

# Módulo instrumentado de control para autómatas programables

J. Vega-Campos<sup>1</sup>, J.P. Sánchez-Santana<sup>1</sup>, E. Castellanos-Velasco<sup>1</sup>, N. Juárez-Rodríguez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Politécnica de Puebla  
Tercer carril del Ejido Serrano S/N  
Mpio. Juan C. Bonilla, Puebla. C.P. 72640

<sup>2</sup>3ª Sur Oriente No. 973

Colonia Lindavista  
Berriozabal Chiapas. C.P. 29130

vega.campos@uppuebla.edu.mx, jose.sanchez@uppuebla.edu.mx,  
ernesto.castellanos@uppuebla.edu.mx, juarez1@hotmail.com

## Resumen

Se describe la instrumentación de un módulo de trabajo para un laboratorio de automatización de procesos industriales, con la finalidad de hacer pruebas de aplicaciones basadas en autómatas programables AP, también conocidos como PLC (Programmable Logic Control). La principal aportación en éste trabajo es presentar las ventajas de la utilización de autómatas Finitos AF y esquemas de funciones secuenciales EFS como herramientas formales para resolver problemas de modelado de sistemas de eventos discretos. Además, el módulo se instrumentó al modo como se acostumbra hacer en las implementaciones de equipos que se encuentran en la industria. En éste trabajo se analiza una aplicación práctica que forma parte de la automatización que se realiza para una máquina de rotomoldeo.

**Palabras claves** – autómatas finitos, GRAFCET, funciones secuenciales, PLC.

## 1. Introducción

Desde tiempos muy antiguos, el ser humano ha buscado la forma de mejorar sus condiciones de trabajo, primeramente auxiliándose de máquinas simples para proveer la fuerza necesaria y facilitar sus tareas, hasta la realización de mecanismos complejos e ingeniosos que los llevaron al desarrollo de máquinas.

En 1745, la industria textil comienza a utilizar tarjetas perforadas en sus procesos productivos revolucionando este sector [1], para 1788 James Watt desarrolla el primer regulador automático para la máquina de vapor y así es como los controladores y máquinas están contruidos básicamente por componentes mecánicos y eléctricos [2]. En 1835 Josep Henry inventa el relevador electromecánico, el

cual es un dispositivo capaz de abrir y cerrar un juego de contactos eléctricos, este dispositivo fue la base del control eléctrico industrial en lo que se llama control basado en lógica de relevadores [3].

La automatización industrial, o automática, es la disciplina que persigue el funcionamiento autónomo de los dispositivos técnicos; la mayoría de los procesos automatizados en la industria están controlados por Autómatas Programables AP y en menor medida por computadoras y reguladores industriales [1].

En éste trabajo se presenta la implementación de un módulo de laboratorio basado en AP, donde se puedan practicar las técnicas y habilidades necesarias para el uso de estos dispositivos como medio de control y verificación de las herramientas de modelado de sistemas de eventos discretos [4] en un contexto similar a una implementación real como las existentes en la industria; además del autómatas el equipo dispone de un variador de frecuencia VF, y la disposición en terminales de las señales necesarias para conectar equipos diversos como relevadores de estado sólido, contactores, sensores, además de incluir entradas y salidas analógicas por mencionar algunas de sus características más importantes.

Un AP, es básicamente una computadora pequeña con pocos recursos, que tiene un bloque de señales eléctricas como entradas del sistema y un bloque de conmutadores eléctricos como salidas del sistema. Este dispositivo recibe los datos del exterior en el bloque de entradas, procesa la información en la unidad central de procesamiento resolviendo las operaciones lógicas indicada en un programa almacenado en su memoria y como resultado resuelve el estado del bloque de salidas; con estas salidas puede manipular las tareas necesarias para el funcionamiento de una máquina o proceso productivo [5].

## 2. Métodos formales

Generalmente el método utilizado en la industria para el desarrollo de aplicaciones basadas en AP es la aplicación de lógica intuitiva, que generalmente para aplicaciones pequeñas es de uso muy práctico y funcional, pero para aplicaciones largas y complejas se hace necesario el uso de métodos formales para el diseño y modelado de automatismos [6].

Un autómata finito AF, es un modelo matemático computacional para resolver problemas de lógica secuencial, el cual es concebido como una abstracción de una máquina que puede estar en uno de un finito número de estados. Otras metodologías formales son las redes de Petri RdP [4] y los esquemas de funciones secuenciales EFS, (Sequential Function Charts, SFC), este último está descrito en la norma internacional publicada por la comisión internacional para la electrotecnia en el estándar IEC-61131-3 [7] donde además define los siguientes lenguajes de programación:

- Lenguaje de lista de instrucciones.
- Lenguaje de contactos.
- Diagrama de bloques de Funciones.
- Texto estructurado.

Los EFS son una herramienta gráfica para describir estructuras de programa en los proyectos basados en autómatas programables, dada la facilidad de representar gráficamente el comportamiento de un sistema de automatización industrial [8].

Su utilización se conoce desde 1977, cuando un grupo de trabajo de la AFCET (Association Française pour la Cybernétique Economique et Technique, Asociación Francesa para la Cibernética Económica y Técnica) creó una herramienta conocida como GRAFCET (Graphe Fonctionnel de Commande Etape Transition) diseñada para representar sistemas secuenciales y de ejecución paralela comúnmente usados en los AP [9].

### 2.1 Autómatas finitos

Un AF puede modelar problemas relacionados con el diseño de neumática, mecánica, hidráulica, biológicos, autómatas industriales, protocolos de comunicaciones, análisis de lenguaje y otras aplicaciones de ingeniería [10].

Un AF consiste en un número finito de estados y transiciones que describen el comportamiento de un sistema.

Formalmente, un AF [4] se denota por la quintupla  $(Q, \Sigma, \delta, q_0, F)$ , donde:

$Q$  Conjunto finito de estados posibles del sistema

$\Sigma$  Conjunto finito de eventos  
 $\delta$  Conjunto de transiciones  $\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q$   
 $q_0$  Estado inicial, donde  $q_0 \in Q$   
 $F$  Conjunto de estados final, donde  $F \subseteq Q$

Un grafo, llamado diagrama de transiciones, está asociado con un autómata finito, donde los vértices representados por un círculo en el grafo corresponden a los estados posibles y los arcos dirigidos indican la transición de un estado  $q_i$  a un estado  $q_{i+1}$  cuando el evento  $e_{i_k}$  se presenta, así como se ilustra en la Figura 2.

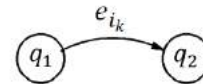


Figura 2. Transición de un estado a otro.

Una transición  $\delta(q_i, e_{i_k})$  indica el estado al que se llegará partiendo de un estado  $q$  con una entrada o evento, etiquetado con el símbolo  $e_{i_k}$ , donde  $e_{i_k} \in \Sigma$ .

La transición representada en la Figura 2 quedaría como se indica en (1).

$$\delta(q_i, e_{i_k}) = q_{i+1} \quad (1)$$

La Figura 3 ilustra un ejemplo sencillo de un AF expresado en (2). Para el caso  $i = 1, 2, 0$ .

$$M = \{Q, \Sigma, \delta, q_0, F\} \quad (2)$$

en donde:

$$Q = \{q_0, q_1, q_2\}$$

$$\Sigma = \{0, 1\}$$

$$\delta = \{(q_0, 1) = q_1, (q_1, 0) = q_2, (q_2, 1) = q_1\}$$

$q_0$  Estado inicial

$$F = \{q_2\}; F \subseteq Q$$

Los estados finales se representan con dos círculos concéntricos, en el ejemplo de la Figura 3 sólo hay un estado final  $q_2$  donde  $q_2 \in F$ , y  $F \subseteq Q$

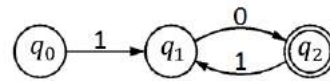


Figura 3. Autómata Finito M.

### 2.2 Esquemas de funciones secuenciales

Los Esquemas de Funciones Secuenciales EFS son una simplificación de las RdP, esencialmente los EFS son una RdP binaria [4], la cual se representa como se ilustra en la Figura 4, donde los cuadros representan los estados del sistema, las rectángulos negros representan las transiciones y suelen ser etiquetados

con un número entre paréntesis que indica el número de transición, el cual debe ser único en el sistema, es decir no puede haber ni estados ni transiciones repetidos; los rectángulos asociados a los estados, representan las acciones a realizar cuando el estado está activo; los estados activos se suelen representar con un punto negro.

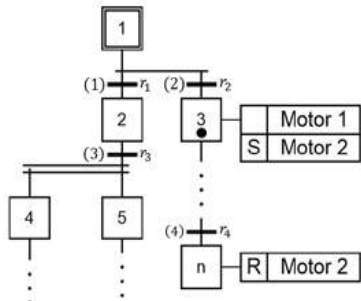


Figura 4. Esquema de funciones secuenciales.

### 3. Instrumentación del módulo

El módulo se instrumentó como se ilustra en la Figura 5 con semejanza a como se acostumbran a hacer las implementaciones de los tableros de control que ese encuentran en la industria, esto es con la finalidad de proporcionar un ambiente los más parecido a la realidad industrial.

Los planos de control se diseñaron de forma general como se ilustra en el esquema simplificado mostrado en la Figura 6. El sistema cuenta con una etapa de potencia general con el interruptor principal  $KP$ , que alimenta a un variador de frecuencia  $VFD$  y a una fuente de 24VDC para el control.



Figura 5. Módulo de laboratorio.

El encendido del módulo se hace a través del relevador de encendido  $KE$  y el sistema de protección mediante el relevador  $KM$  que hace la función de un relevador de control maestro el cual desactiva los controles que eléctricamente sean necesarios para la seguridad del módulo. Los sensores y los mandos del sistema se conectan al bloque de entradas del autómata, y en el bloque de salidas se conectan los

relevadores auxiliares  $KA_1, KA_2, \dots, KA_n$ . Además, el equipo tiene protecciones térmicas y fusibles para proteger los dispositivos y a las personas que lo manipulen.

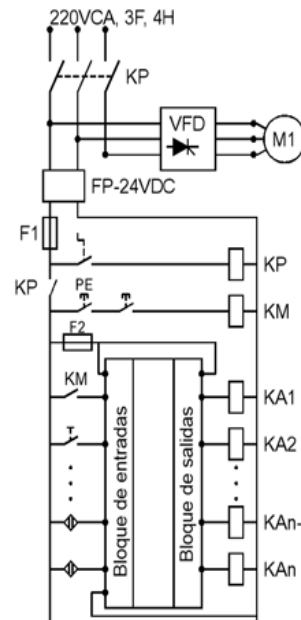


Figura 6. Esquema de control simplificado.

### 4. Caso de estudio

Se presenta el siguiente ejemplo de aplicación, el cual es parte del proceso para la automatización de una máquina de rotomoldeo [11]. La componente por analizar es el movimiento del brazo principal  $B$  ilustrado en el diagrama de proceso de la Figura 7; Este brazo hace una serie de movimientos giratorios en una u otra dirección, con dos posiciones de parada, la posición de carga de material y la posición de extracción de producto terminado.

#### 4.1 Descripción del proceso

El brazo  $B$  se hace girar haciendo uso de un motor trifásico que es controlado por un variador de frecuencia etiquetado como  $VFD$  el cual es comandado desde el AP mediante las señales  $Am$  y  $Dm$ . El motor a través de la transmisión  $T$  hace girar el molde que está en el brazo, y los sensores  $Sp1$  y  $Sp2$  son utilizados para colocar el brazo  $B$  en posición de carga de material o de desmolde.

Las señales conectadas en el módulo son las siguientes:

#### Entradas del sistema:

- $Bi$  botón de inicio del ciclo de trabajo,
- $Sp1$  sensor de posición 1 (posición de carga),
- $SP2$  sensor de posición 2 (posición de desmolde).

### Salidas del sistema:

- LR Luz indicadora roja,
- LA Luz indicadora ámbar,
- LV Luz indicadora verde,
- Am Arranque del motor,
- Dm Dirección de giro.

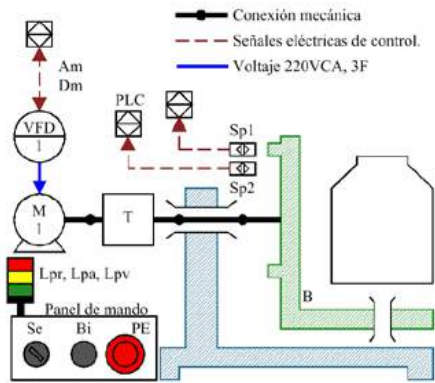


Figura 7. Diagrama de proceso de la aplicación.

### 4.2 Operación general del sistema.

La operación general del sistema se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 8, donde *Mpi* significa máquina preparada para iniciar producción, *Cm* Cargar materia prima y *Dpt* Desmolde del producto terminado.

En éste esquema se representa el funcionamiento del automatismo sin mucho detalle, el cual permite establecer un acuerdo de operación del sistema entre la parte administrativa y el equipo que realiza la automatización del sistema.

Con el diagrama de proceso de la máquina ilustrado en la Figura 7 y el diagrama de flujo ilustrado en la Figura 8, se puede establecer los eventos que se pueden presentar en el sistema y relacionarlos con las señales de entradas y salidas externas E/S y las señales internas del AP.

La siguiente lista muestra las etiquetas relacionadas con algunos de los eventos que se presentan en el sistema, y se indica entre paréntesis la relación que tienen con las entradas y salidas.

donde:

- E entrada al sistema de una señal externa,
- S salida del sistema de una señal externa.

Señales internas del AP:

- ei entrada de una señal interna,
- si salida de una señal interna.

Eventos:

- iCT* iniciar-continuar ciclo de trabajo (E: *Bi*),
- Bp1* Brazo en posición 1 (E: *Sp1*),
- Bp2* Brazo B en posición 2 (E: *Sp2*),
- gBh* girar brazo B en sentido horario (S: *Am, Dm*),

*gBc* girar brazo B en sentido contrario (S: *Am, Dm*).

Eventos con señales internas:

- iC* incrementar contador (Si: *iC*),
- rC* resetear contador (Si: *rC*),
- cf* contador Finalizado (ei: *cf*),
- T1* activar temporizador 1 (si: *T1*),
- dT1* desactivar temporizador 1 (si: *T1*),
- T1t* tiempo 1 terminado (ei: *T1t*).

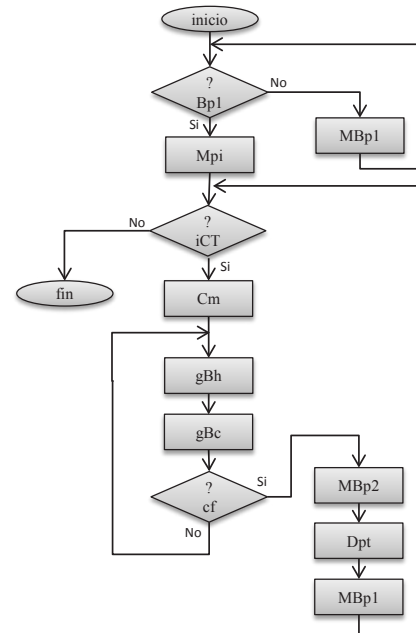


Figura 8. Diagrama de flujo de funcionamiento.

El conjunto de entradas del sistema  $\Sigma$  esta dado por la ecuación (3) y el conjunto de salidas está representado en (4).

$$\Sigma = \{ Bi, Sp1, Sp2, T1t, cf, S13 \} \quad (3)$$

$$Y = \{ Am, Dm, LR, LA, LV, T1, rC, iC \} \quad (4)$$

La Figura 9 ilustra parte del autómata que modela el comportamiento del automatismo; al encender el sistema se activa un pulso del bit S13 [5] el cual es tratado como una función de transición inicial para activar los estados iniciales del autómata que describe el comportamiento del sistema, en el caso de la Figura 9 se tiene el estado  $q_0$ .

### 4.3 Implementación

El AP instalado en el módulo de laboratorio sólo dispone de lenguaje de esquema contactos y lista de instrucciones en el software de programación, así que es necesario convertir el modelo gráfico del AF o EFS a su equivalente es esquema de contactos.

Para esto es necesario transformar el conjunto finito de funciones transición  $\delta$  y asociar las salidas  $y_i$  a cada



uno de los estados representados en el modelo del sistema. Las ecuaciones (5) a (10) representan las salidas asociadas a los estados del autómata de la Figura 9.

$$y_1 = \{eLV, eLR, eLA, aT1 = 2s\} \quad (5)$$

$$y_2 = \{aLV, aLR, aLA, dT1\} \quad (6)$$

$$y_2 = \{aLV, aLR, aLA, dT1\} \quad (7)$$

$$y_3 = \{eLV, aLA, aLR\} \quad (8)$$

$$y_4 = y_5 = \{eLA\} \quad (9)$$

$$y_5 = \{gBh, eLR\} \quad (10)$$

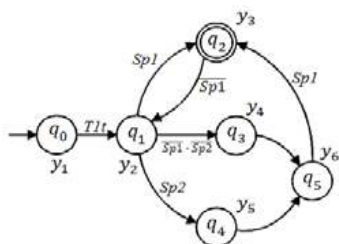


Figura 9. Parte del autómata del caso de estudio.

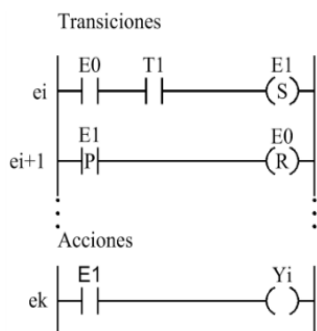


Figura 10. Transiciones del automatismo.

La programación de cada una de las transiciones así como las acciones que les corresponden a sus estados se ilustran en la Figura 10, en donde E0 representa el estado anterior, T1 la condición de la transición, E1 estado siguiente y Yi la salida o acciones a realizar cuando el estado E1 está activo.

## 5. Conclusiones

En éste trabajo se concluye que la utilización de métodos formales para modelar sistemas dinámicos de eventos discretos, particularmente AF y EFS, facilitan la implementación de programas en lenguaje de esquemas de contactos, además de mejorar su entendimiento. Dado que el modelo gráfico funciona como un respaldo descriptivo de ingeniería, éste permite localizar sin ningún problema cada etapa de la evolución del sistema, su localización dentro del código de programa y por tanto facilitan el mantenimiento del mismo, así como la implementación

de nuevas funcionalidades o modificaciones a las existentes.

## Agradecimientos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca otorgada a Javier Vega para la realización del posgrado en MI-API-UPPue, el proyecto de ciencia básica CONACyT No. 251190, fortalecimiento PRODEP de CA-TII DSA/103.5/13/11458, y PRODEP/103.5/13/6709. A Rotoinnovación S.A. de C.V. por los materiales facilitados y permitir trabajar en la automatización de sus procesos y la realización de estancias de trabajo en su empresa.

## Referencias

- [1] R. Piedrafita, Ingeniería de la automatización industrial, Madrid, España: Alfaomega, 2004.
- [2] B. Kuo, Sistemas de control Automático, México: Pearson, 1996.
- [3] J. Love, Process automation handbook, Londres: Springer, 2007.
- [4] B. Hruz y M. Zhou, Modeling and control of discrete-event dynamic system, London: Springer, 2007.
- [5] Schneider-electric, *Twido suite V2.3, guía de programación*, Schneider-electric, 2011.
- [6] İ. T. Hasdemir, S. Kurtulan y L. Gören, «An implementation methodology for supervisory control theory,» en *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 36, nº 3-4, pp. 373-385, 2008.
- [7] International Electrotechnical Commission, *IEC 61131-3, Programmable controllers: Programming languages*, International Electrotechnical Commission, 2003.
- [8] J. Karl-Heing y M. Tiegel kamp, IEC 61131-3: Programing industrial automation systems, Germany: Springer, 2001.
- [9] AFCET Commission, *Normalización de la Représentation du Cahier des Charges d'un Automatism Logique*, AFCET, 1977.
- [10] Z. Ibrahim, A. A. Ibrahim, I. A. Garba y D. Sahabi, «Modeling Of Sokoto Cement production Process Using Finite Automa: Compact Model,» *International Journal of Applied Phisics*, vol. 6, nº 3, pp. 34-37, 2014.
- [11] R. J. Crawford y J. L. Throne, Rotational Molding Technology, New York: Plastics Design Library, 2002