Sincronización de sistemas activos en procesos de clasificación de objetos por tamaño

Synchronization of active systems in object classification processes by size

RODRÍGUEZ-FRANCO, Martín Eduardo†*, DE LIRA-DELGADO, Gabriel, MARTÍNEZ-ROMERO, Adrián y JARA-RUIZ, Ricardo

Uniersidad Tecnológica del Norte de Aguascalientes. Av. Universidad #1001, Estación Rincón, 20400, Rincón de Romos, Ags.

ID 1^{er} Autor: *Martín Eduardo, Rodríguez-Franco* / ORC ID: 0000-0002-6804-4777, Researcher ID Thomson: T-1539-2018, CVU CONACYT ID: 660892

ID 1^{er} Coautor: *Gabriel, De Lira-Delgado* / ORC ID: 0000-0002-5290-2757, Open ID: 108831518329635561083, CVU CONACYT ID: 1005142

ID 2^{do} Coautor: *Adrián, Martínez-Romero* / ORC ID: 0000-0002-1310-1287, Open ID: 114501414588597884047, CVU CONACYT ID: 1005146

ID 3^{er} Coautor: *Ricardo, Jara-Ruiz* / ORC ID: 0000-0001-7725-4138, Researcher ID Thomson: T-1532-2018, CVU CONACYT ID: 630276

DOI: 10.35429/JTIP.2019.6.3.23.32

Recibido 03 de Enero, 2019; Aceptado 30 Marzo, 2019

Resumen

En este trabajo se realiza un estudio de sistemas de control en eventos discretos mediante su representación a través de máquinas de estados finitos, con la particularidad de ser aplicado en la gestión de un prototipo que ha sido desarrollado para el desempeño de las tareas de manejo y clasificación de objetos por tamaño. El presente análisis otorga continuidad a un trabajo previo, en el cual se aborda la teoría de autómatas totalmente basada en el formalismo matemático para su utilización en el control de un proceso de manejo de materiales, cuyos elementos activos son un robot en configuración angular y una banda transportadora. Por tanto, se describe la adición, al sistema de prueba, de los sensores que permitan el discernimiento de cada pieza ingresada a este proceso, de los algoritmos de programación propios que lleven a cumplir con la tarea establecida, así como de la interfaz gráfica para la gestión y presentación de la condición del proceso, a través de una computadora. Los resultados constatan el adecuado funcionamiento de los elementos activos empleados, así como su apropiada sincronización en el aseguramiento de la tarea de clasificación de objetos propuesta, bajo el análisis de la característica de tamaño.

Sincronización, Clasificación por tamaño, Máquina de estados finitos

Abstract

In this work, a study of control systems in discrete events is carried out through their representation using finite state machines, with the particularity of being applied in the management of a prototype that has been developed to performance tasks like handling and object classification by size. The present analysis gives continuity to a previous work, in which automaton theory totally based on mathematical formalism is approached, for its use in the control of a material handling process, whose active elements are a robot in angular configuration and a conveyor belt. Therefore, it is described the addition, to the test system, of sensors that allow the discernment of each piece entered into this process, of the own programming algorithms that lead to fulfill the established task, as well as of the graphic interface for management and presentation of process condition, through a computer. Results confirm the proper functioning of active elements used, as well as their appropriate synchronization in the assurance of the proposed object classification task, under analysis of the size characteristic.

Synchronization, Size classification, finite state machine

Citación: RODRÍGUEZ-FRANCO, Martín Eduardo, DE LIRA-DELGADO, Gabriel, MARTÍNEZ-ROMERO, Adrián y JARA-RUIZ, Ricardo. Sincronización de sistemas activos en procesos de clasificación de objetos por tamaño. Revista de Tecnologías en Procesos Industriales. 2019. 3-6: 23-32

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

La aplicación de métodos formales para la representación de control de procesos ha sido una insipiente necesidad, especialmente, en aquellos donde la sincronización de sistemas activos es determinante para la adecuada consecución y cumplimiento de una tarea (Liu, Yang, Wu, & Hu, 2012) (Behandish, Nelaturi, & De Kleer, 2018), como es: el manejo (Fitouhi, Nourelfath, & Gershwin, 2017) o clasificación de materiales (Kim & Kim, 2015). Cada vez más investigaciones son orientadas a analizar el fundamento matemático o lógico (Schneider, Peßler, & Terkaj, 2019) que permita establecer relaciones de funcionamiento mutuo entre sistemas independientes (Feldmann, Legat, & Vogel-Heuser, 2015), llegando a desarrollar metodologías que van desde la aplicación de la lógica combinatorial hasta la constitución de complejos sistemas distribuidos (Greenlaw & Hoover, 1998).

El estudio de la teoría de autómatas ha llevado a la deducción de modelos de sistemas en eventos discretos para la representación del comportamiento de un proceso susceptible a ser controlado, así como de las especificaciones que habrán de cumplirse en el mismo (Fouquet & Provost, 2017). A su vez, el uso de técnicas para la representación de este tipo de sistemas por medio de grafos han mostrado su efectividad en la exploración de las relaciones entre los elementos implicados dentro de un proceso industrial (Endsley, Almeida, & Tilbury, 2006) (Riera, Coupat, Philippot, Annebique, & Gellot, 2014); además, de resultar de suma utilidad y baja complejidad para su posterior traducción a reglas de control que pueden ser programadas en un controlador que funja como cerebro del proceso, llevado a su integración física, a partir del uso de un lenguaje conocido (Pichard, Rabah, Carre-Menetrier, & Riera, 2016).

Tal es el caso de las máquinas de estados finitos, cuya concepción original fue el tratamiento de problemas computacionales, sin embargo, con el avance de la tecnología en materia de sistemas embebidos, su aplicación ha sido orientada al control de hardware (Kaszubowski Lopes, Rosso, Leal, Harbs, & Hounsell, 2012). Tal situación ha propiciado aprovechar las bondades de la coordinación entre software y hardware para la gestión de un proceso físico desde medios virtuales (Ulyantsev & Tsarev, 2012).

Una característica de estos métodos formales en la representación y el diseño de control es la escalabilidad; misma que no habrá de limitar el desarrollo de un algoritmo computacional al cumplimiento de una tarea específica, si no que a partir de un análisis de las necesidades del proceso, permitirá extender su aplicación para adaptarse al mismo (Feldmann, Legat, & Vogel-Heuser, 2015), como se plantea en el presente trabajo.

Antecedentes

En el ámbito de educación superior tecnológica, la integración de prototipos para desarrollo de pruebas o experimentación, por parte de los alumnos, ha significado la oportunidad de extender los conocimientos teóricos abordados y aplicarlos de forma práctica sobre un sistema de estudio, el cual no necesariamente habrá de tratarse de un equipo industrial; especialmente en caso de no disponer de éste. Esfuerzos conjuntos de profesores y alumnos han permitido establecer medios alternos para no prescindir de conocimientos tan necesarios en el ejercicio profesional de los futuros ingenieros, pese a las limitaciones de sus respectivos centros educativos.

Un año atrás se comenzó a analizar la necesidad de equipamiento en los planteles para el desarrollo de competencias profesionales en el alumno del programa educativo de TSU en Mecatrónica área Sistemas de Manufactura Flexible, en asignaturas tan vitales para su formación como Robótica. A través de lo cual, pudo constituirse un primer prototipo que conjuntó un gran número de áreas relacionadas, bajo las características de pertinencia hacia los temas valorados, simple construcción, fácil manejo para el usuario y ser desarrollado con materiales de bajo costo. Además, de acceder al análisis a profundidad de esta aplicación mecatrónica, si se involucraba al alumno desde el inicio de su desarrollo hasta su operación final.

Es así, que el presente trabajo expone la continuidad dada sobre la operación y la función del robot analizado, y su integración a un proceso simple que combina las funciones de manejo y clasificación de materiales. Para lo cual, el robot formó parte de una distribución física que también incluyó a una banda transportadora y a un sistema de percepción que admitiera la gestión de las piezas ingresadas.

La tarea de clasificación de objetos se realizó bajo la identificación de la característica de tamaño. Cabe mencionar, que la sincronización en el funcionamiento de los dispositivos emplea la metodología de máquina de estados finitos para la definición y la programación de las funciones del proceso, además, de seguir realizando la gestión del mismo desde una interfaz gráfica desarrollada en el software LabVIEW.

Descripción del prototipo para prueba

De forma previa a la implementación de sistema de clasificación de objetos por tamaño desarrollado para el presente trabajo, se contaba con un prototipo para pruebas, conformado por un robot en configuración angular y una banda transportadora, constituido para el análisis de la sincronización entre estos sistemas como parte de un proceso de manejo de materiales. Sin embargo, para la adición de la operación de clasificación propuesta, al prototipo le fue agregada una sección para la inspección de cada objeto ingresado al mismo, localizada sobre el segundo extremo de la banda transportadora. Las piezas analizadas son cubos cuyas dimensiones son 3x3x3 cm como pieza pequeña y de 5x5x5 cm como pieza grande, las cuales son abastecidas manualmente al proceso. Cabe mencionar, que el prototipo originalmente integrado contaba con un área de abastecimiento de material y otra más para su desabastecimiento, ambas contempladas dentro del espacio de trabajo del robot. Por lo cual, para esta aplicación, se requirió disponer de secciones para el confinamiento del material procesado, dado el resultado de la clasificación respectiva, siendo necesario realizar una modificación para que el área de desabastecimiento tuviera la capacidad de almacenar las dos clases de objetos posibles, cada una en un lugar específico. Tal distribución del prototipo se muestra en la figura 1.

Figura 1 Distribución del prototipo. Fuente (Elaboración propia, 2019)

Análisis de las señales del proceso

En el proceso descrito interactúan señales de entrada y de salida. Las primeras proceden de botones y de sensores de tipo infrarrojo o ultrasónico; las otras son acciones o estados que el sistema de gestión indica, deban asumir los sistemas activos después del análisis de las entradas respectivas, y que son identificables en las consignas enviadas a cada actuador empleado (Fouquet & Provost, 2017), es decir, los servomotores que activan a las articulaciones del robot y el gripper, y el motor de corriente directa que dicta la acción de la banda transportadora. Dichas señales de entrada y salida son descritas a detalle en las tablas 1 y 2, respectivamente.

Identificador	Señal	Sistema
PB0	Encendido del sistema.	Sistema general.
ZS0	Sensor de abastecimiento.	Sistema general.
ZS1	Sensor de extremo 1.	Banda transportadora.
ZS2	Sensor de extremo 2.	Banda transportadora.
X0dn	En posición de reposo.	Robot.
X1dn	En posición de extremo 1 de la banda.	Robot.
X2dn	En posición de extremo 2 de la banda.	Robot.
X3dn	En posición de almacenamiento clase 1 (Pequeño).	Robot.
X4dn	En posición de almacenamiento clase 1 (Grande).	Robot.
Gcldn	Gripper cerrado.	Gripper.
Gopdn	Gripper abierto.	Gripper.
C1	Identificación de clase 1.	Inspección.
C2	Identificación de clase 2.	Inspección.
TM0dn	Tiempo para identificación concluido.	Inspección.

Tabla 1 Señales de entrada del proceso Fuente (Elaboración propia, 2019)

Identificador	Señal	Sistema
X0	A posición de reposo.	Robot.
X1	A posición de abastecimiento.	Robot.
X2	A posición de extremo 1 de la banda.	Robot.
X3	A posición de reposo	Robot.
X4	A posición de extremo 2 de la banda.	Robot.
X5	A posición de almacenamiento clase 1 (pieza chica).	Robot.
X6	A posición de almacenamiento clase 2 (pieza grande).	Robot.
X7	A posición de reposo.	Robot.
X8	A posición de reposo.	Robot.
Gcl	Cerrar gripper.	Gripper.
Gop	Abrir gripper.	Gripper.
MT	Activar motor.	Banda transportadora.
TM0	Activar temporizador.	Sistema general.

Tabla 2 Señales de salida del proceso.
Fuente (Elaboración propia, 2019)

Funcionamiento del sensor ultrasónico

El sensor de tipo ultrasónico (figura 2) es empleado en sistemas de medición no invasivos, al establecer la distancia entre el emisor y un objeto dado, sin requerir contacto alguno. Por su efectividad, la técnica piezoeléctrica es la más difundida para la generación de una señal ultrasónica; en la cual, se emplea un material piezoeléctrico que es excitado al aplicársele un voltaje, lo que a su vez, genera su deformación y la emisión de una onda mecánica de frecuencia no audible por el oído humano.

El principio de operación de este tipo de sensor consiste en la emisión de una onda cíclica de alta frecuencia y corta duración que se propaga en el medio; de encontrarse un objeto a su paso, tal onda es reflejada, regresando en forma de eco al receptor, incorporado en el mismo sensor.

Figura 2 Sensor ultrasónico HY-SRF05
Fuente (www.mercadolibre.com, 2019)

Los modos de operación habituales para tal sensor son: reflexión y medición de distancia. El primero otorga al sensor un funcionamiento aproximado a un sensor de presencia emitiendo un cambio de estado al detectar un objeto, dado un umbral. El segundo permite caracterizar la distancia entre el emisor y un objeto, líquido o superficie. Una etapa de acondicionamiento habrá de establecer el periodo transcurrido entre la emisión de la señal y la recepción del eco, y a partir de éste, la distancia respectiva, que puede estar entre 20 mm y 10 m. (Corona Ramírez, Abarca Jiménez, & Mares Carreño, 2014).

Definición de la secuencia del proceso

Tomando en cuenta las señales de entrada y salida establecidas con anterioridad, se puede proponer la secuencia que tendrá el proceso dado. Primeramente, ha de considerarse que al encender el sistema el robot habrá de permanecer en una posición inicial o HOME, la cual representa el reposo de este cuando su acción no sea requerida; también la banda transportadora deberá estar detenida. El proceso inicia cuando el sistema general, además de estar encendido y no contar con ninguna interrupción en lugares intermedios o finales, detecta una pieza en el área de abastecimiento. Así, el robot inicia una trayectoria desde su posición inicial hasta donde se encuentra el objeto, el cual toma con el gripper y conduce al primer extremo de la banda.

En ese lugar, un sensor infrarrojo detecta al elemento, encendiéndose el motor de la banda transportadora para llevarlo hasta el otro extremo. Mientras la banda transportadora realiza esta acción, el robot mantiene su posición de reposo con el objetivo de no interrumpir las tareas de los demás sistemas activos.

Cuando el sensor infrarrojo del extremo final de la banda transportadora detecta a la pieza, se detiene el motor y se inicia un ciclo de temporización en cual el sensor de proximidad, dispuesto justo sobre el objeto, comienza a medir la distancia hasta el mismo, deduciendo de esta manera su tamaño: pequeño o grande. Hasta este momento el robot sigue en su posición de reposo.

Una vez sensado el tamaño de la pieza, el brazo robótico se mueve desde su posición inicial hasta el extremo final de la banda, toma el objeto, y lo conduce hasta la posición de almacenamiento que el sistema haya decidido sea la correcta, a partir del tamaño detectado, liberándolo en el área respectiva. Por último, el robot regresa a su posición de reposo, donde espera el arribo de otra pieza en abastecimiento, para reiniciar la secuencia del proceso. Ha de decirse, que existe la posibilidad de detener el proceso en cualquier porción de la secuencia, y si después de esto se desea restablecer el funcionamiento, éste iniciara desde el primer estado, es decir, esperará a que se detecte un nuevo elemento en el área de abastecimiento.

Modelo para la sincronización de sistemas

La teoría de sistemas de control en eventos discretos sugiere el uso de máquinas de estados finitos para el modelado de procesos cuando se requieren definir secuencias operacionales de máquinas o equipos, a partir de eventos espontáneos que suceden en el mismo. De esta manera, se emplea un lenguaje para describir el comportamiento en eventos discretos, el cual se constituye a partir de la propuesta de un alfabeto finito asociado a las tareas del sistema; además, de poder ser interpretado adecuadamente para su procesamiento por medio de una computadora (Lucas-Silva, Ribeiro, & Teixeira, 2017).

Una máquina de estados finitos (FSM, *finite-state machine*) define un conjunto de estados, una función de transición y una función de activación (Ulyantsev & Tsarev, 2012). En una máquina de estados finitos controlada por eventos, éstos se especifican dentro de un alfabeto, y cada transición define un evento que la activa. Cuando tal evento ocurre, la transición se dispara inmediatamente y el modelo cambia de un estado a otro, según la secuencia propuesta por el proceso (Jamhour & Garcia, 2012). Una transición puede estar vinculada a una función booleana compuesta por varias señales, llamada condición.

Según la ecuación (1), una máquina de estados finitos se define como una séxtupla (Schmidt, 2012) (Fouquet & Provost, 2017).

$$(Q, q_0, S, \Delta, M, X) \quad (1)$$

Donde Q es un conjunto de estados finitos, q_0 es un conjunto de estados iniciales, por tanto, $q_0 \subset Q$, S es un conjunto de señales booleanas, y Δ es un conjunto de transiciones, cada transición está definida por la ecuación (2).

$$\delta = (q_{Src}, \delta_{Cond}, q_{Dest}) \quad (2)$$

Con q_{Src} un único estado en Q , δ_{Cond} es una condición de disparo, es decir, una función booleana en S , y q_{Dest} es un estado único en Q . M es un conjunto de estado marcados, tales que $M \subseteq Q$, y X es un conjunto de estados prohibidos, donde $X \subset Q$. Además, una máquina de estados finitos deberá satisfacer la propiedad dada por la ecuación (3).

$$\delta \in \Delta : q_{Src}(\delta) \neq q_{Dest}(\delta) \quad (3)$$

La ecuación (3) representa un autociclo, el cual para una valoración de señales dada, si no es posible activar una transición saliente, el estado se mantiene activo. En casos donde se manejan múltiples señales que forman autociclos, estos no se representan gráficamente en la máquina de estados.

Las reglas de evolución de una máquina de estados finitos (Fouquet & Provost, 2017), son:

1. En la inicialización, todos los estados iniciales están activos. Todos los otros estados están inactivos.
2. Una transición es habilitada cuando su estado fuente es activado. Una transición es disparada cuando la misma es habilitada y cuando su condición de transición es verdadera. Una transición disparada debe ser inmediatamente disparada.
3. Disparar una transición provoca simultáneamente la desactivación de su estado fuente y la activación de su estado de destino.
4. Cuando varias transiciones son simultáneamente disparables, estas pueden ser simultáneamente disparadas.

- RODRÍGUEZ-FRANCO, Martín Eduardo, DE LIRA-DELGADO, Gabriel, MARTÍNEZ-ROMERO, Adrián y JARA-RUIZ, Ricardo. Sincronización de sistemas activos en procesos de clasificación de objetos por tamaño. *Revista de Tecnologías en Procesos Industriales*. 2019

Esta entidad es encargada de analizar y de reaccionar a los datos provenientes de las tarjetas controladoras. Se trata de un instrumento virtual desarrollado a partir del software LabVIEW, y las partes de las que está compuesto el panel frontal son las mostradas en la figura 5.

Figura 5 Interfaz para control y monitoreo de proceso
Fuente (Elaboración propia, 2019)

El panel frontal está conformado por diferentes secciones, que se pueden distinguir a través de la asignación de una letra respectiva:

- A. *Canal 1*. Representa la información que el controlador del proceso emitirá como salida para la activación de los sistemas activos.
- B. *Canal 2*. Es la representación del estado de los elementos de entrada del proceso, es decir, los sensores. Por lo cual, realiza un monitoreo en tiempo real de las señales de la tarjeta 1.
- C. *Posición deseada*. Indica la posición en la que idóneamente se encuentran las articulaciones del robot en todo momento, incluyendo además aquella que corresponde al gripper.
- D. *Etapa y Estatus*. Indica mediante letras ordenadas alfabéticamente, la etapa en la cual se encuentra la secuencia del proceso. Además, muestra el estado del gripper, es decir abierto o cerrado.
- E. *Estado del proceso y estado del gripper*. Muestra un nombre determinado para cada uno de los estados de la secuencia del proceso. También presenta la transición entre estados del gripper, por ejemplo, cuando se está abriendo o cerrando.

- F. *Posición obtenida*. Señala los valores de las variables articulares reales del robot. Esta posición debe coincidir con la mostrada en el punto C, para corroborar el correcto funcionamiento de este sistema activo.

La interfaz gráfica también se ocupa de la generación de trayectorias entre los distintos puntos del proceso. A partir de esta función, el usuario podrá controlar las posiciones dadas, al indicar los valores que habrán de adquirir las variables articulares para llevar al robot a su destino. Sin embargo, se toman en cuenta posibles obstáculos que pudieran ocasionar colisiones, en este caso, los distintos elementos con los que interactúa el robot, por lo que, es posible guiarlo por tres puntos intermedios antes de alcanzar cada punto deseado.

Resultados de operación del sistema

La adaptación de una sección de inspección para la clasificación de objetos por tamaño, a un proceso cuyo objetivo previo era el transporte y posicionamiento de objetos arrojó resultados adecuados de funcionalidad, tanto en el desempeño de las tareas de cada sistema activo empleado, la sincronización de estos para el cumplimiento del objetivo del proceso, así como en la gestión del mismo a través de la interfaz gráfica de usuario desarrollada.

La interfaz gráfica proporcionó de manera organizada la información esperada en relación con la situación actual y el desarrollo del proceso, de acuerdo a la serie de instrucciones programadas; coincidiendo dichos datos con la manifestación real de estado de los sistemas activos del prototipo. Asimismo, a partir de la sincronización en las funciones de cada sistema activo, la cual fue representada por la máquina de estados finitos deducida (figura 3), se aseguró la correcta ejecución de la secuencia en el proceso propuesto; determinado lucidamente la transición efectiva detonada por la activación de las respectivas señales de entrada o combinación de estas. Las siguientes figuras detallan el comportamiento generado en cada operación realizada sobre el prototipo.

La figura 6 corresponde a la posición de HOME adquirida por el brazo robótico una vez que éste fue energizado, permaneciendo en tal condición, en espera de las instrucciones para iniciar el proceso de manejo de materiales.

Posteriormente, el movimiento que ha tenido el brazo robótico, una vez iniciado el proceso y que ha sido detectado un objeto en el área de abastecimiento, se reporta en la figura 7. El robot se dirige a esta área para hacer el proceso de sujeción de dicho objeto mediante la pinza.

Figura 6 Robot en posición de HOME.
Fuente (Elaboración propia, 2019)

Figura 7 Robot en abastecimiento.
Fuente (Elaboración propia, 2019)

Continuando con la secuencia dada, en la figura 8 se visualiza el movimiento en el robot después de haber tomado la pieza del área de abastecimiento; dirigiendo a la misma hacia el extremo inicial de la banda transportadora. Una vez que la pinza suelte el objeto en este último punto, la banda se activará y destinará el objeto hacia el otro extremo. Cuando el objeto colocado en la banda llega al otro extremo, donde se localiza el área de inspección, y es detectado por el sensor ultrasónico (figura 9), esto da lugar a que el robot se dirija inmediatamente hacia esa posición para tomar nuevamente la pieza y dirigirla hacia el lugar de desabastecimiento correspondiente.

Figura 8 Robot sobre el primer extremo de la banda.
Fuente (Elaboración propia, 2019)

Figura 9 Robot en el área de inspección.
Fuente (Elaboración propia, 2019)

En la figura 10 se visualiza el primer caso posterior a la identificación de tamaño del objeto detectado, en que se utiliza una pieza pequeña. Como se aprecia, el brazo conduce el objeto detectado hacia el área de desabastecimiento correspondiente a esta clase, conforme los datos que recibidos por el controlador del sistema a partir de la señal emitida por el sensor ultrasónico.

La figura 11 se presenta el segundo caso posible, ahora correspondiente a la pieza grande. De igual manera tras realizar la identificación del tamaño de la pieza, en la parte final de la banda el robot sujeta a la misma y la dirige al lugar de desabastecimiento respectivo.

Figura 10 Clasificación de objeto pequeño.
Fuente (Elaboración propia, 2019)

Figura 11 Clasificación de pieza grande
Fuente (Elaboración propia, 2019)

Cabe resaltar, que durante la realización de la implementación del proceso analizado, se observaron varios errores de posicionamiento del brazo robótico los cuales se debieron a que fueron contempladas diferentes posiciones en la programación al realizar la distinción entre los tamaños de pieza.

Algunos otros inconvenientes presentados fueron ocasionados por fallos en el cableado. Para dar solución a estos problemas fue necesario cambiar de programación y mejorar cableado entre componentes. Respecto a la calibración del sensor ultrasónico para la identificación de tamaño, únicamente fue requerido establecer un rango de valores entre los cuales pudiera caracterizarse cada clase propuesta, desde la programación desarrollada, con lo cual no existieron inconvenientes por el uso de este dispositivo.

Conclusiones

La necesidad de realizar la sincronización efectiva entre sistemas activos dentro de un proceso industrial ha llevado a la exploración de metodologías formales, originalmente propias de las áreas computacionales, a partir de las cuales sea posible la representación y el diseño del control, así como el monitoreo de la operación conjunta de múltiples unidades de trabajo. Es así, que el estudio de sistemas de control basados en eventos, ha colocado las bases para el análisis de secuencias en las que intervienen sistemas activos que realizan una tarea respectiva, y cuya interacción con otros, ha posibilitado la conformación de procesos en los cuales se persigue un objetivo común.

Es así, que la realización de la presente aplicación permitió brindar continuidad a trabajos previamente desarrollados, en los cuales de forma inicial se proponía el análisis de una configuración robótica como una entidad independiente, para su posterior interacción con otros dispositivos dentro de un proceso de manejo de materiales y finalmente, la implementación de la tarea de clasificación bajo la característica de tamaño, en la que el sistema habrá de decidir entre más de un destino a seguir, dada la clase identificada en un objeto analizado.

La orientación particular de este estudio se acotó al escalado de un prototipo de prueba, considerando que existen instituciones de educación superior tecnológica que no disponen de equipamiento industrial para desarrollar la configuración que una sincronización entre equipos implica; la cual es una competencia solicitada por los mismos programas de estudio. Por tanto, la contribución del presente trabajo es brindar una alternativa para la aplicación de conocimiento teórico dentro de una implementación práctica para el desarrollo de competencias pertinentes en los estudiantes, sin que llegue a ser una limitante la mínima o nula disposición de equipamiento industrial.

Desde la perspectiva de control, la representación de la secuencia del proceso propuesto, dada por la aplicación de la metodología de máquina de estados finitos, permitió definir con claridad los estados que el sistema habría de adquirir, dadas las condiciones determinadas por la combinación de las señales de entrada propuestas.

Lo anterior, a partir de la plena identificación de las señales de entrada, las señales de salida y la relación lógica entre ambas. Por lo que, la concentración de esta información dentro de un esquema funcional, contribuyó a su transcripción en las instrucciones necesarias para la programación del controlador del proceso utilizado.

Referencias

- Behandish, M., Nelaturi, S., & De Kleer, J. (2018). Automated process planning for hybrid manufacturing. *Computer-Aided Design*, 115-127.
- Corona Ramírez, L. G., Abarca Jiménez, G. S., & Mares Carreño, J. (2014). *Sensores y Actuadores*. Aplicaciones con Arduino. México D.F.: Grupo Editorial Patria.
- Endsley, E. W., Almeida, E. E., & Tilbury, D. M. (2006). Modular finite state machines: Development and application to reconfigurable manufacturing cell controller generation. *Control Engineering Practice*, 1127-1142.
- Feldmann, S., Legat, C., & Vogel-Heuser, B. (2015). An analysis of challenges and state of the art for modular engineering in the machine and plant manufacturing domain. *IFAC-PapersOnLine*, 87-92.
- Fitouhi, M.-C., Nourelfath, M., & Gershwin, S. B. (2017). Performance evaluation of a two-machine line with. *Reliability Engineering & System Safety*, 61-72.
- Fouquet, K., & Provost, J. (2017). A signal-interpreted approach to the supervisory control theory problem. *IFAC-PapersOnLine*, 12351-12358.
- Greenlaw, R., & Hoover, H. J. (1998). *Fundamentals of the theory of computation. Principles and practice*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, Inc.
- Jamhour, A., & Garcia, C. (2012). Automation of industrial serial processes based on finite state machines. *Procedia Engineering*, 186-196.
- Kaszubowski Lopes, Y., Rosso, R. S., Leal, A. B., Harbs, E., & Hounsell, M. d. (2012). Finite automata as an information model for manufacturing execution system and supervisory control integration. *IFAC-PapersOnLine*, 212-217.
- Kim, J., & Kim, D. (2015). Accurate abandoned and removed object classification using hierarchical finite state machine. *Image and Vision Computing*, 1-14.
- Liu, J., Yang, S., Wu, A., & Hu, S. J. (2012). Multi-state throughput analysis of a two-stage manufacturing system with parallel unreliable machines and a finite buffer. *European Journal of Operational Research*, 296-304.
- Lucas-Silva, A., Ribeiro, R., & Teixeira, M. (2017). Modeling and control of flexible context-dependent manufacturing systems. *Information Sciences*, 1-14.
- Pichard, R., Rabah, N. B., Carre-Menetrier, V., & Riera, B. (2016). CSP solver for Safe PLC Controller: Application to manufacturing systems. *IFAC-PapersOnLine*, 402-407.
- Riera, B., Coupât, R., Philippot, A., Annebique, D., & Gellot, F. (2014). Control design pattern based on safety logical constraints for manufacturing systems: application to a palletizer. *IFAC-PapersOnLine*, 388-393.
- Schmidt, K. W. (2012). Computation of supervisors for reconfigurable machine tools. *IFAC Proceedings Volumes*, 227-232.
- Schneider, G. F., Peßler, G. A., & Terkaj, W. (2019). Knowledge-based conversion of finite state machines in manufacturing automation. *Procedia Manufacturing*, 189-194.
- Ulyantsev, V. I., & Tsarev, F. N. (2012). Extended finite-state machine induction using SAT-Solver. *IFAC-PapersOnLine*, 236-241.