

# Diseño de un controlador basado en el modelo del autómatas híbrido

Cruz Jiménez, B.<sup>1</sup>, Avilés Viñas, J.<sup>2</sup>, Lara Caballero, E.

*Fecha de recepción: julio de 2008 – Fecha de aceptación: mayo de 2009*

## Resumen

Los sistemas híbridos son una clase de sistemas dinámicos donde el comportamiento a analizar es definido por la interacción de dinámicas continuas y discretas. En la mayoría de las industrias existen procesos que pueden ser del tipo continuo, basados en eventos discretos o binarios, y procesos que combinan ambos aspectos, estos procesos dan lugar a lo que se conoce como sistemas dinámicos híbridos. Existen muchas razones para usar modelos híbridos para representar el comportamiento dinámico de tales sistemas. Una razón importante es la reducción de complejidad del modelo en orden. Los diagramas de escalera son el método dominante en el control de eventos discretos de los sistemas industriales automatizados. Sin embargo, la síntesis de un diagrama de escalera depende principalmente de la experiencia del programador, lo que frecuentemente resulta en diseños sin estructura e inflexibles. En este trabajo se presenta la modelación de un sistema de llenado de botellas utilizando el modelo del autómatas híbrido y su implementación en diagrama de escalera.

**Palabras clave:** *autómatas híbrido, estados discretos, comportamiento continuo, diagrama de escalera, controlador lógico programable (PLC).*

## A controller design based in hybrid automata model

### Abstract

The hybrid systems are modeled by the interaction of dynamic continuous and discrete systems. Most of the industrial processes can be continuous, discrete or processes that combine both aspects, the later give place to what is known as hybrid dynamic systems. Many reasons exist to use hybrid models to represent the dynamic behavior of such systems. An important reason is the reduction of complexity of the system dynamical equations. Ladder diagrams (LDs) for a programmable logic controller are a dominant method in discrete event control of industrial automated systems. However, the synthesis of LD itself mainly depends on the experience of the industrial engineer, which often results in unstructured or inflexible design. In this work we develop the hybrid model of an industrial process and implemented the control in ladder diagram.

**Key words:** *hybrid automata, discrete states, continuous behavior, ladder diagram, programmable logic controller (PLC).*

---

<sup>1</sup> Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería-Universidad Autónoma de Yucatán, México. E-mail: bcruz@uady.mx

<sup>2</sup> Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería-Universidad Autónoma de Yucatán, México.

## **INTRODUCCIÓN**

Los sistemas dinámicos híbridos han atraído considerable atención en los años recientes. En general, los sistemas dinámicos híbridos son aquellos que combinan dinámicas continuas y discretas, por lo que dicha dinámica se representa por variables de estado continuas y discretas.

Desde el punto de vista de la ingeniería, un sistema híbrido es una red de dispositivos digitales y análogos o bien un dispositivo digital que interactúa en un ambiente continuo. En cualquier momento en que un dispositivo digital interactúe con el mundo continuo, el comportamiento involucra fenómenos híbridos que necesitan ser analizados y entendidos. Toda vez que un programa de computadora dependa de los valores que tomen ciertas variables continuas, será necesaria la utilización de metodologías para el análisis de los sistemas híbridos que garanticen la exactitud del programa, de hecho la verificación de tales programas de computadora ha sido una de las metas principales de muchas investigaciones de sistemas híbridos en la literatura.

En nuestro caso nos enfocaremos al área de control y no a la de computación. Así en la ingeniería de control, motivados por los avances rápidos en la tecnología moderna de los controladores digitales, los sistemas dinámicos híbridos son objeto de creciente relevancia e importancia (Lemmon et al. 1991).

Una de las razones más importantes para representar los sistemas con dinámicas continuas y discretas mediante un modelo híbrido es la reducción en la complejidad del orden de dicho modelo. Por ejemplo, en lugar de tener que representar las relaciones dinámicas a partir de un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales de orden superior, se puede representar el mismo sistema por un conjunto de ecuaciones simples (Lemmon et al. 1991).

Los procesos industriales se pueden considerar sistemas dinámicos ya que las salidas dependen de entradas y salidas anteriores. En la mayoría de las industrias existen procesos que pueden ser del tipo continuo, basados en eventos discretos o binarios, y procesos que combinan ambos aspectos, estos procesos dan lugar a lo que se conoce como sistemas dinámicos híbridos. Los sistemas híbridos son aquellos cuyas dinámicas continuas están influenciadas por la ocurrencia de eventos discretos. Durante su operación, siempre será importante el poder realizar un análisis y evaluación del desempeño de los procesos actuales para verificar si éste se cumple de acuerdo a lo planeado (Stiver et al. 1992).

Cuando se desea modelar, más que la evolución temporizada de las transiciones discretas, la evolución de los procesos continuos afectados por eventos discretos se debe utilizar el modelo del autómatas híbrido. En este sentido, el modelo del autómatas híbrido es considerado como una generalización del autómatas temporizado, donde las ecuaciones diferenciales continuas restringidas a representar dinámicas de integradores, pueden tener también representaciones de primer orden (Favela, 1999).

En la representación de un sistema es necesario entender y modelar correctamente las entradas, los elementos que lo componen y las interrelaciones de los mismos. Si estos son modelados correctamente, entonces los resultados obtenidos en las salidas serán correctos. Cuando se intenta modelar un sistema, debe hacerse un compromiso entre la simplicidad del modelo y la precisión de los resultados del análisis. Aquí reside el problema común de la modelación: el incluir lo suficiente de la actividad del sistema para desarrollar un modelo preciso y al mismo tiempo mantener el modelo lo suficientemente simple como para permitir por medios factibles determinar las salidas. Si una gran precisión no es necesaria, entonces es preferible desarrollar solamente un modelo razonablemente simplificado (Antsaklis et al. 1998)

Los diagramas de escalera para los controladores lógicos programables son el método dominante en el control de eventos discretos de sistemas automatizados industriales. Sin embargo, debido, debido a la creciente funcionalidad y complejidad de estos sistemas ha desafiado el uso de los diagramas de escalera para diseñar sus controladores de eventos discretos (Peng y Zhou, 2004).

A partir del modelo del autómatas híbrido aplicado a un sistema electromecánico de llenado de botellas, se realizará la síntesis del controlador y posteriormente se desarrollará un diagrama de escalera, el cual puede ser fácilmente implementado en un PLC.

## **METODOLOGÍA**

### **Modelación del sistema**

Consideremos un sistema de llenado de botellas como se muestra en la Figura 1. El llenado se realiza desplazando las botellas de izquierda a derecha sobre una banda transportadora la cual posiciona las botellas vacías debajo del grifo para su llenado. Este sistema cuenta con un sensor infrarrojo que indica la presencia de la botella ( $b_1$ ) y otro sensor discreto que indica cuando la botella está llena ( $b_2$ ), cuando la botella está llena, la banda realiza un movimiento

hacia la derecha hasta que se detecta la presencia de una nueva botella vacía, así, dependiendo de la combinación discreta de los sensores ( $b_1$  y  $b_2$ ) será la acción de control de movimiento de la banda transportadora, si la botella no está presente ( $b_1=0$ ) o está presente pero llena ( $b_1=1$  y  $b_2=1$ ), la banda se pondrá en movimiento y esto activará la señal discreta  $AB$ . Por el contrario si se detecta la presencia de una botella vacía, la banda se detiene y se apaga la señal discreta  $AB$ .

El objetivo del sistema de control es mantener el nivel del líquido en el tanque entre dos niveles preestablecidos (uno inferior  $h_1$  y otro superior  $h_2$ ) mediante el control de la válvula de llenado  $V_1$  y la válvula de descarga  $V_2$  (grifo) del tanque; la válvula de descarga  $V_2$  se activa cuando hay una botella vacía y cuando el nivel dentro del tanque es normal (que se encuentre entre las cotas inferior y superior). Este control se deberá realizar en sincronización con el movimiento de la banda transportadora y el adecuado llenado de las botellas (sin derramar líquido).

Una parte importante en el proceso de modelación de un sistema híbrido es la correcta identificación de las variables continuas y discretas que afectan al sistema.

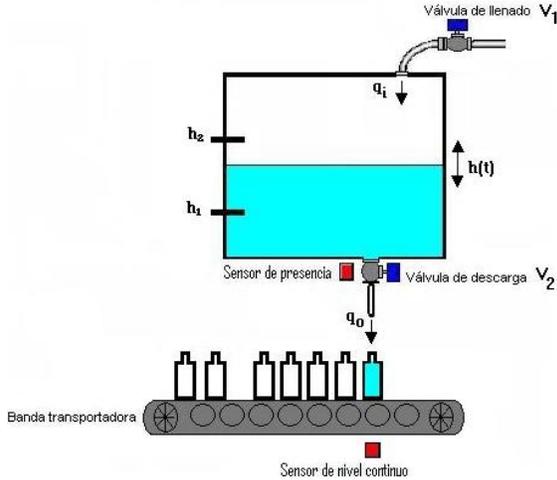


Figura 1. Sistema de tanque con banda transportadora.

Para la parte continua tenemos las siguientes variables:

- Nivel del tanque  $h$  (m).
- Flujo de entrada  $q_i$  ( $m^3/s$ ).
- Flujo de salida  $q_o$  ( $m^3/s$ ).
- Movimiento de la banda transportadora  $mb$ .
- Nivel en la botella  $h_b$  (m).

Para la parte discreta tenemos las siguientes variables:

- Estado de la válvula de llenado  $V_1$  (encendida o apagada).
- Estado de la válvula de descarga  $V_2$  (encendida o apagada).
- Cota  $h_1$ .
- Cota  $h_2$ .
- Señal  $AB$ .

Como se mencionó anteriormente la señal discreta  $AB$  está formada por la concatenación de los sensores de presencia y llenado de la botella, la cual da como resultado el movimiento de la banda transportadora.

El tanque de la Figura 1 se puede considerar como un tanque de almacenamiento con un área transversal  $A$  y altura de la columna de líquido. El líquido entra al tanque por la parte superior y sale por la parte inferior del tanque a través de válvulas, cuya resistencia al fluido es denotada por  $R$  ( $1/ms$ ). El volumen de flujo de la entrada y volumen de flujo de salida es  $q_i$  y  $q_o$  respectivamente. La densidad  $\rho$  del fluido es constante. El sistema tiene una entrada  $q_i$  y una salida  $h$ . La dinámica del sistema de nivel es representada por una ecuación diferencial simple en  $h$ , esto es:

$$\frac{dh}{dt} \rho A = \rho (q_i - q_o)$$

Ahora expresamos la variable  $q_o$  en términos del nivel  $h$ . Por simplicidad, suponemos una relación lineal y se define la resistencia de la válvula  $R$  como:

$$\rho q_o = \frac{\Delta p}{R}$$

donde  $\Delta p$  es la diferencia de presión a través de la válvula y  $\rho q_o$  es la proporción de flujo de masa de salida de la válvula. Para este caso:

$$\rho q_o = \frac{\Delta p}{R} = \frac{p_1 - p_2}{R} = \frac{\rho g h}{R}$$

Estimamos que  $P_1$  es igual a la presión hidrostática y  $P_2$  igual a la presión atmosférica  $P_a$ , entonces tenemos que:

$$p_1 = P_a + \rho g h \quad \text{y} \quad p_2 = P_a$$

Asumiendo que  $\rho A$  es constante, la ecuación se puede escribir como:

$$\rho A \frac{dh}{dt} = \rho q_i - \frac{\rho g h}{R}$$

El modelo final se obtiene eliminando  $\rho$  y reorganizando la ecuación en la forma estándar de ecuación diferencial de entrada y salida:

$$A\dot{h} + \frac{g}{R}h = q_i$$

$$\dot{h} = \frac{Rq_i - gh}{RA}$$

Ahora se considerará la dinámica del llenado de la botella. Para lograr esto se estima que el nivel en la botella está dado por:

$$\dot{h}_b = \frac{Rq_{ib}}{gA_b}$$

donde  $q_{ib}$  es el flujo de entrada de la botella y  $A_b$  es el área de la sección transversal de la botella, considerada como constante.

Dado que el flujo de entrada a la botella es variable, ya que depende del nivel en el tanque, se considera que la razón de cambio del flujo de entrada  $\dot{h}_b$  con respecto al tiempo está dado por:

$$\dot{h}_b = \frac{gh}{RA_b}$$

de esta manera, dependiendo del valor del nivel en el tanque es la velocidad con la que se llena la botella.

Para el caso del modelado de la dinámica de la banda transportadora, se considera que su movimiento es constante y que se detiene cada vez que se detecta una botella vacía. Para representar el tiempo en que se mantiene encendida la banda transportadora, se define  $y$  como un reloj para medir el tiempo transcurrido antes de que llegue una botella. El tiempo en el que se presenta una botella está dado por la velocidad de la banda transportadora y la separación entre cada botella.

En cuanto a la parte discreta del sistema de llenado de botellas, se definen cuatro estados discretos. El estado  $S_1$  se define para indicar que el nivel en el tanque es bajo  $h \leq h_1$ . El estado  $S_2$  indica que el nivel en el tanque se encuentra en el nivel normal  $h_1 < h < h_2$ . El estado  $S_3$  indica un nivel alto en el tanque  $h > h_2$ . Un cuarto estado  $S_4$  indica que no hay actividad dinámica en el tanque  $h = cte$  y  $h_1 < h < h_2$ .

La razón para considerar estos cuatro estados discretos radica en que en cada uno de ellos, la evolución dinámica del nivel  $h$  es diferente por lo

que deberá ser considerado esto en el modelo del autómata híbrido del sistema.

Para representar el llenado de las botellas se consideran dos estados discretos. El estado  $S_1$  indica que no se está realizando la acción de llenado de la botella y por lo tanto el sensor  $b_2$  estará apagado. El estado  $S_2$  representa la dinámica de llenado de la botella durante el llenado y el sensor  $b_2$  se enciende cuando se llena la botella.

La presencia de las botellas se modela mediante dos estados discretos. El estado  $S_1$  indica cuando la banda transportadora está en movimiento y por lo tanto éste sensor ( $b_1$ ) estará apagado. El estado  $S_2$  representa la presencia de una botella, lo que significa que el sensor  $b_1$  estará encendido y la banda transportadora se detiene.

Para asegurar que el nivel se mantenga entre las cotas  $h_1$  y  $h_2$ , y el llenado de las botellas se realice en forma adecuada considerando la señal  $AB$ , se toman diferentes acciones de control dentro de los estados discretos (nodos).

En el nodo  $S_1$  se toman acciones discretas sobre los actuadores de las válvulas de llenado  $V_1$  y de descarga  $V_2$ . En este nodo debido a que el sensor de presencia de las botellas no se encuentra activado, la válvula de llenado está abierta y la de descarga cerrada, lo cual afecta la dinámica continua en el nodo, ya que se cancela el flujo de salida del tanque  $q_o$ . Esto se realiza con la finalidad de que el tanque alcance un nivel por arriba de  $h_1$ .

En el nodo  $S_2$ , como se tiene la presencia de una botella y para que el nivel se mantenga por encima de la cota  $h_1$ , ambas válvulas  $V_1$  y  $V_2$  se abrirán. Nótese que aquí también se considera una dinámica continua diferente.

En el nodo  $S_3$ , debido a que en este estado discreto el nivel del tanque es  $h > h_2$ , se mantendrá cerrada la válvula de llenado  $V_1$  del tanque y solamente se abrirá la válvula de descarga  $V_2$  cuando se detecte la presencia de una botella.

En el nodo  $S_4$  se considera que el tanque se encuentra en un nivel normal o alto y no se ha detectado ninguna botella por lo que ambas válvulas,  $V_1$  y  $V_2$ , estarán cerradas.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Integración del sistema mediante el modelo del autómata híbrido

Considere el modelo del autómata híbrido que representa el comportamiento del sensor de llenado de la botella  $b_2$  (Figura 2) definido por:

$$H = \{X, S, flujo, E, F, \Sigma, init\}$$

donde:

$$X = \{h_b\}, S = \{s_1, s_2\}, \Sigma = \{h_1\}, E = \{T_1, T_2\},$$

$$F = \{F(T_1), F(T_2)\}, init = \{h = 0\}$$

y ecuaciones de flujo:

$$flujo(s_1) \rightarrow \dot{h}_b = \frac{gh}{RA_b}$$

$$flujo(s_2) \rightarrow \dot{h}_b = 0$$

El área de la sección transversal de la botella es  $A_b = 0.0266m^2$ . La velocidad de la banda transportadora es de  $6m/min$  y la separación entre las botellas es  $0.08m$ .

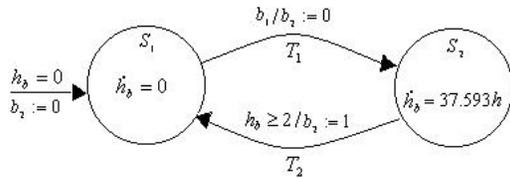


Figura 2. Modelo del autómata híbrido que representa el llenado de las botellas.

Considere el modelo del autómata temporizado que representa el comportamiento del sensor de presencia de la botella  $b_1$  (Figura 3), definido como:

$$H = \{X, S, flujo, E, F, \Sigma, init\}$$

donde:

$$X = \{y\}, S = \{s_1, s_2\}, \Sigma = \{b_2\}, E = \{T_1, T_2\},$$

$$F = \{F(T_1), F(T_2)\}.$$

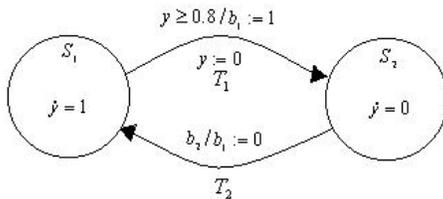


Figura 3. Modelo del autómata temporizado que representa la presencia de las botellas.

Considere el modelo del autómata híbrido del sistema de llenado de botellas, definido por:

$$H = \{X, S, flujo, E, F, \Sigma, init\}$$

donde:

$$X = \{h\}, S = \{s_1, s_2, s_3, s_4\}, \Sigma = \{AB\},$$

$$E = \{T_1, \dots, T_8\}, F = \{F(T_1), \dots, F(T_8)\},$$

$$init = \{h = h_0\}.$$

Las ecuaciones de flujo se definen como:

$$flujo(s_1) \rightarrow \dot{h} = \frac{q_i}{A}$$

$$flujo(s_2) \rightarrow \dot{h} = \frac{Rq_i - gh}{KA}$$

$$flujo(s_3) \rightarrow \dot{h} = -\frac{gh}{RA}$$

$$flujo(s_4) \rightarrow \dot{h} = 0$$

Basados en el análisis del sistema para cada estado, obtenemos el modelo del autómata híbrido para el sistema de llenado de botellas (Figura 4), para el cual, si tiene una alimentación continua de botellas garantizará la existencia de un ciclo límite para cualquier punto dentro de una región inicial definida.

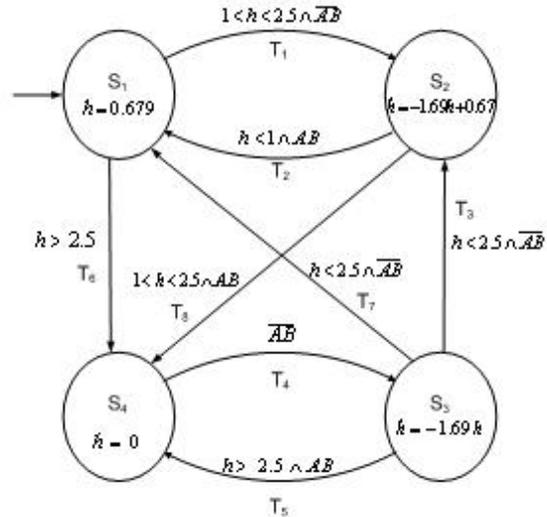


Figura 4. Autómata híbrido del sistema de llenado de botellas.

Los autómatas definidos anteriormente trabajan en forma paralela y están relacionados entre sí por etiquetas, y por medio de ellas se autoriza o prohíbe la ejecución de las transiciones.

### Simulación del modelo híbrido

Para llevar a cabo la simulación se utilizó el programa Model Vision Studium (Inihov et al., 1997). Se realiza la simulación suponiendo las condiciones iniciales de  $h_0 = 0$  y la banda transportadora en movimiento continuo, lo que significa que no hay botella o está llena ( $AB$ ). Dependiendo de la velocidad de la banda  $mb$  y la separación entre las botellas nos queda un tiempo de 0.8 segundos para detectar la presencia de una botella ( $\overline{AB}$ ) y dependiendo del nivel en el tanque será el tiempo que tarde en llenarse botella. A partir

de esto la alimentación de botellas es continua. La gráfica obtenida de esta simulación se muestra en la Figura 5.

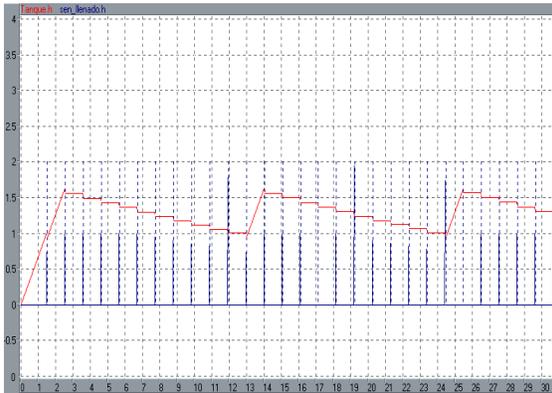


Figura 5. Comportamiento del nivel en el tanque y la botella para  $h_0 = 0$ .

Se puede observar en la Figura 5 como el comportamiento del sistema híbrido tiende a una estructura cíclica. La variación del nivel se efectúa un rango muy pequeño, lo cual significa que siempre se estará conmutando entre la región de nivel bajo y la normal después de un cierto tiempo. Esto se puede solucionar aumentando la referencia del nivel.

**Síntesis del diagrama de escalera**

En el ámbito industrial, los controladores lógicos programables son programados utilizando un lenguaje de bajo nivel como los diagrama de escalera, resultando en programas largos y difíciles de manejar. Todo el diseño es basado en la experiencia y la verificación es típicamente realizada solamente a través de experimentos o simulación (Peng y Zhou, 2004).

La programación en diagrama de escalera es una ventaja debido a la naturaleza gráfica de su representación, ya que facilita la visualización de las funciones o relaciones entre los diferentes elementos de un proceso. Sin embargo, es difícil examinar la correcta operación del sistema y de las especificaciones de diseño a partir de los diagrama de escalera. Por esto, la veracidad de los diagrama de escalera es difícil de entender y verificar, lo que también causa una falta de flexibilidad requerida por los sistemas de control industriales.

Por lo anterior se utilizó el modelo de autómatas híbridos para modelar el sistema de llenado de botellas y se sintetizará su diagrama de escalera. Las variables utilizadas para realizar la programación en el PLC se muestran en la Tabla 1.

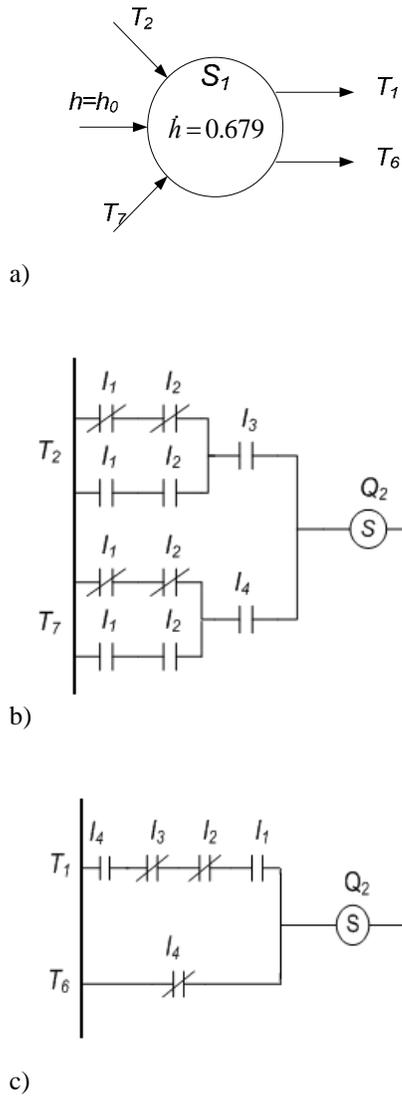
Tabla 1. Asignación de entradas y salidas del PLC.

Variable	Descripción
$I_1$	Sensor que detecta la presencia de la botella ( $b_1$ )
$I_2$	Sensor que detecta el nivel en la botella ( $b_2$ )
$I_3$	Nivel inferior del tanque
$I_4$	Nivel superior en el tanque
$Q_1$	Banda transportadora
$Q_2$	Válvula de llenado del tanque
$Q_3$	Válvula de llenado de botella

Basándonos en el modelo híbrido del sistema obtenido con anterioridad (Figura 4), se procede a la síntesis del modelo a diagrama de escalera.

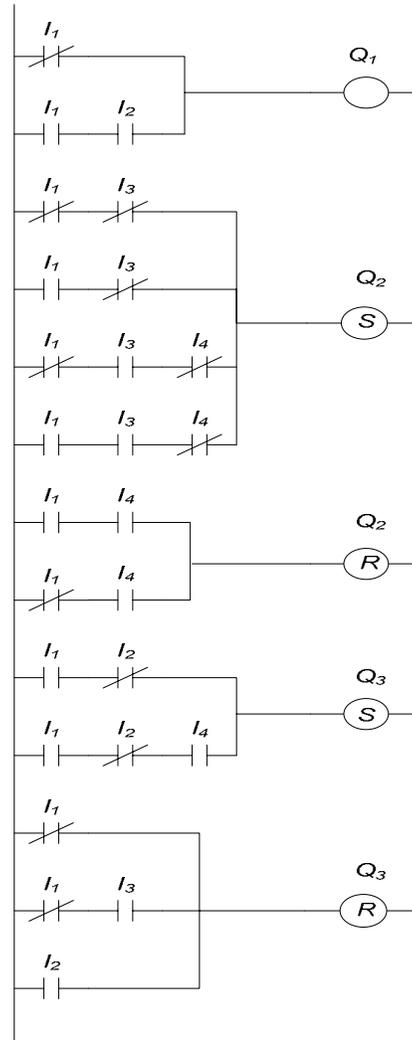
En el estado  $S_1$  se toman acciones sobre los actuadores de las válvulas de llenado del tanque  $Q_2$  y de llenado de botella  $Q_3$ . En este estado debido a que el sensor de presencia de las botellas no se encuentra activado ( $\bar{I}_1$ ), la válvula de llenado del tanque está abierta ( $Q_2$ ) y la de llenado de botellas cerrada ( $\bar{Q}_3$ ), lo cual afecta la dinámica continua en el nodo, ya que se cancela el flujo de salida del tanque  $q_0$ . Esto se realiza con la finalidad de que el tanque alcance un nivel por arriba de  $h_1$ .

En la Figura 7 se muestra la síntesis del estado  $S_1$  a diagrama de escalera, el cual representa la dinámica del flujo de llenado del tanque. En la Figura 7a) se muestra el estado  $S_1$  con sus transiciones de entrada y salida, en la Figura 7b) se muestran las transiciones de entrada, las cuales activan la válvula de llenado del tanque, en la Figura 7c) se presentan las transiciones de salida. La transición  $T_2$  está dada por  $\dot{h} < I_3 \wedge [(I_1 \bar{I}_2) \vee (I_1 \bar{I}_2)]$  donde  $I_3$  esta presente, lo que quiere decir que el nivel del tanque está por debajo de la cota inferior y la banda transportadora esta en movimiento por qué no ha detectado botella o porque hay una botella pero está llena, la transición  $T_7$  es la misma dinámica solo que el nivel del tanque es menor que la cota superior  $I_4=1$ . Para la condición de salida  $T_1$  se debe cumplir que  $I_3 < \dot{h} < I_4 \wedge (I_1 \bar{I}_2)$ , esto es que el nivel del tanque este entre las cotas inferior ( $I_3$ ) y superior ( $\bar{I}_4$ ) y la banda transportadora se detiene porque se detectó una botella vacía ( $I_1 = 1 \wedge I_2 = 0$ ). La transición  $T_6$  indica que el nivel del tanque está por encima de la cota superior, lo que quiere decir que el sensor  $I_4$  esta desactivado. Se sigue la misma metodología para realizar la síntesis de los demás estados.



**Figura 7.** Síntesis del diagrama de escalera para el estado  $S_1$ .

En la Figura 8 se presenta el diagrama de escalera completo para el sistema de llenado de botellas, la letra S (set) es para la activación de las válvulas y R (reset) es para desactivar las válvulas.

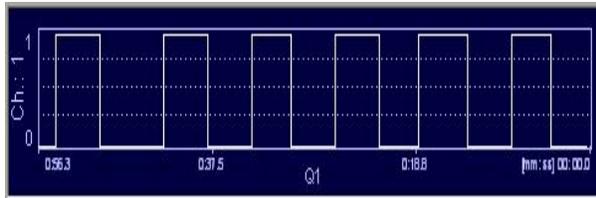


**Figura 8.** Diagrama de escalera completo para el sistema de llenado de botellas.

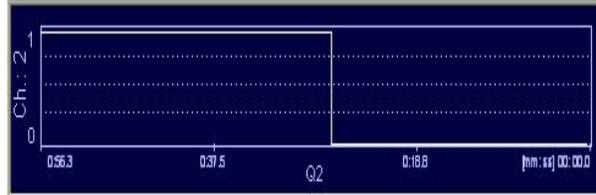
**Simulación del diagrama de escalera**

Para la programación y simulación del diagrama de escalera utilizaremos el Software PicoSoft 6.0; este programa es de uso intuitivo con el cual se puede crear, simular, y descargar el programa directo de la PC al controlador.

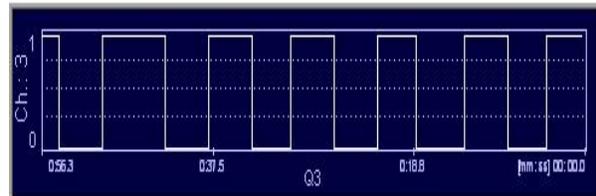
Utilizando el diagrama de escalera obtenido anteriormente, se codifica y se simula. Proponiendo como condición inicial  $h_0=0$ , el tanque esta vacío, la banda transportadora esta en movimiento continuo y no se tiene una botella presente o está llena. La Figura 9 muestra el comportamiento del sistema cuando el nivel está entre la cota superior y la inferior.



a)



b)



c)

**Figura 9.** Comportamiento sistema para el nivel entre  $1 < h < 2.5$ .

En la Figura 9a) se representa el movimiento de la banda transportadora el cual está ligado al llenado de botellas, en la Figura 9b) el nivel en el tanque se incrementa hasta llegar a la cota superior y se cierra la válvula, la cual permanece apagada hasta que el nivel sea por debajo de la cota inferior y se vuelve a encender, y en la Figura 9c), cuando la banda está detenida por que ha detectado una botella vacía se acciona la válvula de llenado de botellas.

### CONCLUSIONES

El modelo del autómata híbrido es una ponderosa y efectiva herramienta para representar sistemas con comportamientos discretos y continuos. Puede utilizarse para sistemas industriales muy complejos, reduciendo su complejidad, bajando costos y haciendo eficiente el sistema.

Debido a la simplicidad de programación de los controladores lógicos programables (PLC's) por medio del diagrama de escalera, el modelo del controlador híbrido obtenido se puede implementar con relativa facilidad. Con este trabajo se pretende desarrollar controladores que tomen en cuenta las características continuas y discretas de los procesos, así como asegurar su adecuado funcionamiento y estabilidad ante cambios inesperados.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antsaklis, P.J., Nerode, A. (1998) "Hybrid control systems: An introductory discussion to the special issue". Automatic control, IEEE transactions on. volume 43, pp.457 - 460.
- Favela, A., (1999). "Modelisation et analyse du comportement dynamique des systemes hybrides: une approach base sur le modele d'automate hybride". Thèse de Doctorat de l'INPG. Grenoble, France.
- Lemmon, M., He, K., Markovsky, I. (1991) "Supervisory hybrid systems". IEEE Control Systems.
- Peng, S., Zhou, M. (2004). "Ladder diagram and Petri-net-based discrete-event control design methods". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics.
- Stiver, J. A., Antsaklis, P. J., (1992). "Modeling and analysis of hybrid control systems". Decision and Control, Proceedings of the 31<sup>st</sup> IEE conference on. volume: 4, pp.3748-3751.
- Inihov, D., Kolesov, Y.B., Senichenkov, Y. (1997). "Model Vision Studium Standard version 3.0.17", *Experimental Object Technologies (XJ)*, St.-Petersburg State Technical University.

Este documento se debe citar como:

Cruz Jiménez, B., Avilés Viñas, J., Lara Caballero, E. (2009). **Diseño de un controlador basado en el modelo del autómata híbrido.** Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 13-2, pp. 5-12, ISSN: 1665-529X