de la función por tipo de material.



El grafo de alcanzabilidad o grafo de estados de la figura 2 se muestra el comportamiento deseado de la celda según la primera función. El comportamiento deseado de la celda se restringe a las siguientes secuencias de eventos o transiciones:  $\sigma_1 = T_1 T_2 T_3 T_6 T_{15}$ ;  $\sigma_2 = T_1 T_2 T_4 T_{10} T_{16}$ ;  $\sigma_3 = T_1 T_2 T_5 T_{14} T_{17}$ ;

o al siguiente lenguaje:  $L = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ . Note que las tres secuencias empiezan con la transición o evento  $T_1$ .

Figura 2. Grafos de estados de la celda.



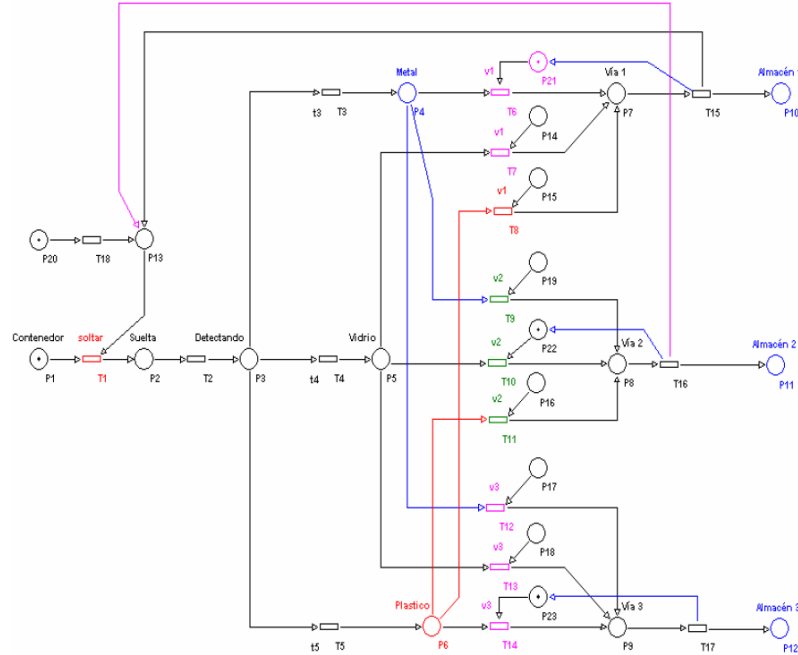
## 5 DISEÑO DEL CONTROLADOR PARA LA PRIMERA FUNCIÓN

Para diseñar el controlador que restrinja el comportamiento de la celda a las secuencias de eventos de la primera función se deben seguir los siguientes pasos:

- 1) Agregar un lugar de entrada a cada transición controlable para limitar su disparo.
- 2) Para cada secuencia.
  - a. Unir la última transición de la secuencia con el lugar de entrada de la primera.
  - b. Unir la última transición de la secuencia con el lugar del control de la última transición controlable de la secuencia para hacer la red cíclica.
- 3) Colocar una marca en el lugar de las transiciones controlables que aparecen en la secuencia.

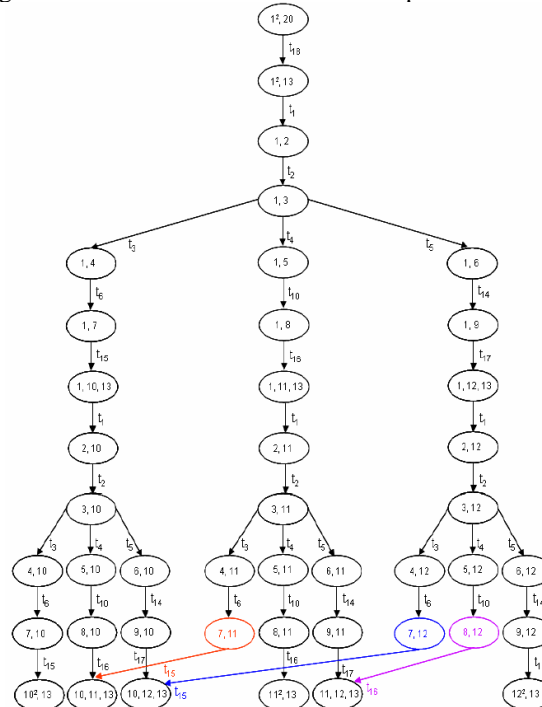
En la figura 3 se muestra la red de Petri del par celda-controlador resultante después de aplicar los pasos anteriores.

Figura 3. Red de Petri del par Celda-Controlador.



Para comprobar que el controlador ha sido diseñado correctamente se obtiene el grafo de alcanzabilidad del par celda-controlador. Como se puede observar en la figura 4 el comportamiento de la celda ha sido restringido al comportamiento deseado según la primera función. Por lo tanto, el controlador está correctamente diseñado.

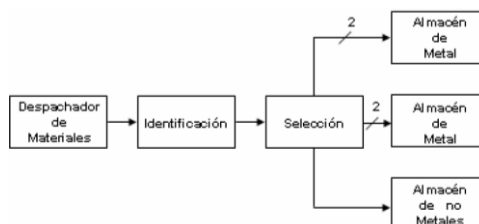
Figura 4. Grafo de alcanzabilidad de la primera función.



## 6 DISEÑO DE UN CONTROLADOR PARA LA SEPARACIÓN DE METAL EN DOS CONTENEDORES

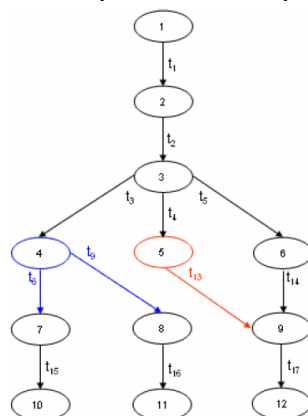
La segunda función consiste en restringir el comportamiento de la celda a que realice la separación de metal, en dos almacenes en secuencia de 2 en 2 y los otros materiales sean enviados a un tercer almacén, es decir que el metal envíe al almacén 1 y 2 en secuencia de 2 en 2 y el vidrio o plástico al almacén 3. La figura 5 muestra el esquema de esta función.

Figura 5. Esquema de la función para la separación de metal.



En la figura 6 se observa el grafo de alcanzabilidad correspondiente al comportamiento de la celda restringida según el proceso de la segunda función. Como se puede observar el comportamiento de la celda se restringe a las siguientes secuencias de eventos o disparos:  $\sigma_1 = (T_1 T_2 T_3 T_6 T_{15})^2 (T_1 T_2 T_4 T_{10} T_{16})^2$ ;  $\sigma_2 = (T_1 T_2 T_4 T_{13} T_{17})$ ;  $\sigma_3 = (T_1 T_2 T_5 T_{14} T_{17})$ . O al siguiente lenguaje:  $L = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ .

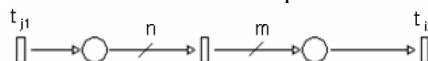
Figura 6. Grafo de alcanzabilidad correspondiente al comportamiento de la celda restringida.



## 7 DISEÑO DEL CONTROLADOR

En la segunda función los metales se van a separar de dos en dos. En este caso es necesario disponer de una estructura en la red de Petri que permita contar el número de veces que se ha realizado una secuencia figura 7. Si la secuencia de disparo tiene la forma  $(\sigma_1 T_{i1} T_{j1})^n (\sigma_2 T_{i2} T_{j2})^m$ , lo que significa que la primera subsecuencia debe realizarse n veces y después la segunda subsecuencia debe realizarse m veces, entonces debe construirse la siguiente estructura en la red del sistema:

Figura 7. Estructura de conteo para las secuencias.

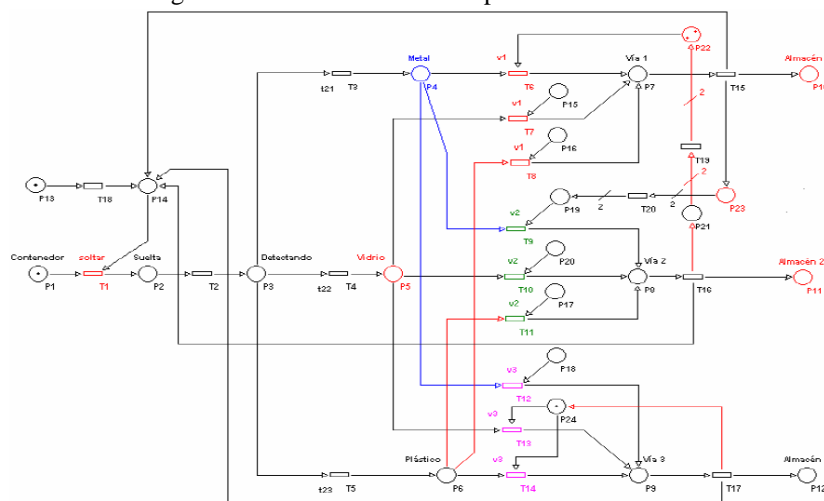


Para diseñar el controlador que restrinja el comportamiento de la celda a las secuencias de disparo de la segunda función se deben seguir los siguientes pasos:

- 1) Agregar un lugar de entrada a cada transición controlable para limitar su disparo.
- 2) Para cada secuencia unir la última transición de la secuencia con el lugar de entrada de la primera.
- 3) Para la secuencia:  $\sigma_1 = (T_1 T_2 T_3 T_6 T_{15})^2 (T_1 T_2 T_4 T_{10} T_{16})^2$ ; Agregar una red contadora entre  $T_{15}$  y  $T_9$ , otra entre  $T_{16}$  y  $T_6$  donde  $m=n=2$ .
- 4) Para las secuencias:  $\sigma_2 = (T_1 T_2 T_4 T_{13} T_{17})$  y  $\sigma_3 = (T_1 T_2 T_5 T_{14} T_{17})$  unir la última transición controlable de la secuencia para hacer la red cíclica.
- 5) Colocar las marcas necesarias en los lugares de control de las transiciones controlables que aparecen en la secuencia, según su orden: a) Dos marcas en el lugar de control de  $T_6$ . b) Una marca en cada lugar de control de  $T_{13}$  y  $T_{14}$ .

En la figura 8 se muestra la red de Petri del par celda-controlador resultante.

Figura 8. Estructura de conteo para las secuencias.



## 8 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

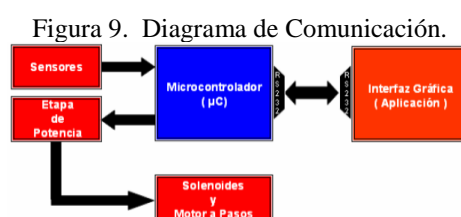
El control de la celda está basado en la tecnología del Microcontrolador PIC16F876 de 8 bits con características de aplicación Industrial, montado en una tarjeta electrónica en la cual se encuentran otros circuitos integrados que conforman la etapa de control tal es el caso de amplificadores de corriente y un convertidor de nivel de voltaje. El PIC está programado para que la celda pueda realizar dos funciones diferentes: separar cada tipo de material en un contenedor diferente y separar de dos en dos los materiales metálicos en los dos primeros contenedores.



Con el fin de facilitar la selección entre la primera y segunda función de la celda, además de monitorear su funcionamiento y llevar un registro de la separación de materiales, se diseñó una interfaz gráfica en C++, la cual se comunica con el microcontrolador a través del puerto serial de la computadora. La interfaz de usuario permite arrancar y detener la celda, seleccionar entre las dos funciones de control disponibles, además de mostrar una animación del estado de la celda en tiempo real. La aplicación muestra un conteo por cada tipo de material separado y el total de materiales depositados en cada contenedor, llevando un registro estadístico en una base de datos.

## 9 DIAGRAMA DE COMUNICACIÓN DE LA CELDA

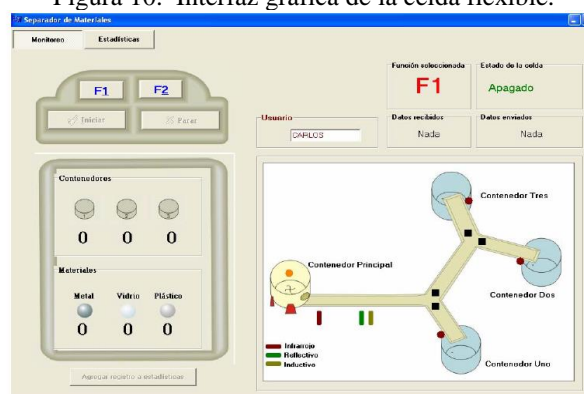
En la figura 9 se muestra la comunicación entre las diferentes etapas de la celda flexible, los sensores solamente envían señales al microcontrolador y este a su vez se comunica con los solenoides y el motor a pasos a través de la etapa de potencia. La comunicación entre el microcontrolador y la interfaz gráfica de usuario se realiza mediante el puerto serial RS-232 de una manera bidireccional, monitoreando la celda en tiempo real.



La interface gráfica y monitoreo se implementó en C++, figura 10, con las siguientes funciones:

- a) Arranque y paro de la celda.
- b) Selección de la función de separación por tipo de material o separación de metal de dos en dos.
- c) Visualización del total de piezas detectadas de cada tipo de material y total de piezas en cada contenedor.
- d) Monitoreo del estado de la celda en tiempo real, sensores de entrada/salida, solenoides y trayectoria del material.
- e) Autenticación de inicio el cual permite llevar un registro de las personas que han realizado corridas en la celda.
- f) Registro estadístico por tipo de material separado y el total de materiales almacenados en cada contenedor.

Figura 10. Interfaz gráfica de la celda flexible.



## 10 CONCLUSIONES

Las redes de Petri interpretadas facilitaron el diseño de los controladores de los procesos de la celda, los cuales se obtuvieron como resultado del análisis del modelo de la celda. Implementar los controladores en lenguaje ensamblador del PIC fue sencillo, debido a que las variables de programación se declararon y se representaron en base a ellos. Es indudable que existen una gran cantidad de aplicaciones tanto en la industria como en los diversos procesos en los que se hallan un flujo de información y una serie ordenada de eventos cuyo diseño y análisis son viables tomando como base las redes Petri interpretadas, ya que su implementación se logra de una manera sencilla y segura.

## RECOMENDACIONES

Dentro del trabajo futuro del proyecto se encuentra la implementación de otras funciones de separación, por ejemplo detectar y separar materiales plásticos de acuerdo a su color, detección y separación del cartón. Además de realizar el control de la celda a través de un controlador lógico programable y adaptar una pantalla táctil para el monitoreo y control local de la celda.

## REFERENCIAS

- Balbo, G. (2001). *“Introduction to Stochastic Petri Nets”*, Universidad de Torino, Torino Italia.
- Fernández, G.T., Miranda, S.F.J., Fernández, P.V.D., Terrazas, C.A., Méndez, U.G.E. (2022). Diseño y simulación de control de un sistema de ventilación asistido por PLC y pantalla weintek. South Florida Journal of Development 3-4: 4545-4554.
- Groover, M., Weiss, M., Ángel R., Odrey, N. (1995). *“Robótica Industrial: Tecnología, programación y aplicaciones”*. México. McGraw Hill.
- Murata, T. (1989) ”Petri nets: Properties, analysis and applications”, Proc. IEEE, Vol. 77, no 4 pp. 541-580, Apr. 1989.
- Ibarra, P.M.L., Duque, S.O.M., Duque, M. (2021). Control climático de un robot guiado por las trayectorias de las extremidades superiores del humano. South Florida Journal of Development 2-1: 871-889.
- Petri, C. A. (1962). *“Kommunikation mit Automaten”*, Phd Thesis: Universidad de Bonn.
- Sánchez, P. (2000). *“Animación de Especificaciones OASIS mediante Redes de Petri”*, Tesis Doctoral: Universidad Politécnica de Valencia, España.
- SMC. (10 de septiembre de 2012). SMC INTERNATIONAL TRAINING. Obtenido del Manual de usuario del 3DSupra. Disponible en: <http://www.smctraining.com/has200/3DSupra.pdf>
- Vargas, P. E. (1995). “Efectos de la automatización y la robótica en la economía de los países de capitalismo atrasado”. Revistas Digitales de la Universidad nacional de Colombia. Pp. 97-111.