Desarrollo de sistemas ciber-físicos de producción para Procesamiento por lotes usando normas IEC-61499 e ISA-88

Developing cyber-physical production systems for batch control under IEC-61499 and ISA-88

Carlos A. García¹ Esteban X. Castellanos² Marcelo V. García^{1, 3}

Recibido 29 de mayo de 2017, aceptado 07 de agosto de 2018

Received: May 29, 2017 Accepted: August 07, 2018

RESUMEN

Un sistema Ciber-Físico de Producción Industrial (CPPS) dota a los dispositivos de control industriales actuales de altas capacidades de computación, almacenamiento y comunicación tanto local como remota convirtiéndolos en dispositivos inteligentes y autónomos. Usando los conceptos del Internet Industrial de las Cosas (IIoT) podemos inferir que los CPPS están, conectados entre sí y a su vez conectados con el mundo virtual de las redes digitales globales. Esto ha llevado a la adopción por parte de las empresas de normas como IEC-61499 que permiten modelar y desarrollar sistemas distribuidos flexibles y configurables. Otra norma muy usada es ISA 88 que ofrece un conjunto coherente de modelos y terminología para el control de procesos de fabricación por lotes que pueden ser implementados bajo IEC-61499 para diseñar CPPSs inclusive usando dispositivos de bajo coste. El siguiente trabajo propone el desarrollo de aplicaciones de control distribuido en CPPS bajo norma IEC-61499 en hardware empotrado de bajo coste como son las tarjetas BeagleBone Black y Raspberry PI; teniendo de base los modelos presentados en la norma ISA-88 que permitirán el desarrollo de algoritmos de control distribuido encapsulados dentro de Bloques de Funciones (FBs) el cual es el modelo fundamental de la norma IEC-61499.

Palabras clave: IEC-61499, ISA-88, sistemas discretos, control por lotes, industria 4.0.

ABSTRACT

A cyber-physical system integrates capacities such as computing, storing and communication along with others in the physical world such as objects tracking and/or objects controlling. According to the IIoT concepts it is possible to infer that CPPS systems are normally connected to each other, and also connected to the virtual world of global digital networks. It is here where, introducing the IEC-61499 standard, will allow the CPPS to implement distributed, flexible and reconfigurable controllers. In the industrial context, the ISA-88 regulation offers a coherent set of standards and terminology for batch control and defines models: physical model, controlling model etc., for this kind of industries. That is why it is necessary to provide the industry with low-cost alternatives which could redirect the CPPS development to a new variety of devices. This paper proposes the development of the FBs networks needed in the integration of distributed control systems with the use of two embedded hardware like: BeagleBone Black and Raspberry PI; having the models presented in the ISA-88 standard as the base for developing the control algorithms encapsulated inside the FBs of control.

Keywords: IEC-61499, ISA-88, discrete systems, batch control, industry 4.0.

¹ FISEI. Universidad Técnica de Ambato. 180103. Ambato, Ecuador. E-mail: ca.garcia@uta.edu.ec; mv.garcia@uta.edu.ec

² Departamento de Eléctrica y Electrónica. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. 050104. Latacunga, Ecuador. E-mail: excastellanos@espe.edu.ec

³ DISA. Universidad del País Vasco. 48013. Bilbao, España. E-mail: mgarcia294@ehu.es

* Autor de correspondencia: mgarcia294@ehu.es

INTRODUCCIÓN

En la arquitectura industrial tradicional partimos del hecho de que cada uno de los miembros de la cadena de valor tiene información que el resto no posee y a la cual no pueden acceder. Sin embargo, en la actualidad y gracias a los conceptos dados por la Industria 4.0 e IIoT podemos integrar sistemas de información y conocimiento basado en redes colaborativas [1]. Un sistema CPPS está compuesto por objetos electrónicos y de software. Los objetos se conectan entre sí directamente o a través de internet, formando un único sistema en red. Con ello, se consiguen redes horizontales de CPPs optimizadas en tiempo real que gracias a la transparencia informativa logran alto nivel de flexibilidad.

Los Controladores Lógicos Programables (PLCs) desde su aparición han sido un eje primordial en los procesos de automatización industrial, gracias a su óptimo funcionamiento en aplicaciones donde los tiempos críticos de respuesta son necesarios. Es por esta razón que se desarrolló la norma IEC-61131, la cual contiene todos los lineamientos necesarios para controlar procesos en base a una arquitectura implementada en un autómata programable.

Con el avance de los años, los nuevos desarrollos tecnológicos como IIoT o Industria 4.0 en conjunto a las crecientes necesidades industriales, marcan como requisitos poder implementar sistemas de control que se adapten a plantas en continuo cambio y crecimiento; el cual no puede ser alcanzado por IEC-61131 y PLCs, tornándola progresivamente obsoleta ante la necesidad que presentan grandes industrias de implementar controladores descentralizados a medida del proceso.

Actualmente, la norma IEC-61499 promueve un desarrollo basado en modelos de sistemas de control distribuidos. Esta norma aprovecha la capacidad de cómputo de dispositivos de automatización de nueva generación para diseñar e implementar arquitecturas distribuidas que puedan ser desarrolladas para varios dispositivos de automatización industrial multimarca sin importar el sistema operativo bajo el cual operen. IEC-61499 en unión con Industria 4.0 permitirá modelar y desarrollar componentes software y hardware para sistemas de control distribuidos de manera independientes [2].

La norma IEC-61499 especifica únicamente la arquitectura para implementar sistemas de control distribuidos, cayendo en la necesidad de una norma industrial que la ayude a definir modelos y arquitecturas de control industrial y desarrollo para la programación de FBs. Es aquí donde la norma ISA-88 provee reglas y arquitecturas que pueden ser usadas para diseñar el control de procesos en sistemas por lotes [3]. Aunque la norma ISA-88 ha sido ampliamente adoptada en la industria, la norma IEC-61499 aún está atrasada en su adopción, y los proveedores todavía se centran en apoyar solo el estándar de programación IEC 61131-3.

Una de las razones de la falta de aceptación de la norma IEC-61499 en la industria es que, aunque puede ser adecuada para aplicaciones de control distribuido, esta norma no alivia la carga para el ingeniero de automatización que está intentando desarrollar aplicaciones de control orientados a objetos complejos con asociaciones dinámicas entre ellos.

En este artículo se propone el trabajo conjunto entre la norma ISA-88 la cual provee modelos para el diseño de sistemas de control de procesos de fabricación por lotes, los cuales al ser implementados con la norma IEC-61499, permiten el diseño de un sistema CPPS de bajo coste para realizar un control automático y distribuido de la maqueta industrial FESTO® MPS 200 que simula un proceso real, esta aplicación de ingeniería se diseñará de una manera sencilla y destinando menos horas de ingeniería para lograrlo.

La estructura del siguiente artículo es la siguiente: la Sección II muestra algunos trabajos relacionados que se han utilizado como punto de partida para esta investigación, la Sección III describe algunos conceptos sobre estándares industriales que pueden usarse en el proceso por lotes, la Sección IV ilustra un caso de estudio en el que los FBs diseñados bajo la norma IEC 61499 e ISA 88 se implementan para el control de la maqueta FESTO® MPS 200, y finalmente algunas conclusiones y trabajos en curso se muestran en la Sección V.

ESTADO DE LA TECNOLOGÍA

El objetivo de esta sección es introducir las tecnologías existentes que pueden adaptarse a la automatización

de CPPS usando la norma IEC-61499 e ISA 88. En este sentido se presenta una visión general de los trabajos relacionados, paradigmas y tecnologías de implementación.

Muchos investigadores comparten sus ideas sobre el desarrollo y aplicabilidad de la norma IEC-61499 para mejorar el control dentro de procesos industriales. En [4] y [5] los autores ofrecen una aproximación sobre las ventajas del trabajo conjunto de ISA-88 con diferentes normas actuales como OPC UA e ISA-95 para el desarrollo de sistemas de control a la medida del proceso.

Otras investigaciones sirven de punto de partida para este artículo como las realizadas por [6] y [7] en las cuales los autores muestran una propuesta de control que busca establecer un camino para la migración de la norma IEC-61131, a un modelo más flexible usando ISA 88 mediante una aproximación de tres partes: (i) el desarrollo de componentes funcionales, (ii) descripción del modelo de procedimiento mediante modelos SIPN (Signal Interpreted Petri Nets) y (iii) mapeo del modelo SPIN a una red de FBs

En trabajos como [8] se presenta una investigación sobre la factibilidad de implementar servicios SOA (Service Oriented Architecture) en la industria de la automatización, en donde se demuestra que basándose en las definiciones de implementación de SOA con IEC-61499, cualquier tipo de FB y sus instancias pueden ser dinámicamente creadas o eliminadas sin generar interrupciones en la ejecución normal del sistema de control. Con esto, adicionalmente se puede alterar el código implementado para generar actualizaciones del sistema en tiempo real. Otra propuesta similar se explica en [9], en donde se presenta una aproximación que integra tres diferentes formalismos: IEC-61499, ISA-88 y SIPN; para obtener un control reconfigurable basado en componentes de software reusables.

A su vez en [10] los autores definen 4 retos primordiales de IEC-61499 a vencer para su aceptación real en la industria. Estos son: escalabilidad, mantenibilidad, extensibilidad y predictibilidad; los cuales con el paso de los años han sido superados de manera continua gracias al aporte de varios grupos de investigación que han venido desarrollando soluciones de ingeniería a estas desventajas.

El caso de estudio de [11] en donde los autores no solamente analizan la factibilidad de la norma IEC-61499 bajo el punto de vista de la ingeniería en automatización, adicionalmente empiezan a discutir sobre los desafíos y las ventajas de aceptación existentes en su camino para ser implementada en industrias como la aeroespacial. Otro artículo que muestra la profundidad de las actuales investigaciones de IEC-61499, es el presentado en [12] en donde los autores buscan incrementar el nivel de paralelismo al momento de ejecutar los FBs para aumentar el rendimiento del sistema, y reducir aún más el tiempo de respuesta ante eventos de entrada.

Como se puede ver en [13], ISA 88 ha terminado en muchas mejoras reconocidas en varias áreas como: ahorro de costes y optimización del tiempo en la implementación [14-16], el aumento de las opciones para reutilizar el código desarrollado [17], una mayor coherencia en la ejecución y la calidad del proceso [18], y el crecimiento de la capacidad de producción, así como una reducción de la cantidad de operadores [19].

Brandl en [13], presenta mecanismos de diseño que se desarrollaron sobre la base de los modelos propuestos en ISA 88. Los mecanismos incluyen métodos ordinarios para construcción de aplicaciones de control. Aunque el enfoque principal de ISA 88 son procesos por lotes en producción industrial. Todas las disposiciones de diseño se construyen sobre la base de la brecha entre la receta de control y el equipo usado en la automatización.

Con el progreso alcanzado en el desarrollo de la norma en los últimos años, se crean nuevas propuestas y soluciones de ingeniería para contribuir a la aplicabilidad de la norma en la industria, teniendo como ejemplo el caso de [20] en el que los autores introducen una propuesta de investigación basada en plataformas de bajo coste. El trabajo se refiere a la capacidad de este tipo de dispositivos de usar diferentes distribuciones de sistema operativo embebido, para ser altamente compatible con la norma IEC-61499 y para permitir la implementación CPPS.

La propuesta de este artículo se basa en el punto de partida descrito en [20] para extender la escalabilidad de la norma a dispositivos más baratos, demostrando que todas las características logradas en dicho artículo pueden ser implementado en más de un tipo

de dispositivo de bajo costo, dando continuidad a la línea de investigación iniciada pero con la ventaja que se usa la norma ISA 88 como mecanismo para diseño del control de los procesos.

ESTÁNDARES INDUSTRIALES PARA CONTROL DE PROCESOS

IEC-61499

El estándar IEC-61499 propone un modelo de arquitectura basado en Bloques de Funciones (FBs) para sistemas de control distribuidos, modulares y flexibles. Los FBs son un concepto establecido de los componentes de software que encapsulan las operaciones del sistema dentro de su programación; ganando mayor robustez y volviéndolos componentes reusables. Los algoritmos dentro de un FB pueden ser programados en cualquier lenguaje de programación determinado en la anterior norma IEC-61131, al igual que pueden ser programados en lenguajes de procedimiento como caso de Java, C, C++, etc.

Al crear una aplicación de control distribuido bajo la norma IEC-61499 es necesaria la implementación de una red de FBs interconectados, permitiendo el intercambio y transmisión de eventos e información entre ellos; esto es posible gracias a la estructura que poseen las FBs. Esta estructura está compuesta por (i) cabeza de la FB donde ocurre el control de la ejecución, y (ii) cuerpo de la FB en donde se almacenan los algoritmos. En la cabeza del FB se produce el flujo de eventos a través de sus canales, mientras que en el cuerpo se produce el flujo de datos de igual manera a través de sus respectivos canales, como se muestra en la Figura 1.

4DIAC® es una herramienta de Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) para la norma IEC-61499 compatible para la implementación de aplicaciones de control que se ejecutan en plataformas heterogéneas [21]. Este software proporciona portabilidad, interoperabilidad, así como capacidades de configuración. El run-time utilizado es FORTE® (4DIAC-RTE), que permite ejecutar aplicaciones IEC-61499 en pequeños dispositivos embebidos. FORTE al ser el run-time que usa 4DIAC proporciona portabilidad a varios sistemas operativos incluyendo Windows y Linux. Mientras que 4DIAC-IDE solo puede ejecutarse en la plataforma de programación, el run-time FORTE IEC-61499 puede ejecutarse en cualquier dispositivo del sistema de automatización distribuido.

Figura 1. Modelo de FB IEC-61499.

ISA-88

La norma ISA-88 entrega una guía para el diseño de sistemas de control en procesos de fabricación por lotes, definiendo la terminología base para su entendimiento al igual que una arquitectura de modelos que pueden ser usados en sistemas de automatización. Principalmente el objetivo de esta norma es separar de la información general del proceso aquella que pertenezca a los equipos y maquinaria involucrada en las aplicaciones de control. De esta manera se parte desde el punto de vista del proceso para comenzar con el diseño de la aplicación de control, en donde los resultados son un grupo de recetas en donde se especifican qué acciones deben ser implementadas y en qué orden deben ser ejecutadas para un control eficiente del proceso.

Este tipo de recetas son elaboradas siguiendo un esquema jerárquico, en donde el elemento básico para el diseño de las mismas son las fases. Cada una de estas fases describe una función básica de la planta a controlar, teniendo de esta manera que al agrupar un conjunto de fases y ejecutarlas en un orden específico (ya sea lineal o en paralelo), se llegan a formar operaciones para procesos de fabricación por lotes.

Adicionalmente, la norma ISA-88 introduce un lenguaje de diseño llamado Procedure Function Chart (PFC), el que permite describir de manera gráfica la organización de las operaciones y fases. Una desventaja de este lenguaje es que al ser una aproximación semi-formal, no permite un mayor análisis sistemático de la operación y no garantiza que cuando se active un actuador vinculado a más de una fase, solo se active la fase requerida.

El estándar ISA-88 también define una jerarquía de equipos: un objeto de empresa que contiene uno o más

objetos de sitio, cada uno de los cuales contiene uno o más objetos de área. Cada área estará constituida por uno o más centros de trabajo. En ISA 88, todos los centros de trabajo son células de proceso (es decir, equipo utilizado en el procesamiento por lotes).

CASO DE ESTUDIO

El caso de estudio propuesto describe un sistema de laboratorio con el objetivo de ilustrar una aplicación de automatización de fábrica a escala. En particular, la planta de producción es una cadena de montaje con cuatro estaciones FESTO® MPS 200. Se utilizan las estaciones de distribución, selección, almacenamiento y clasificación. El funcionamiento de la maqueta se basa en una ejecución en serie de cada uno de estos procesos para completar un ciclo del lazo de trabajo global de la misma y simular de esta manera un proceso discreto de fabricación por lotes. Un ciclo de trabajo comprende: (i) Estación Distributing que realiza la distribución del material de trabajo, (ii) Estación Testing que hace la separación de las unidades defectuosas del proceso mediante una selección en base a la altura de cada pieza, (iii) Estación Storing que realiza el transporte de los materiales sin defectos al proceso de almacenamiento y (iv) Estación Sorting que hace la clasificación de los diferentes materiales en base a sus características de color; culminada la clasificación por color, finaliza un ciclo del lazo de trabajo para dar paso a uno nuevo como se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Esquema de Control del Caso de Estudio.

Con el fin de poder tener un punto de comparación entre los controladores implementados en los dispositivos

de bajo coste bajo norma IEC-61499 y los que fueron implementados bajo los lineamientos de la norma IEC-61131; se conservará el control de las estaciones de Testing y Storing basadas en PLCs, mientras que para para las estaciones Distributing y Sorting, se usarán CPPS de bajo coste como son las tarjetas BeagleBone Black (BBB) y Raspberry Pi (RPI).

IMPLEMENTACIÓN PROPUESTA

Propuesta de Hardware

Una de las principales características de este trabajo es expandir la usabilidad de la norma IEC-61499 a un mayor número de dispositivos de bajo coste, es por esto que para la implementación de los controladores fueron seleccionadas las tarjetas BeagleBone Black (BBB) y Raspberry PI (RPI). A pesar de ser diseñadas con propósitos de enseñanza y comerciales, estas tarjetas fueron seleccionadas gracias a su capacidad para tener un sistema operativo embebido. Adicionalmente son consideradas por muchos investigadores de la rama de automatización como excelentes prototipos para el control industrial debido a: su bajo coste, reducido tamaño, y gran desempeño de computación.

Esencialmente ambas tarjetas son capaces de tener varias distribuciones de Linux. Además, ambas poseen un número considerable de puertos de Entrada/Salida de propósito general, teniendo 26 puertos en la Raspberry PI y 65 puertos en la BeagleBone Black con los cuales pueden interactuar con el mundo físico. Una de las desventajas de ambas tarjetas es que su kernel no permite la manipulación directa de sus puertos de Entrada/Salida de propósito general (GPIO), pero esta es fácilmente compensada con la gran variedad de librerías desarrolladas para su manejo. En la Tabla 1 se tiene una comparación de las características de cada una de las tarjetas usadas.

Tabla 1. Características Eléctricas de la RPI3 B++ y BBB.

	Raspberry Pi3 B+	BeagleBone Black
SoC	Broadcom BCM2835	OMAP3530
CPU	ARM 1176JZF5 a 700 MHz	ARM Cortex-A8
RAM	512MB	512 MB DDR3
GPIOs	8xGPIO, SPI, I ² C, UART	67xGPIO
USB	2 x USB 2.0	1 x USB 2.0
Networks	Ethernet 10/100	Ethernet 10/100

Estos dispositivos embebidos para poder trabajar con señales industriales, se necesita una tarjeta de expansión. En este caso, se ha utilizado una placa que proporciona 12 entradas digitales y 12 salidas digitales de 24V.

Conjunto de FBs propuestos diseñados bajo norma ISA 88

Con la ayuda del entorno de desarrollo 4DIAC-IDE, se implementa un grupo de FBs en los cuales se encapsulan las funciones para el manejo de los GPIO de la BBB y RPI, así como FBs que encapsulan todo el modelamiento de recetas de control planteado por ISA-88 detrás de múltiples líneas de código para la generación de las respectivas máquinas de estados de cada uno de los procesos de Distributing y Sorting. Por lo tanto, se implementa dos grupos de FBs, (i) FBs de manipulación de GPIOs de las tarjetas y (ii) FBs de control de modulo. Las que se explicarán a continuación:

FBs para manejo de Entradas/Salidas

Este grupo de FBs es diseñado para poder manipular los GPIOs de cada una de las tarjetas, para que estas puedan interactuar con el mundo exterior de acuerdo a las acciones dadas por los FBs de control de cada estación. Con el fin de trabajar con tendencias comúnmente usadas en la industria actual y facilitar su implementación e integración, un archivo de configuración en formato XML que asigna a cada pin de la tarjeta un nombre de variable (tag), es utilizado para una mejor comprensión del sistema. El archivo XML, contiene información sobre: (i) nombre de acceso a la variable, (ii) nombre de pin correspondiente a la distribución de GPIOs de la tarjeta, (iii) función del puerto, y (iv) un breve comentario. Como se muestra en la Figura 3.

XML		
ProcessTag		
name		towerSensor
GPIOpin		12
GPIOfunction		INPUT
comment		Sensor for sorting pieces

Figura 3. Archivo de Configuración XML para Variables del Proceso.

DO_BBB y DO_RSP FBs.

Son usados para configurar los puertos GPIO de las tarjetas (BBB y RPI) como salidas digitales, para

de esta manera escribir en ellos un valor lógico TRUE o FALSE. Al igual que los FBs estándar, éstos reciben los eventos INIT y REQ para iniciar sus operaciones, y generan los eventos INITO y CNF. Estos FBs trabajan con las siguientes variables Entrada/Salida (Ver Figura 4 y Figura 5):

- **CONFIG_FILE** (Input, STRING): Indica la ubicación en la tarjeta y el nombre del archivo XML con la información del respectivo mapeo de variables de cada tarjeta.
- **TAG** (Input, STRING): Nombre del puerto de salida a manipular.
- **OUTPUT_VALUE** (Input, BOOL): Valor booleano a escribir en el puerto GPIO. Puede tener dos valores TRUE o FALSE
- **STATUS** (Output, WSTRING): Código de descripción de error ante la aparición de uno.

Figura 4. DO_BBB FB.

Figura 5. DO_RSP FB.

DI_BBB y DI_RSP FBs.

Su función es la de configurar el GPIO de la respectiva tarjeta como entrada digital de datos, para que, a su llamado, lea el valor digital a la entrada del puerto. Al igual que los FBs estándar, éstos reciben los eventos INIT y REQ para iniciar sus operaciones, y generan los eventos INITO y CNF. Estos FBs trabajan con las siguientes variables Entrada/Salida (Ver Figura 6 y Figura 7):

- **CONFIG_FILE** (Input, STRING): Indica la ubicación en la tarjeta y el nombre del archivo XML con la información del respectivo mapeo de cada tarjeta.

- TAG (Input, STRING): Nombre del puerto de salida a manipular.
- INPUT_VALUE (Output, BOOL): Valor booleano leído en el puerto GPIO.
- STATUS (Output, WSTRING): Código de descripción de error ante la aparición de uno.

Figura 6. DO_BBB FB.

Figura 7. DO_BBB FB.

FBs para control de estaciones

Este tipo de FBs contienen respectivamente los algoritmos de control basados en ISA 88 pertenecientes a las estaciones Distributing y Sorting. Estas FBs permiten la ejecución de los algoritmos siempre y cuando se reúnan las condiciones previas necesarias por cada acción a ejecutar. Como primer paso se desarrolla el metamodelo basado en la norma ISA-88 del equipo usado en el caso de estudio. Como se observa en la Figura 8.

Este meta-modelo permite solucionar uno de los aspectos más críticos en un proyecto de automatización que es la jerarquización del proceso y mejora el grado de independencia entre sus actividades de procesamiento, lo cual convierte a la división física del sistema en una actividad compleja y altamente dependiente de los requisitos del medio específico donde se realiza el proceso de producción.

Este meta-modelo basado en la arquitectura física de ISA-88 propone un modelo jerárquico donde se caracteriza el rol que toma el equipamiento en los procesos de producción. Se puede observar la Unidad de Producción que generalmente engloba todo el equipamiento que se necesita en un segmento de producción continua que opera de manera relativamente autónoma. La Unidad de Trabajo se compone de módulos de equipos y módulos de control. Identifica la capacidad de procesamiento principal de la familia de productos. Finalmente, el Módulo de Control una colección de sensores, actuadores y otros dispositivos participantes en el control, así como equipos de procesamiento asociados que, desde el punto de vista del control, operan como una entidad simple.

FESTO_DISTRIBUTING FB.

Dentro de este FB se encapsula el algoritmo de control correspondiente al proceso de la estación de distribución. En la Tabla 2 se especifican las fases que se identifican al analizar el funcionamiento de la misma. Las fases analizadas bajo norma ISA 88 permitirá determinar el número de entradas y salidas de la FB y como sería su comportamiento interno.

Figura 8. Meta-modelo para los procesos de distribución y clasificación según ISA 88.

Tabla 2. Fases para el proceso de distribución.

Fase	Descripción
Dosificación de la pieza de trabajo	Verificación de presencia de la pieza de trabajo en el tambor de almacenamiento (lectura del sensor de almacenamiento IN_4), y dosificación de la pieza de trabajo del tambor de almacenamiento a la plataforma de distribución (activar pistón de distribución OUT_1)
Distribución de la pieza de trabajo	Verificación de presencia de la pieza de trabajo en la plataforma de distribución (lectura del sensor de distribución IN_5) e intercambio de estación mediante brazo con ventosa de succión (activación de giro de brazo OUT_2, con activación de bomba de succión OUT_3).

Al igual que los FBs estándar, este recibe los eventos INIT y REQ para iniciar sus operaciones, y generan los eventos INITO y CNF. De igual manera se tiene un conjunto de canales para el manejo de datos de Entradas/Salidas los cuales son descritos en la Figura 9.

Figura 9. DISTRIBUTING FB.

FESTO_SORTING FB.

Dentro de este FB se encapsula el algoritmo de control correspondiente al proceso de la estación de almacenamiento. En la Tabla 3 se especifican las fases que se identifican al analizar el funcionamiento de la misma.

Tabla 3. Fases para el proceso de clasificación.

Fase	Descripción
Recepción de la pieza de trabajo	Desactivación del obturador (OUT_5), verificación de presencia de la pieza de trabajo en la banda de transportación (lectura del sensor infrarrojo IN_4), y clasificación por color de la misma (lectura del sensor infrarrojo IN_5)
Determinación de camino	Activación de la banda transportadora (OUT_1) y extensión del separador respectivo al color (pieza de trabajo roja OUT_2, pieza de trabajo ploma OUT_3, pieza de trabajo negra OUT_4).
Clasificación de la pieza de trabajo	Activación del obturador (OUT_5) y verificación del estado del almacenamiento de la pieza de trabajo (IN_6).

Al igual que los FBs estándar, este recibe los eventos INIT y REQ para iniciar sus operaciones, y generan los eventos INITO y CNF. De igual manera se tiene un conjunto de canales para el manejo de datos de Entradas/Salidas los cuales son descritos en la Figura 10.

Figura 10. SORTING FB.

Aplicación basada en IEC-61499 e ISA-88 para Control del Proceso Industrial

Como resultado final la propuesta presentada, a partir de los FB desarrollados para la gestión de Entrada/Salida y para el control de procesos de fabricación por lotes de las estaciones de distribución y clasificación, se generan las respectivas redes de FBs bajo norma IEC-61499, con el fin de lograr el correcto funcionamiento del caso de estudio.

Figura 11. FBs ISA-88 e IEC-61499 para el proceso de clasificación.

En la Figura 11 se muestra una aproximación de la aplicación de control basada en IEC-61499 de la estación de clasificación (sorting), adicionalmente se puede observar cómo los FB de control usan los FB de la gestión de Entrada/Salida para su interacción con el mundo exterior.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La arquitectura propuesta en este documento apoya la creación de sistemas flexibles de automatización de fabricación en los que las subtarefas se asignan a los componentes de manera que se reparten las prioridades y se apoya el cambio. Los sistemas de control por lotes desarrollados son implementados y probados en los procesos de distribución y clasificación de la maqueta de procesos industriales FESTO FMS-200, que permiten tener una noción de comportamiento de los algoritmos implementados en entornos industriales. Esta propuesta utiliza los modelos introducidos por la norma ISA-88 para generar FBs compatibles con IEC-61499, que permiten controlar procesos discretos. De esta manera, se obtienen nuevos componentes de software reconfigurables, con los cuales es posible programar dos dispositivos de hardware de marcas comerciales no relacionadas con la misma herramienta de software, haciendo posible extender el uso de estándares.

Las futuras líneas de investigación se direccionan en dos aspectos primordiales: el uso adicional de la norma ISA-95, y la implementación de

algoritmos de reconfiguración dinámica ante el fallo. Con la ayuda de la norma ISA-95 se genera la integración de sistemas de control con sistemas empresariales; es decir, genera los lineamientos necesarios para el intercambio de información entre los dos niveles superiores de la pirámide de automatización (4 Sitio, Empresa; 3 Área). Por otro lado, al integrar características de reconfiguración dinámica a los sistemas de control distribuido, los sistemas de control ganan la autonomía suficiente para redistribuir las operaciones del controlador en falla entre los controladores en óptimo funcionamiento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Universidad Técnica de Ambato (UTA) bajo el proyecto CONIN-P-0167-2017. Así mismo como al Gobierno Ecuatoriano a través de la Beca SENESCYT "Convocatoria abierta 2013.

REFERENCIAS

- [1] N. Jazdi. "Cyber physical systems in the context of Industry 4.0". 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics. Cluj-Napoca, Rumania. pp. 2-4. 2014. ISBN: 978-1-4799-3732-5. DOI: 10.1109/AQTR.2014.6857843.
- [2] "International Electrotechnical Commission Std. (2005) IEC 61499: Function blocks". Part 1-4. 2014.

- [3] M. De Sousa. "Analyzing the compatibility between ISA 88 and IEC 61499". 2010 IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA 2010). Bilbao, España. pp. 1-8. 2010. ISSN: 1946-0740. DOI: 10.1109/ETFA.2010.564 1308.
- [4] D. Van der Linden, H. Mannaert, W. Kastner, V. Vanderputten, H. Peremans and J. Verelst. "An OPC UA interface for an evolvable ISA88 control module". ETFA2011. Toulouse, Francia. pp. 1-9. 2011. ISSN: 1946-0740. DOI: 10.1109/ET FA.2011.6058978.
- [5] B. Scholten. "Integrating ISA-88 and ISA-95". ISA ESPO 2007. Houston, Texas. pp. 13. 2007.
- [6] D. Ivanova, G. Frey and I. Batchkova. "Intelligent component based batch control using IEC61499 and ANSI/ISA S88". 2008 4th International IEEE Conference Intelligent Systems. Varna, Bulgaria. Vol. 1, pp. 444-449. 2008. ISSN: 1541-1672. DOI: 10.1109/IS.2008.4670424.
- [7] D. Dimitrova, S. Panjaitan, I. Batchkova and G. Frey. "IEC 61499 Component Based Approach for Batch Control Systems". IFAC Proceedings Volumes. Vol. 41 N° 2, pp. 10875-10880. Abril 2016. ISSN: 1474-6670. DOI: 10.3182/20080706-5-KR-1001.01842
- [8] K. Thramboulidis. "Comments on Bridging Service-Oriented Architecture and IEC 61499 for Flexibility and Interoperability". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. Vol. 13 N° 4, pp. 1494-1496. Agosto. 2017. ISSN: 1551-3203. DOI: 10.1109/TII.2016.2598699.
- [9] D. Ivanova, I. Batchkova, S. Panjaitan, F. Wagner and G. Frey. "Combining IEC 61499 and ISA S88 for batch control". *IFAC Proceedings Volumes*. Vol. 13 N° 4, pp. 187-192. Abril 2016. ISSN: 1474-6670. DOI: 10.3182/20090603-3-RU-2001.0189.
- [10] K.H. Hall, R.J. Staron and A. Zoitl. "Challenges to industry adoption of the IEC 61499 standard on event-based function blocks". 2007 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics. Vienna, Austria. pp. 823-828. 2007. ISSN: 1935-4576. DOI: 10.1109/INDIN.2007.4384880
- [11] C.C. Insaurrealde. "Modeling standard for distributed control systems: IEC 61499 from industrial automation to aerospace". 2016 IEEE/AIAA 35th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Sacramento, Estados Unidos de América. pp. 1-8. 2016. ISBN: 978-1-5090-2523-7. DOI: 10.1109/DASC.2016.7777980
- [12] D. Drozdov, V. Dubinin and V. Vyatkin. "Speculative computation in IEC 61499 function blocks execution - Modeling and simulation". 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Poitiers, Francia. pp. 748-755. 2016. ISSN: 2378-363X. DOI: 10.1109/INDIN.2016.7819259
- [13] D. Brandl. "Design Patterns for Flexible Manufacturing". ISA. 1ra ed. Durham, Estados Unidos de América. pp. 207. 2006. ISBN: 1-55617-998-7.
- [14] G. Neugschwandtner, M. Reekmans and D. Van der Linden. "An open automation architecture for flexible manufacturing". 2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA). Cagliari, Canadá. pp. 1-5. 2013. ISSN: 1946-0740. DOI: 10.1109/ETFA.2013.6648154.
- [15] M.V. García, E. Irisarri, F. Pérez, E. Estévez, D. Orive and M. Marcos. "Plant floor communications integration using a low cost CPPS architecture". 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Berlin, Alemania. pp. 1-4. 2016. ISBN: 978-1-5090-1314-2. DOI: 10.1109/ETFA.2016.7733631
- [16] Zhihua Xiong, Jie Zhang, Xiong Wang and Yongmao Xu. "An integrated batch-to-batch iterative learning control and within batch control strategy for batch processes". *Proceedings of the 2005, American Control Conference*. Vol. 3. Portland, Estados Unidos de América. pp. 1935-1940. 2005. ISSN: 0743-1619. DOI: 10.1109/ACC.2005.1470252
- [17] M.V. García, F. Pérez, I. Calvo and G. Morán. "Building industrial CPS with the IEC 61499 standard on low-cost hardware platforms". *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*. Barcelona, España. pp. 1-4. 2014. ISSN: 1946-0740. DOI: 10.1109/ETFA.2014.7005272.

- [18] M. Melik Merkmians, M. Baierling and G. Schitter. "A service-oriented domain specific language programming approach for batch processes". 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Berlin, Alemania. pp. 1-9. 2016. ISBN: 978-1-5090-1314-2. DOI: 10.1109/ETFA.2016.7733729.
- [19] M. De Minicis, F. Giordano, F. Poli and M. M. Schiraldi. "Recipe Development Process Re-Design with ANSI/ISA-88 Batch Control Standard in the Pharmaceutical Industry". International Journal of Engineering Business Management. Vol. 6 N° 1, pp. 1-12. Enero 2014. DOI: 10.5772/ 59025.
- [20] M.V. Garcia, F. Perez, I. Calvo and G. Moran. "Developing CPPS within IEC-61499 based on low cost devices". 2015 IEEE World Conference on Factory Communication Systems (WFCS). Palma de Mallorca, España. pp. 1-4. 2014. ISBN: 978-1-4799-8244-8. DOI: 10.1109/WFCS. 2015.7160574.
- [21] 4DIAC Consortium. PROFACTOR GmbH. "Framework for Distributed Industrial Automation and Control (4DIAC)". 2010.