

## Arquitectura de Automatización basada en Sistemas Ciberfísicos para la Fabricación Flexible en la Industria de Petróleo y Gas

Marcelo V García<sup>a, \*</sup>, Edurne Irisarri<sup>a</sup>, Federico Pérez<sup>a</sup>, Elisabet Estévez<sup>b</sup>, Marga Marcos<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Ingeniería en Sistemas y Automática, Universidad del País Vasco, C/ Alameda. Urquijo s/n, 48013, Bilbao, España.

<sup>b</sup> Departamento de Ingeniería Electrónica y Automática, Universidad de Jaén, Campus de las Lagunillas, s/n, 23071, Jaén, España.

### Resumen

Es evidente que en los próximos años gran parte de las tecnologías recogidas bajo el marco de la denominada Industria 4.0 tendrá un profundo impacto en todas las empresas y entre ellas, en las relacionadas con la explotación y producción de petróleo y gas. La automatización de bajo coste promueve arquitecturas de referencia rentables y nuevos enfoques de desarrollo para aumentar la flexibilidad y la eficiencia de las operaciones de producción en una planta industrial. En este sentido, OPC UA, proporciona acceso local y remoto a la información de planta, facilitando un mecanismo reconocido de integración tanto horizontal como vertical de manera correcta, segura y eficiente. El objetivo principal de este artículo es presentar una arquitectura abierta para la integración vertical basada en sistemas ciber-físicos de producción, configurados bajo la norma IEC 61499 y usando OPC UA, apta para su utilización en la fabricación flexible en la industria de petróleo y gas.

### Palabras Clave:

Industria 4.0, Integración de Sistemas Industriales, Sistemas de Producción Ciber-Físicos, OPC UA, IEC 61499.

### Automation Architecture based on Cyber Physical Systems for Flexible Manufacturing within Oil&Gas Industry

### Abstract

It is clear that in the next few years most of the technologies involved in the so-called Industry 4.0 will have a deep impact on manufacturing companies, including those related to Oil & Gas exploration and production. Low cost automation promotes reference architectures and development approaches aiming at increasing the flexibility and efficiency of production operations in industrial plants. In this sense, OPC UA, in addition to allowing companies to join the Industry 4.0 initiative, provides local and remote access to plant information, enabling a recognized mechanism for both, horizontal and vertical integration in a reliable, safe and efficient way. The contribution of this article is an open architecture for vertical integration based on cyber-physical production systems, configured under IEC 61499 and using OPC UA, suitable to achieve flexible manufacturing within Oil & Gas industry.

### Keywords:

Industry 4.0, Industrial Systems Integration, Cyber-Physical Production Systems, OPC UA, IEC 61499

## 1. Introducción

En el sector de la explotación y producción de Petróleo y Gas, los presupuestos para inversión y las pérdidas por paro de producción resultan costosas; además, las condiciones de trabajo y funcionamiento de los equipos industriales de control son especialmente duras. Trasladando este contexto a la integración de los diferentes sistemas involucrados, unas comunicaciones de confianza y que garanticen una transmisión segura de la información son fundamentales. En la industria del petróleo y gas las diferentes actividades de producción,

control y mantenimiento dependen exclusivamente de tecnologías de la información y sólo con ellas es posible lograr un nivel de operación eficiente. Es por ello que la implantación de este tipo de tecnologías, que en cualquier industria pueden considerarse muy importantes, en este sector industrial juegan un papel fundamental (Zawawi & El-Sayed 2012).

Hoy en día, un campo de petróleo inteligente posee todo tipo de equipamiento, como maquinaria, taladros, sensores, controladores, etc. conectados y compartiendo información continuamente. Una plataforma de producción típica puede manejar más de 40.000 variables que, en principio, son

\*Autor para la correspondencia: mgarcia294@ehu.eus

susceptibles de ser accesibles para utilizar la información que proporcionan. El tratamiento de este complejo flujo de datos requiere de nuevas capacidades cuidadosamente diseñadas que permitan la manipulación, análisis y presentación de datos con objeto de crear una información más depurada. Además, con objeto de tomar mejores decisiones operativas y empresariales, se hace necesario la utilización de herramientas de apoyo capaces de acceder a esa información.

En el sector de la producción de la industria de petróleo y gas la comunicación a nivel de planta es muy importante para determinar la eficiencia de los diversos procesos. Esto hace posible lograr enormes ahorros en costes de producción e implementar economías de escala, posibilitando, además, que la gerencia tenga información, en tiempo real, para sus procesos de toma de decisiones. Los resultados de cualquier acción tomada pueden medirse directamente, identificarse y luego corregirse según sea necesario. A corto plazo, el paradigma de la Industria 4.0 llevará a que la compañías tengan una mezcla de equipos y dispositivos inteligentes, con productos más tradicionales y máquinas que necesitan la comunicación máquina a máquina (Machine to Machine – M2M) para guiar el proceso de integración vertical y horizontal (Sande et al. 2010).

Entre el conjunto de iniciativas que componen la Industria 4.0 una de las tecnologías de mayor proyección es la que se basa en la utilización de Sistemas de Producción Ciber-Físicos (Cyber-Physical Production Systems - CPPS) Los CPPS son dispositivos de control con amplias capacidades de computación y comunicación, tanto local como remota.

De manera añadida, el Internet Industrial de las Cosas (Industrial Internet of Things - IIoT) (Hazarika et al. 2015) define un conjunto de tecnologías para el acceso remoto al sistema productivo. Además, el Internet de Servicios (Internet of Services - IoS) (Rentschler et al. 2016) proporciona mecanismos aptos para ser empleados para la fabricación basada en la nube y virtualización de procesos. Estas tecnologías tendrán un impacto colectivo en todos los aspectos de las empresas manufactureras y se hace necesario introducir estos avances en industrias reales como es la del sector de petróleo y gas (Kim et al. 2014).

Por otra parte, la norma de automatización IEC 61499 (Vyatkin et al. 2015) promueve un marco para el desarrollo basado en modelos para sistemas de control distribuidos. La Industria 4.0 en unión con IEC 61499 permitirá modelar y desarrollar componentes software y hardware para sistemas de control distribuidos de manera independiente. La entidad clave en la norma IEC 61499 es el Bloque de Función (Function Block - FB), que encapsula en un mismo elemento los algoritmos de control y comunicación desarrollados en diferentes lenguajes de programación, incluyendo IEC 61131, Java, C ++ o prácticamente cualquier otro tipo de lenguaje (International Electrotechnical Commission 2014).

El Bloque de Función de Interfaz de Servicio (Service Interface Function Block - SIFB) es uno de los tipos de FBs proporcionados por la norma, que permite encapsular y abstraer al usuario del acceso al hardware, comunicaciones, así como a los recursos de la Interfaz del Programación de Aplicaciones (Application Program Interface - API). En resumen, la tecnología actualmente disponible es lo suficientemente madura como para lograr el objetivo de la comunicación M2M, pero todavía hay una brecha entre la tecnología y las industrias reales.

El uso de estándares como IEC 61499 y arquitecturas basadas en CPPS implicaría un gran avance en las tecnologías de la información permitiendo que la industria de petróleo y gas, en su faceta de integración de comunicaciones a nivel de planta, sea eficaz y eficiente. Esta es la razón por la cual se están llevando a cabo numerosas e intensas investigaciones sobre tecnología de la información en los últimos tiempos y éstas están teniendo un impacto inimaginable en este tipo de industria.

En artículos anteriores de estos autores (Perez et al. 2015) se presentó una arquitectura general para monitorización usando dispositivos CPPS. En dicho trabajo se presenta un enfoque basado en modelos donde se identifican los diferentes elementos necesarios para lograr la integración vertical empleando comunicaciones industriales. El presente trabajo, contribuye a la adaptación de esta arquitectura genérica al caso particular de la industria de producción de petróleo. Esta nueva propuesta de arquitectura basada en CPPS de campo permite la recogida y tratamiento de datos de producción, utilizando el estándar IEC 61499 y el protocolo OPC UA. Además, sirve como fuente de información tanto a equipos consumidores de información como a equipos y aplicaciones de nivel superior.

## 2. Trabajos Relacionados

En esta sección se analizan las investigaciones y trabajos relacionados directamente con las áreas en las cuales se ha utilizado la norma IEC 61499. También se describe el enfoque y alcance de la investigación propuesta en este trabajo desde el punto de vista del desarrollo de una metodología basada en IEC 61499 y en una arquitectura CPPS para la planificación de procesos distribuidos y adaptables a procesos continuos, especialmente en la industria de petróleo y gas.

Durante los últimos años se han ido publicando investigaciones sobre el diseño, uso e implementación de bloques de función empleando la norma IEC 61499 para diferentes aplicaciones de control. La mayoría de estas investigaciones se han limitado a realizar control básico con supervisión de autómatas programables (PLCs) en un proceso industrial. Sin embargo, estos dispositivos tienen la desventaja de que, por diseño, no son capaces de manejar problemas de incertidumbre o el diseño y proceso de planificación a nivel de fábrica en un proceso de producción industrial. De acuerdo con la bibliografía consultada, los sistemas diseñados bajo IEC 61499 tienen un uso limitado para procesos adaptativos y control de sistemas básicos; por este motivo, el objetivo de este trabajo es diseñar e implementar un sistema de control bajo IEC 61499 en un proceso continuo real.

Diferentes trabajos en los que se emplean redes de FBs bajo la norma IEC 61499 cubren aspectos como: el diseño de sistemas autónomos distribuidos con componentes de control inteligentes (Wang et al. 2001), el mantenimiento de sistemas de control distribuido y la ingeniería basada en la web (Schwab et al. 2005), la verificación automatizada de sistemas de control industrial (Querol et al. 2016), la ingeniería de sistemas de soporte (Thramboulidis & Tranoris 2001) y el modelado de sistemas concurrentes reconfigurables (Stambolov & Batchkova 2011).

Respecto de la utilización de la norma IEC 61499 en sistemas de control de procesos, Olsen et al. (Olsen et al. 2005) presentan un trabajo en el que se diseña e integra modelos en tiempo real usando una plataforma basada en Java. En este

trabajo se implementa una aplicación de control que se distribuye a través de dos dispositivos usando el software llamado MANAGER FB, la cual es capaz de proporcionar servicios de gestión para dispositivos de control.

Desde el punto de vista de la ejecución de aplicaciones, es posible encontrar trabajos que describen los elementos de ejecución en tiempo real basados en IEC 61499 dentro de un dispositivo y diferentes enfoques de programación e implementación (Zoitl et al. 2005). Otros trabajos en esta línea intentan resolver las críticas y ambigüedades respecto a comportamientos diferentes en la ejecución de redes de FBs en diversos entornos de ejecución compatibles IEC 61499 (Strasser et al. 2011).

El diseño, implementación y uso de librerías de FBs es otro de las áreas más desarrolladas en el ámbito de la norma IEC 61499. Strasser et al. (2004) implementa el control de un balancín mediante un sistema empotrado y demuestran su uso en un experimento real. (Jain et al. 2002), (Yuan & Ferreira 2004a) y (Yuan & Ferreira 2004b) desarrollan una aplicación utilizando IEC 61499 denominada EMBENCH que permite un entorno de diseño para simulación y prototipado rápido en diferentes niveles para sistemas de control de mecanizado. Hussain & Frey (2004) presentan un ejemplo de cómo se puede utilizar IEC 61499 para modelar una aplicación distribuida, flexible y reconfigurable.

Sin embargo, hasta el momento, los diferentes trabajos sobre la norma IEC 61499 se han centrado en los procesos de control discreto. En este trabajo se da un paso adelante y se presenta la utilización de la norma IEC 61499 para la monitorización de procesos analógicos realizando una integración de planta empleando protocolos de comunicaciones industriales.

Desde la introducción de la norma IEC 61499, la utilización de redes de FBs para la planificación de procesos ha surgido como un enfoque innovador en los sistemas de fabricación. Con el nuevo estándar, los FBs pueden ser activados por eventos para ejecutar algoritmos internos de una manera controlada. Esta característica abre nuevos escenarios de aplicaciones interesantes. La posibilidad de manejar los cambios durante la generación y ejecución de los planes de proceso, así como la vinculación con la programación para un rendimiento óptimo del sistema, son efectos desafiantes de la naturaleza distribuida y modular de la tecnología basada en redes de FBs.

Desde la perspectiva de la aplicación de redes de FBs para la planificación de procesos, Wang et al. (2008) describen una aplicación de ensamblaje donde se identifican las características del montaje de componentes (pares de componentes de acoplamiento) y se asignan los FBs apropiados para su correcto uso. Cada FB posee un conjunto de algoritmos para determinar cómo realizar una operación de montaje la cual puede ser realizada por un robot o un trabajador humano. Con el fin de facilitar el diseño de FBs, en Wang et al. (2009) se desarrolla una aplicación para diseñar FBs, la cual permite la generación de planes de procesos adaptativos y que es capaz de encapsular planes de procesos genéricos en FBs para ejecución en entornos de ejecución específicos.

Otro artículo interesante es el propuesto por Vicaire et al. (2012) en el cual se proponen metodologías de programación para CPPSs basadas en modelos. Esta metodología es llamada

“Bundle” y puede resultar adecuada para modelar tanto dispositivos de nivel de planta como sensores y actuadores. Sin embargo, no se atiende a compatibilidad con normas de automatización tales como IEC 61499 o IEC 61131.

En resumen, estos trabajos coinciden en la búsqueda de técnicas y metodologías novedosas para producir sistemas distribuidos, principalmente bajo la norma IEC 61499, pero no se centran en la integración mediante un protocolo de comunicación útil en fábricas inteligentes, tal como es OPC UA.

Stojmenovic (2014) considera la comunicación M2M como una tecnología clave para CPPS. El autor determina que el principal problema en todos los trabajos hasta la fecha en el ámbito de la comunicación M2M se basan en modelos a pequeña escala y soluciones centralizadas. En este sentido, propone un cambio de paradigma y sugiere que los nodos también deben tomar decisiones basadas en el conocimiento local, en lugar de solo el reenvío de mensajes al sistema central. La utilización de este enfoque en sistemas de producción permitiría una fácil vinculación de los datos de planta, a partir de un conjunto de variables que se transmiten de una manera segura y en donde el control industrial se realiza de manera local. Sin embargo, en este trabajo no se menciona cuáles podrían ser las ventajas de aplicar esta arquitectura con normas creadas para su aplicación en sistemas distribuidos o, desde el punto de vista de las comunicaciones, la utilización de normas como OPC UA que podrían brindar comunicaciones seguras.

Otros trabajos de investigación previos de los autores (García et al. 2014, 2015) se refieren al diseño e implementación de CPPS de bajo coste bajo la norma IEC 61499. Sin embargo, anteriormente no ha sido tratada la integración entre servidores OPC UA y protocolos de comunicación industrial propietarios. El servidor OPC UA propuesto en este trabajo está concebido para un sistema de automatización de una industria real como es el petróleo y gas y modelado sobre un entorno XML.

### 3. Arquitectura CPPS

La arquitectura preliminar de este trabajo se presentó en (Perez et al. 2015). La Figura 1 representa el escenario general para el proceso de monitorización empleando dispositivos CPPS. Esta arquitectura se compone de un conjunto de componentes que gestionan un conjunto de modelos que representan el mundo físico, el intercambio de información, así como la información que debe ser recogida de la planta.

El mundo físico, entendido como el proceso de producción, se llama Modelo de Procesos de Producción (en inglés Production Process Model o PPM).

Este modelo está compuesto por los datos accesibles, generados en el proceso de producción (fuente de datos), y también de los dispositivos inteligentes pertenecientes a la planta que son responsables de transmitir los valores de los datos en tiempo real (proveedores de datos).

La planta física, incluyendo las variables del proceso, se define mediante el denominado Modelo de Topología de Planta (en inglés Plant Topology Model o PTM). Este modelo recoge los componentes físicos de la planta. El PTM representa la disposición de los componentes en la planta. Debe ser suficientemente genérico para describir cualquier proceso

productivo, aunque puede personalizarse para ajustarse al interés de la empresa.

Los dispositivos proveedores de datos, que son controladores de procesos y/o dispositivos inteligentes que ofrecen datos de proceso y sus características, se definen en el denominado Modelo de Dispositivos Inteligentes de Planta (en inglés Plant Intelligent Devices Model o PIDM). Adicionalmente, se tiene el Modelo de Información de Planta (en inglés Plant Information Model o PIM), corresponde a los requisitos de usuario para monitorización que pueden definirse a partir del PTM especificando las variables de proceso, así como el tipo de acceso.

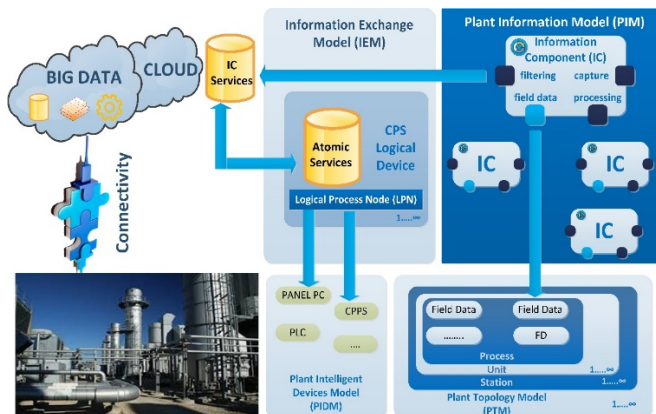


Figura 1: Arquitectura General para dispositivos CPPS

Otro modelo importante es el Modelo de Intercambio de Información (en inglés Information Exchange Model o IEM), que procesa los requisitos de usuario para la supervisión y es el responsable del acceso a los datos apropiados de los dispositivos del proceso industrial. El IEM se compone de tres entidades diferentes: (i) Servicios Atómicos (en inglés Atomic Services o AS): conjunto de servicios básicos que realizan la adquisición de datos y cualquier proceso relacionado. (ii) Nodos de Proceso Lógicos (en inglés Logical Process Nodes o LPN) que hacen accesible cierta información de la planta de producción (PPM). Cada LPN hace referencia al dispositivo inteligente donde se despliegan los servicios para acceder a los datos del proceso. (iii) Dispositivos Lógicos CPS (en inglés CPS Logical Devices o CPSLD): Son los dispositivos inteligentes del PPM donde se despliega la arquitectura del proceso

Finalmente, el modelo PIM define la información del proceso accesible por el usuario. Esta información está estructurada en los llamados Componentes de Información (en inglés Information Components o IC). Los IC son los mecanismos que permiten acceder a información generada a partir de datos de planta. Están compuestos a partir de un conjunto de servicios atómicos proporcionados por los Nodos Lógicos de los CPS (CPSLD) los cuales manejan los datos de campo del proceso (en inglés Field Device o FD). El usuario define los ICs mediante servicios de configuración. Una vez creado e iniciado, un IC ofrece un único servicio (en inglés Information Component Services o ICS) que es responsable de implementar la funcionalidad del IC. El IC más simple es el acceso mínimo a la planta, por ejemplo, el acceso de lectura a datos de campo de un proceso (que está asociado a un LPN). Este es un modelo orientado al usuario, por lo que las aplicaciones cliente remotas son responsables de definir los

servicios. La Figura 2 muestra la estructura conceptual del Modelo de Intercambio de Información donde se indican diferentes funcionalidades de los servicios atómicos para adquisición y pre-procesamiento, y como se refieren a datos de campo pertenecientes a procesos recogidos en el Modelo de Topología de Planta.

Dentro del campo de la producción de petróleo, las empresas suelen estar geográficamente distribuidas en varias regiones de un país; Por lo tanto, el acceso remoto al proceso es de vital importancia para monitorizar todo el proceso o tomar decisiones que pueden afectar a diferentes localizaciones de producción. De hecho, las compañías de producción de petróleo suelen estar compuestas de múltiples bloques de producción petrolera, denominados Well-Pad, los cuales se refieren a una superficie que contiene los pozos petroleros perforados horizontalmente para disminuir el impacto ambiental. El beneficio adicional de una plataforma de perforación es que los operadores pueden perforar múltiples pozos en un tiempo más corto de lo que podrían con sólo un pozo por localización.

Cada pozo de petróleo, tiene un sensor de fondo que recoge medidas de presión, temperatura y vibración para una identificación precisa, diagnóstico y análisis de problemas de operación de equipos y cambios en las condiciones del yacimiento.

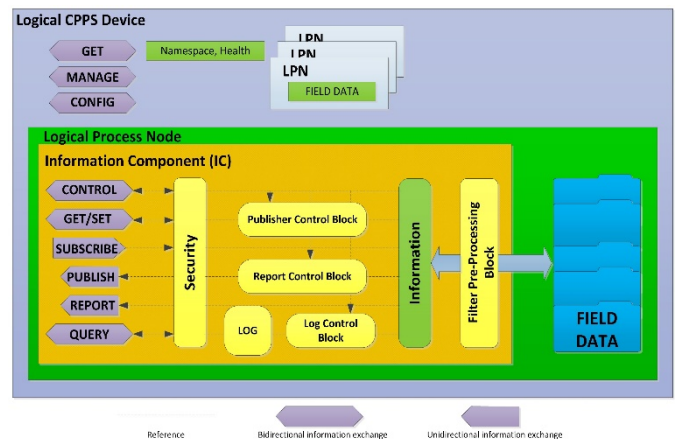


Figura 2: Estructura conceptual del IEM

Concretamente, el crudo se extrae del fondo de los pozos por bombeo electrosumergible o bombeo hidráulico y una vez en la superficie se recoge este crudo en una tubería central llamado *manifold* de producción. Es aquí, en el *manifold*, donde se recoge el crudo de todos los pozos que constituyen un Well-pad (véase la Figura 3).

El proceso de extracción del crudo termina cuando el crudo se envía por bombeo al Centro de Instalaciones de Producción (en inglés *Central Processing Facility* o CPF) desde los Well-pads. El CPF se compone de varios equipos, uno de los más importantes es el denominado "Separador de Crudo", el cual es un recipiente de presión utilizado para separar trifásicamente el crudo, en este equipo se obtienen por separado el petróleo, el agua de formación y gas. Posteriormente, el petróleo se envía a otros procesos como el de "Almacenamiento en Tanques" para su posterior bombeo a otras empresas de refinación o exportación. Al mismo tiempo, parte del gas se deshidrata en otro equipo denominado

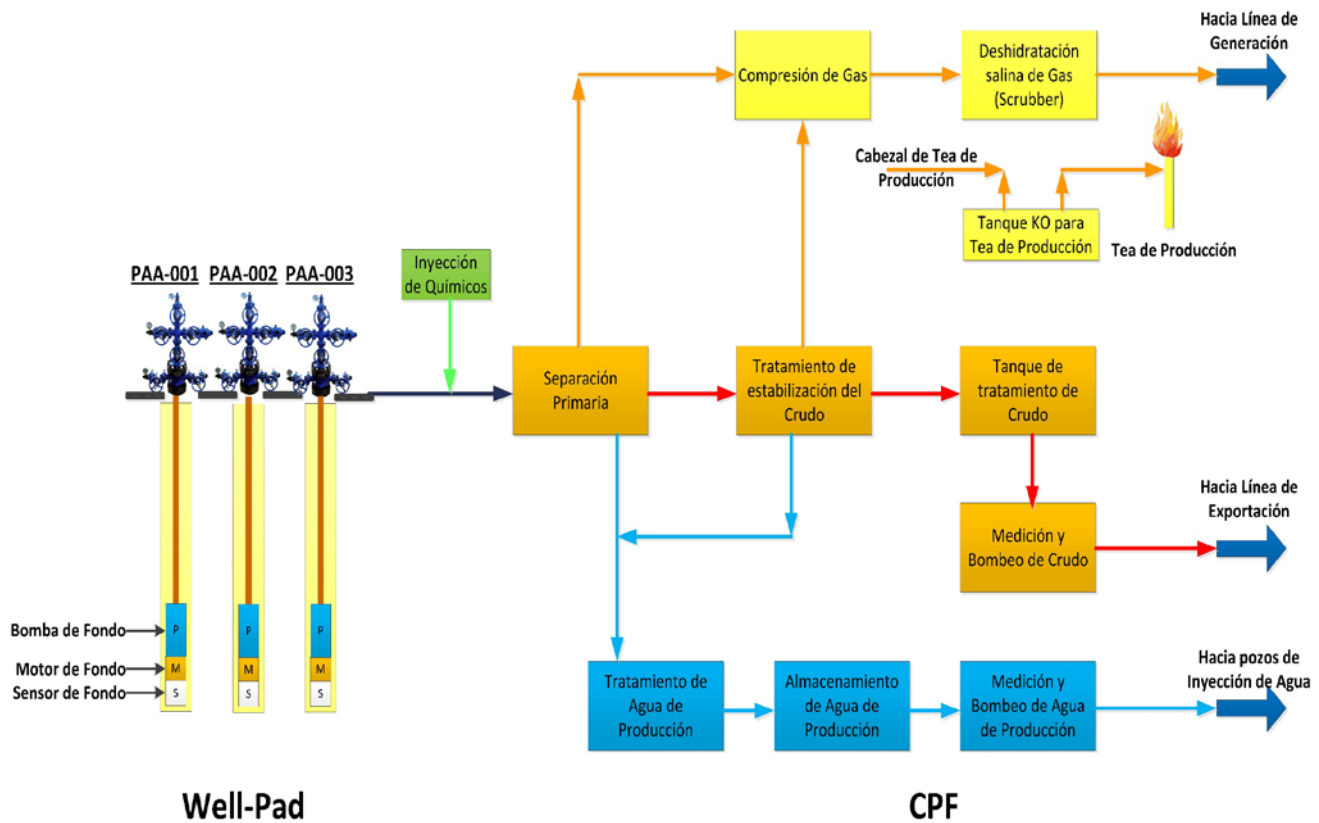


Figura 3: Proceso de Producción de Crudo

Scrubbing para su posterior uso en turbinas para generación eléctrica o para quemarse en tareas de producción.

El agua de formación obtenida es reinyectada al yacimiento de producción usando pozos de reinyección de agua (posee subprocesos como almacenamiento de agua y reinyección de agua). Las bombas de reinyección de agua son una de las tecnologías clave que las empresas de producción de petróleo y gas utilizan para aumentar las tasas de recuperación del petróleo; ha demostrado ser uno de los métodos más económicos para el manejo de yacimientos. Esta tecnología puede ser valiosa para ayudar a mantener la presión del yacimiento, mejorar la producción de reservas de hidrocarburos y reducir el impacto ambiental.

#### 4. Implementación y Propuesta

##### 4.1. Norma IEC 61499

La norma IEC 61499 define un modelo genérico basado en Bloques de Función (FBs) para sistemas de control distribuidos y automatización industrial. Los cuatro modelos que proporciona la norma son: Modelo de Bloque de Función, Modelo de Aplicación, Modelo de Recurso y Modelo de Dispositivo, mostrados en la Figura 4 (GmbH 2010).

El modelo de FB es el modelo básico y elemental del estándar. El Bloque de Función es una entidad funcional, que tiene entradas/salidas de eventos; así como entradas/salidas de datos. En esta entidad se encapsulan los algoritmos de control o comunicación de manera que resultan transparentes para el usuario.

Un FB recibe eventos y/o datos en sus interfaces de entrada. Usando los algoritmos internos procesa esta información y genera

eventos y/o datos de salida. El orden de cómo se ejecutan los eventos de entrada y/o salida y los algoritmos de control o comunicación se realizan usando el Diagrama de control de ejecución (en inglés *Execution Control Chart* o *ECC*) que es similar a una máquina de estados. Los FB básicos pueden unirse para formar Sub-Aplicaciones o FBs Compuestos (en inglés *Composed Function Blocks* o *CFB*) que pueden representar funciones complejas. Las funciones para acceder a los recursos de los dispositivos, como pueden ser los protocolos de comunicación para el intercambio de datos, se modelan usando los Bloques de Función de Interfaz de Servicio (en inglés *Service Interface Function Blocks* o *SIFBs*) (Zoitl et al. 2005).

En la arquitectura de la norma IEC 61499, se pueden construir otros modelos basados en FBs. Por ejemplo, el Modelo de Aplicación está constituido por una red de FBs, cuyos nodos son FBs, CFBs y/o SIFBs, y cuyas ramas son conexiones de eventos/datos. El Modelo de Recurso está compuesto por una o más interfaces de "aplicación local" y de comunicación. El Modelo de Dispositivo contiene una o más interfaces (interfaz de comunicación o interfaz de proceso) y uno o más recursos

La arquitectura basada en redes de FBs para dispositivos de control permite un enfoque de diseño estructurado modular, lo que permite un proceso de desarrollo sea más simple y eficiente. Sin embargo, dado que la norma IEC 61499 presenta un modelo de referencia conceptual genérico, si se desea una perspectiva de aplicación orientada a objetos es necesario establecer un modelo derivado para la clase FB.

##### 4.2. Arquitectura CPPS basada en IEC 61499

En el modelo propuesto para una arquitectura CPPS no se especifican funciones detalladas para cada modelo de la arquitectura y tampoco los tipos de los datos relacionados con esas funciones. Por lo tanto, para obtener datos de los diferentes

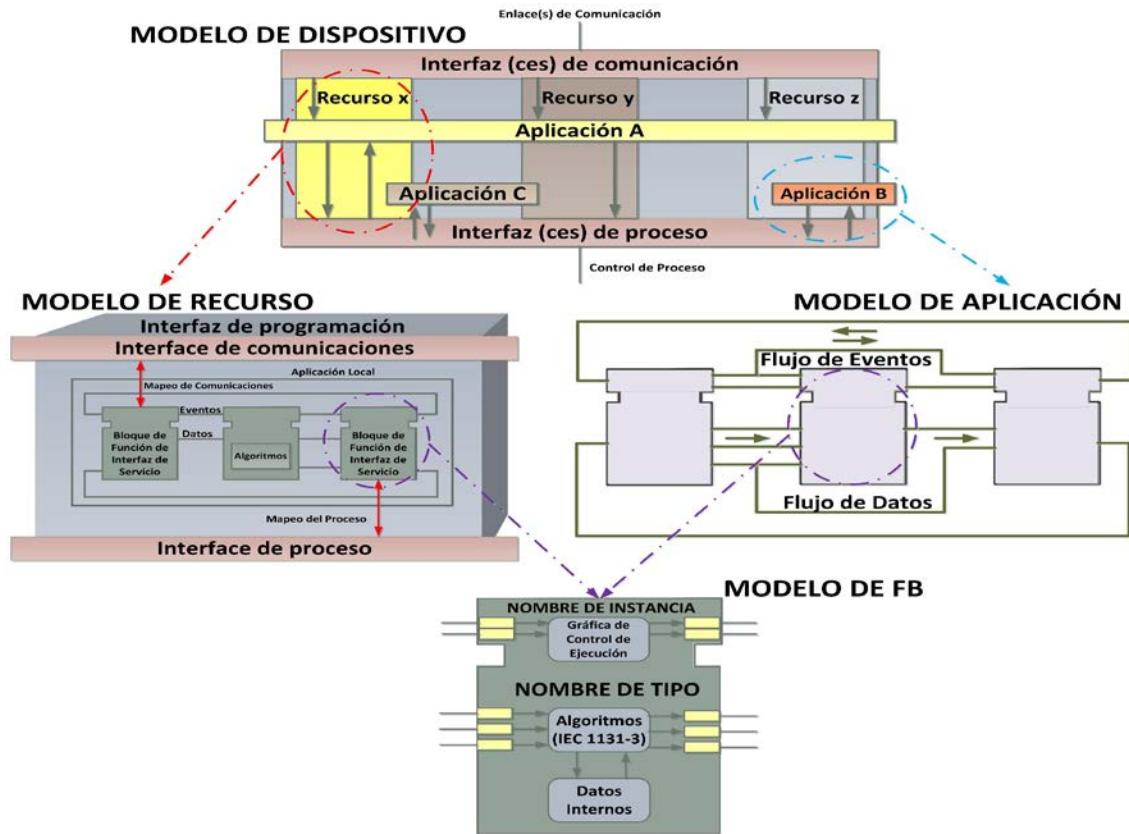


Figura 4: Modelos de la Norma IEC 61499

modelos en la arquitectura CPPS es necesario utilizar protocolos de comunicación. En este trabajo se propone la utilización del estándar de comunicación ofrecido por OPC UA. Este supone una alternativa prometedora ya que entre sus ventajas destaca una arquitectura orientada a servicios, ofreciendo seguridad de datos y modelado de información de manera robusta.

Por otra parte, el modelo IEC 61499 está diseñado para fines generales y, por lo tanto, necesita alguna modificación antes de ser implementado en aplicaciones reales.

Debido a ello, tiene sentido combinar los dos modelos para, de esta manera, implementar con redes de FBs una arquitectura CPPS flexible. La arquitectura CPPS propuesta integra componentes estándar y reutilizables, tales como servicios de comunicación basados en OPC UA, algoritmos de control, software, etc. La arquitectura basada en redes FBs también es deseable para diseñar, desarrollar e implementar CPPSs altamente rentables en industriales reales. La Tabla 1 presenta las relaciones que permite combinar elementos de ambas arquitecturas.

### 4.3. OPC-UA

OPC UA representa la evolución de anteriores normas (OPC clásico) como OPC-DA, OPC-A&E y OPC HDA con el fin de

proporcionar una arquitectura abierta e independiente de proveedor (van der Linden et al. 2011). Con el fin de solucionar los problemas de portabilidad de las normas anteriores, OPC UA emplea una pila de comunicación que permite ser utilizada directamente en los sistemas de automatización. OPC UA proporciona un medio adecuado para una comunicación fiable, robusta y de alto rendimiento para aplicaciones industriales de automatización. Además, OPC UA puede ser integrado en dispositivos empotrados como, por ejemplo, los que pueden constituir CPPSs.

El OPC clásico no era capaz de representar adecuadamente los problemas esenciales del mundo conectado actual en ambientes industriales, debido, fundamentalmente, a problemas derivados de los tipos de datos, el modelado de información y las relaciones entre los elementos proveedores de datos y los sistemas de control. OPC UA va más allá de ser un medio de transporte, ya que incluye un mecanismo de modelado capaz de soportar los posibles modelos para una planta industrial. OPC UA ofrece acceso a la información a través de modelos de planta (Claassen et al. 2011). El uso de la arquitectura propuesta por OPC UA permite una descripción completa de los datos del sistema, independientemente de su complejidad. Este enfoque introduce el concepto de modelo de proceso para una mejor adaptación a las necesidades de las aplicaciones industriales modernas.

En el ámbito de la fabricación, las tecnologías de la información deben integrarse con la ingeniería de control de procesos. Para ello, los sistemas deben ser interoperables, lo que requiere el intercambio de información en todo el proceso de producción. Por este motivo, el concepto de Espacio de Direcciones en un servidor OPC UA es de gran importancia. Bajo este concepto, se incluye el conjunto de objetos pertenecientes a la planta industrial que el servidor pone a disposición de los clientes. Estos objetos representan, entre otras cosas, los datos del

Tabla 1: Relación entre los modelos de la arquitectura CPPS e IEC 61499

ARQUITECTURA CPPS	MODELO IEC 61499
<i>Physical Device</i>	Dispositivo
<i>Logical Device (LD)</i>	Recurso
<i>Logical Process Node (LPN)</i>	CFB
<i>Information Component (IC)</i>	CFB
<i>Data Object</i>	FB Básico, SIFB
<i>Atomic Services</i>	FBs, CFB

proceso en tiempo real. En conjunto, el concepto del Espacio de Direcciones permite representar tanto el entorno del proceso industrial como el comportamiento del mismo en tiempo real, mutuamente comprensibles por diversos sistemas externos (Claassen et al. 2011)

Normalmente, un perfil para OPC UA está diseñado para la integración vertical de sistemas de automatización y control industrial. El uso de una arquitectura OPC UA permite una descripción completa de cualquier dato del sistema de automatización, independientemente de su complejidad. Es posible que no se necesiten todas las opciones anteriormente descritas para la implementación en la mayoría de CPPS. En este sentido, la información descrita en el Espacio de Direcciones del servidor OPC UA puede ser suficiente para la mayoría de los sistemas industriales.

### 5. Conjunto de SIFBs para OPC UA

Para la creación de los SIFBs se ha empleado la infraestructura proporcionada por 4DIAC. En esta infraestructura compatible IEC 61499 se distinguen dos elementos: un entorno de edición, carga y depurado de aplicaciones denominado 4DIAC-IDE y un entorno de ejecución (runtime) denominado 4DIAC-RTE, FORTE (4DIAC 2017).

En este trabajo se han desarrollado un conjunto de SIFBs que encapsulan las operaciones que ofrecen servicios de OPC UA.

#### 5.1. SIFB OPCUA\_SERVER

Mediante la utilización de este SIFB es posible gestionar la configuración y el funcionamiento de un servidor OPC UA. El servidor OPC UA se configura empleando un archivo en formato XML (Figura 5). Este archivo incluye todos los parámetros esenciales para el servidor OPC UA como la dirección URL, el identificador URI, nombre del proveedor, el nombre del servidor, la versión, etc. Además, este archivo de configuración declara lo siguiente:

```
<OPCUAServerConfig Comment="OPCUAMdk Test Server Configuration - Test 04">
  <Identification ApplicationDomain="ThinkingFactory" Description="OPCUA server configuration model" />
  <NodeTypes>
  </NodeTypes>
  <NodeInstances>
  </NodeInstances>
  <FieldDevices>
    <FieldDevice Name="WPA01" Type="ModbusTCP">
      <UpdateTime>200</UpdateTime>
      <IPAddress>192.168.2.100</IPAddress>
      <Rack>3</Rack>
      <Slot>2</Slot>
      <FieldData Name="TIT-WPA01-01" Type="DOUBLE" AccessLevel="MANDATORY" Address="%IB0" />
      <FieldData Name="TIT-WPA01-02" Type="DOUBLE" AccessLevel="MANDATORY" Address="%IB1" />
      <FieldData Name="TIT-WPA01-01" Type="DOUBLE" AccessLevel="MANDATORY" Address="%IB2" />
      <FieldData Name="PT-BESPA1-01" Type="DOUBLE" AccessLevel="MANDATORY" Address="%IB3" />
      <FieldData Name="PT-BESPA1-02" Type="DOUBLE" AccessLevel="MANDATORY" Address="%IB4" />
      <FieldData Name="TT-BESPA1-01" Type="DOUBLE" AccessLevel="MANDATORY" Address="%IB5" />
      <FieldData Name="TT-BESPA1-03" Type="DOUBLE" AccessLevel="MANDATORY" Address="%IB6" />
      <FieldData Name="VT-BESPA1-01" Type="DOUBLE" AccessLevel="MANDATORY" Address="%IB7" />
    </FieldDevice>
  </FieldDevices>
  <DataMappings>
  </DataMappings>
</OPCUAServerConfig>
```

Figura 5: Configuración de Dispositivos de Campo

a) **Espacio de Direcciones (NodeTypes, NodeInstances):** Esta sección declara los nodos OPC UA (tipos e instancias) que constituyen el modelo de información correspondiente a los nodos lógicos de proceso (LPNs), así como los datos lógicos de proceso (tags) disponibles en cada uno de los nodos. A su vez esta sección se compone de dos grupos de elementos: (i) Tipos de Nodos (NodeType), aquí se declaran los Tipos de Objetos (ObjectTypes) y los Tipos de Variables de Datos (DataVariableTypes) asociados a ellos. (ii) Los elementos de las Instancias de Nodos (NodeInstance) están incluidos en las

Instancias de Objetos (ObjectInstances) – estas son instancias que ya han sido declaradas en los Tipos de Objetos (ObjectTypes) – y las Variables de Datos (DataVariables) los cuales son instancias de los Tipos de Variables (DataVariableTypes). Las Instancias de Objetos (ObjectInstances) constituyen los LPNs, mientras que las Instancias de Variables (DataVariables) constituyen los tags asociados a los LPNs.

- b) **Dispositivos de campo (FieldDevices):** En esta sección se agrupan las definiciones de los dispositivos de campo a los que tiene acceso el servidor. También se definen los datos de proceso (FieldData) suministrados por cada dispositivo. Los dispositivos de campo se caracterizan por el protocolo de comunicación o el mecanismo de acceso a los datos de proceso, y la información relacionada con el mismo.
- c) **Mapeo de Datos (DataMapping):** En esta sección se definen las relaciones existentes entre las variables de datos (DataVariables) ya declaradas la sección del Espacio de Direcciones y sus correspondientes datos de proceso (FieldData) de los dispositivos de campo (FieldDevice).

Además de eventos comunes a SIFBs en la norma IEC 61499 como INIT, REQ, INITO y CNF (Figura. 6), el SIFB OPCUA\_SERVER también presenta los siguientes parámetros de entrada y salida:

- **QI (BOOL):** Este dato de entrada trabaja conjuntamente con el evento INIT para conectar o desconectar el servidor OPC UA. Si se solicita el evento INIT, y si QI es VERDADERO (TRUE), el servidor OPC UA intenta conectar; si QI es FALSO (FALSE), el servidor OPC UA finaliza su ejecución.
- **CONFIGFILE (WSTRING):** Contienen el nombre completo del archivo XML de configuración.
- **QO (BOOL):** Informa sobre el resultado del último proceso ejecutado.
- **STATUS (STRING):** Ofrece información del estado del servidor.

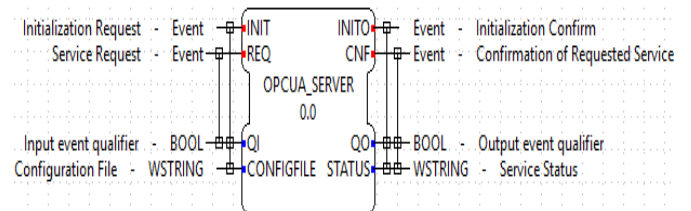


Figura 6: SIFB OPCUA\_SERVER.

#### 5.2. SIFB SERVER OPC UA Dinámico

Este SIFB permite realizar la comunicación OPC UA usando la capa nativa de comunicación de IEC 61499 denominada FORTE CommLayer. Esta interface de comunicación de red ha sido diseñada para ser lo más flexible posible. Los pasos básicos para diseñar esta interface parten de implementar el protocolo OPC UA con librerías desarrolladas en C++ que permitan interactuar con el diseño estándar dado por la norma. El bloque de función y la capa de comunicación implementada se relacionan usando los siguientes entradas y salidas de datos implementadas en el SIFB (Figura 7):

- **ID (WSTRING):** Es una entrada del SIFB que sirve para realizar la implementación de todas las propiedades del protocolo OPC UA. Al ser una cadena de caracteres se ingresan los siguientes parámetros: Nombre del Servidor (Server name) [o] – svr:<servername>; Dirección del archivo

de configuración (*Configuration file*) [m] – cnf:<configfile>; Nombre del Dispositivo de Campo (*Field device*) [o] – fd:<fdname,driver,params,...>; Variable del Proceso (*Process Tag*) [o] – tg[num]:<proctag>

- **SD** (ANY): Permite escribir el valor en el espacio de direcciones del servidor OPC UA. Es un parámetro de memoria (*parameter - memory tag*) [o] – sd[num]:<memtag>
- **RD** (ANY): Dato que proporciona el servidor al cual éste está conectado. Al igual que en la entada anterior este parámetro es de memoria (*parameter memory tag*) [o] – rd[num]:<memtag>

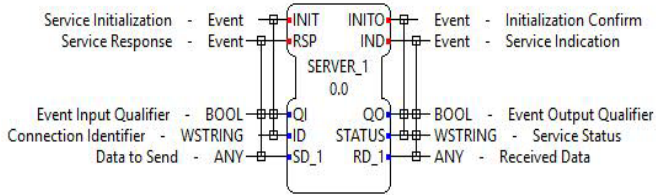


Figura 7: SIFB SERVER OPC UA dinámico

5.3. SIFB OPCUA\_CLIENT\_READ

Este SIFB permite implementar un cliente OPC UA capaz de consultar de manera síncrona variables de un servidor OPC UA.

Además de los eventos comunes, este SIFB presenta los siguientes parámetros de entrada y salida (Figura. 8):

- **URLSERVER** (WSTRING): Indica la URL del servidor OPC UA.
- **DATANAME** (WSTRING): Nombre de la variable a acceder en el servidor OPC UA.
- **RD** (ANY): Valor del dato que devuelve el servidor OPC UA al cual el cliente está conectado. El tipo de este parámetro es ANY para mejorar su reutilización en cualquier tipo de aplicación.
- **SOURCETIMESTAMP** (DATE AND TIME): Indica la información de tiempo asociada al elemento en el recurso de origen.
- **SERVERTIMESTAMP** (DATE AND TIME): Indica la información de tiempo asociada al elemento en el servidor OPC UA.

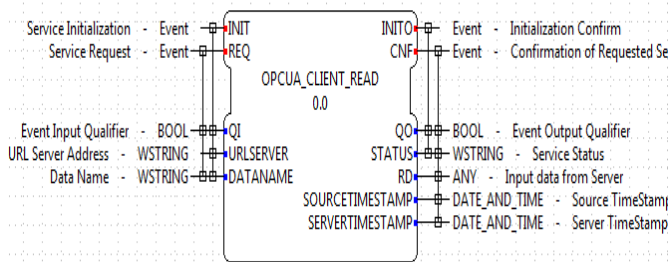


Figura 8: SIFB OPCUA\_CLIENT\_READ

5.4. SIFB OPCUA\_CLIENT\_WRITE

Mediante este SIFB (Figura. 9) se crea un cliente para la escritura síncrona de variables en su servidor OPC UA. Presenta los siguientes parámetros:

- **TYPE** (WSTRING): Expresa el tipo del dato para el valor que se va a escribir en el servidor OPC UA.

- **SD** (ANY): Indica el valor del dato a escribir. Como en el SIFB anterior, el tipo de este parámetro es ANY con el fin de aumentar la generalidad.

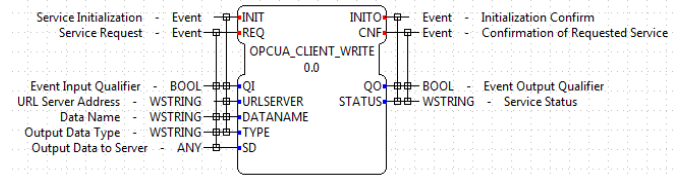


Figura 9: SIFB OPCUA\_CLIENT\_WRITE

5.5. SIFB OPCUA\_CLIENT\_SUBSCRIBE

Además de los servicios de lectura y escritura síncrona, OPC UA permite el mecanismo de suscripción. La suscripción mantiene una copia local de los parámetros del elemento a ser supervisado. Estas copias locales pueden ser alteradas mediante la actualización de sus propiedades sin afectar el estado en el servidor. Para implementar este mecanismo se ha creado un SIFB (Figura 10) que permite crear clientes que realizan suscripción para monitorizar variables de servidores OPC UA. Los parámetros de entrada y salida de este SIFB son:

- **MODE** (WSTRING): Se permiten dos modos para monitorizar las variables del servidor OPC UA: “REPORTING” y “SAMPLING”.
- **PERIOD** (ULINT): Fija el período de muestreo en milisegundos para los elementos en modo de muestreo.
- **RD** (ANY): Proporciona el valor de los elementos monitorizados suministrados por el servidor OPC UA-
- **SOURCETIMESTAMP** (DATE AND TIME): Indica el Timestamp asociado al elemento del recurso de origen.
- **SERVERTIMESTAMP** (DATE AND TIME): Muestra el Timestamp asociado al elemento del servidor OPC UA.

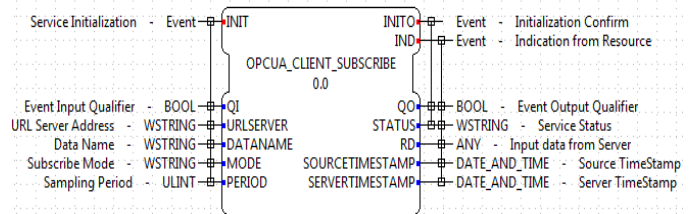


Figura 10: SIFB OPCUA\_CLIENT\_SUBSCRIBE

6. Caso de Estudio

El caso de estudio se centra en Petroamazonas EP, empresa pública ecuatoriana dedicada a la exploración y producción de hidrocarburos. Está a cargo de la operación de 21 Bloques, ubicados en la cuenca del Oriente y en la zona del Litoral de Ecuador.

Debido a la inviabilidad de implementar el sistema en todos los bloques, el diseño se ha simplificado hacia el conjunto de wellpads de un Bloque específico. En nuestro caso se ha seleccionado el Bloque 18. En este Bloque existen en la actualidad 4 wellpads y cada uno de ellos agrupa aproximadamente entre 28 a 30 pozos de crudo. El ejemplo tiene por objeto obtener las variables de un pozo de producción, en concreto, se refiere al pozo PAA-001 cuyo esquema se muestra en la Figura. 11.



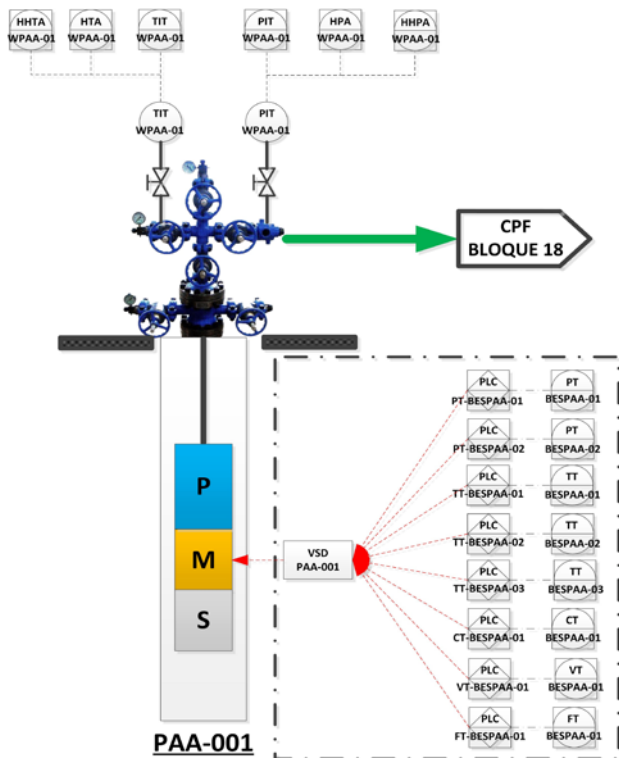


Figura. 11: Plano P&ID del Sistema ESP y cabeza de pozo (xmas wellhead)

La cabeza del pozo denominada árbol de navidad (x-mas wellhead), etiquetada como PAA-01-01, posee de dos transmisores indicadores: el TIT-WPAA01-01 que indica la temperatura y el PIT-WPAA01-01 la presión del crudo extraído. Asimismo, cuenta con una válvula de emergencia de producción, la SDV-WPAA01-01.

Debido a que las presiones naturales de los yacimientos en Ecuador no brindan una presión suficiente para que el crudo llegue a superficie, cada pozo utiliza un sistema de bombeo electro-sumergible BESPAA1, que se corresponde con el elemento M de la Figura. 11, el equipo BES posee dos transmisores de presión: el PT-BESPAA1-01 para la presión de entrada de la bomba (*intake*) y el PT-BESPAA1-02 para la presión de descarga de la bomba (*exhaust*); tres transmisores de temperatura: el TT-BESPAA1-01 para la temperatura del fluido, el TT-BESPAA1-02 para la del motor y el TT-BESPAA1-03 para la del fluido de salida; un sensor que mide la corriente del motor, CT-BESPAA1-01; la tensión del motor se mide mediante VT-BESPAA1-01 y el FT-BESPAA1-01 indica el valor de la frecuencia del variador de frecuencia, VSD.

Además, el núcleo del sistema ESP está compuesto por un motor (M-WPA01-1), bomba multi-etapa (P-WPA01) y un variador de velocidad VSD (VSD-WPA01). La Figura 12 muestra el sistema de comunicación actual en el que se encuentra el servidor OPC UA.

El diseño y desarrollo de un ICs es un proceso estructurado, pero simple, si se siguen los siguientes pasos: *Paso 1*) Descomponer el proceso de adquisición de las variables de campo de una manera detallada y jerárquica para poder ser representada con los FBs desarrollados para OPC UA y los existentes de la norma IEC 61499. *Paso 2*) Seleccionar los FBs correspondientes de la biblioteca de OPC UA o los FB estándares para todas las sub-funciones diseñadas en el paso

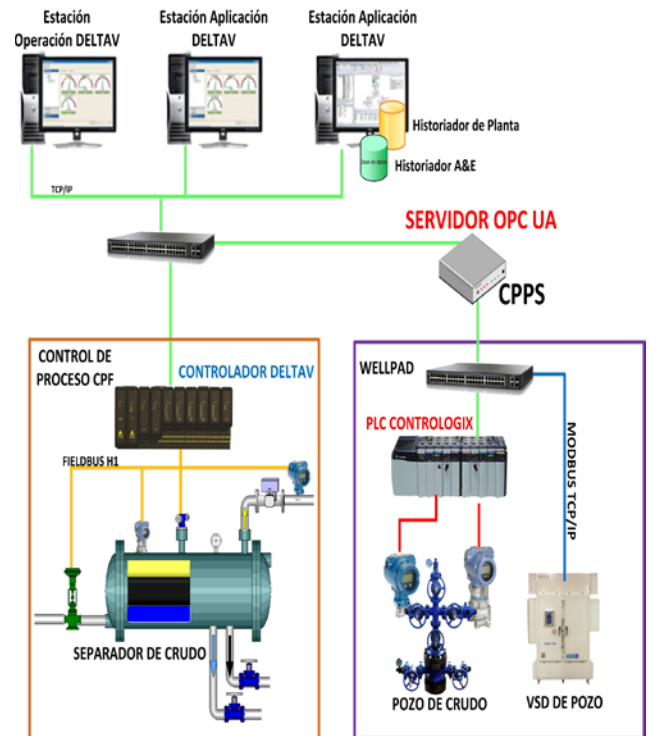


Figura. 12: Sistema de comunicación simulado para el proceso de separación y extracción de crudo

anterior, luego se deben crear las instancias de los FB seleccionados, configurar sus parámetros y conectar estos FB con flujo de datos y flujo de eventos. Paso 3) Validar todo el modelo de ICs para evitar errores. Paso 4) Integrar los componentes físicos a los ICs y realizar pruebas completas de comunicación de los diferentes tags.

Como ejemplo de caso de estudio, se muestra el diseño de un IC usando los FBs estándar y FBs para comunicación OPC UA desarrollado en este trabajo. La Figura 13 muestra la arquitectura e una red de FBs del IC. El IC consta de tres módulos principales: i) el servidor estático de OPC UA, el cual, lee la configuración del mismo en formato XML; ii) la creación dinámica de nuevas etiquetas a variables del proceso utilizando el FB servidor que utiliza la capa de comunicación de FORTE y, si se requiere, utilizar FBs de Servicios Atómicos (Almacenamiento de Datos, Reporte de Datos, Lectura de Datos, etc.) y iii) finalmente, una vez creados los ICs, se debe realizar integración de servicios de comunicación con los dispositivos de campo utilizando los FBs clientes (Escribir, Leer, Suscribirse) de OPC UA.

## 7. Conclusiones

Este trabajo presenta una aproximación al acceso a datos de campo en sistemas de control de procesos utilizando servidores OPC UA en arquitecturas CPPS de bajo costo utilizando aplicaciones bajo la norma IEC 61499. En este caso, la aplicación de esta arquitectura se ha dirigido hacia la industria de petróleo y gas.

El uso de este tipo de arquitecturas ayuda a introducir elementos novedosos sobre CPPS dentro del paradigma de la Industria 4.0. La arquitectura propuesta proporciona una infraestructura M2M para las comunicaciones a nivel de planta

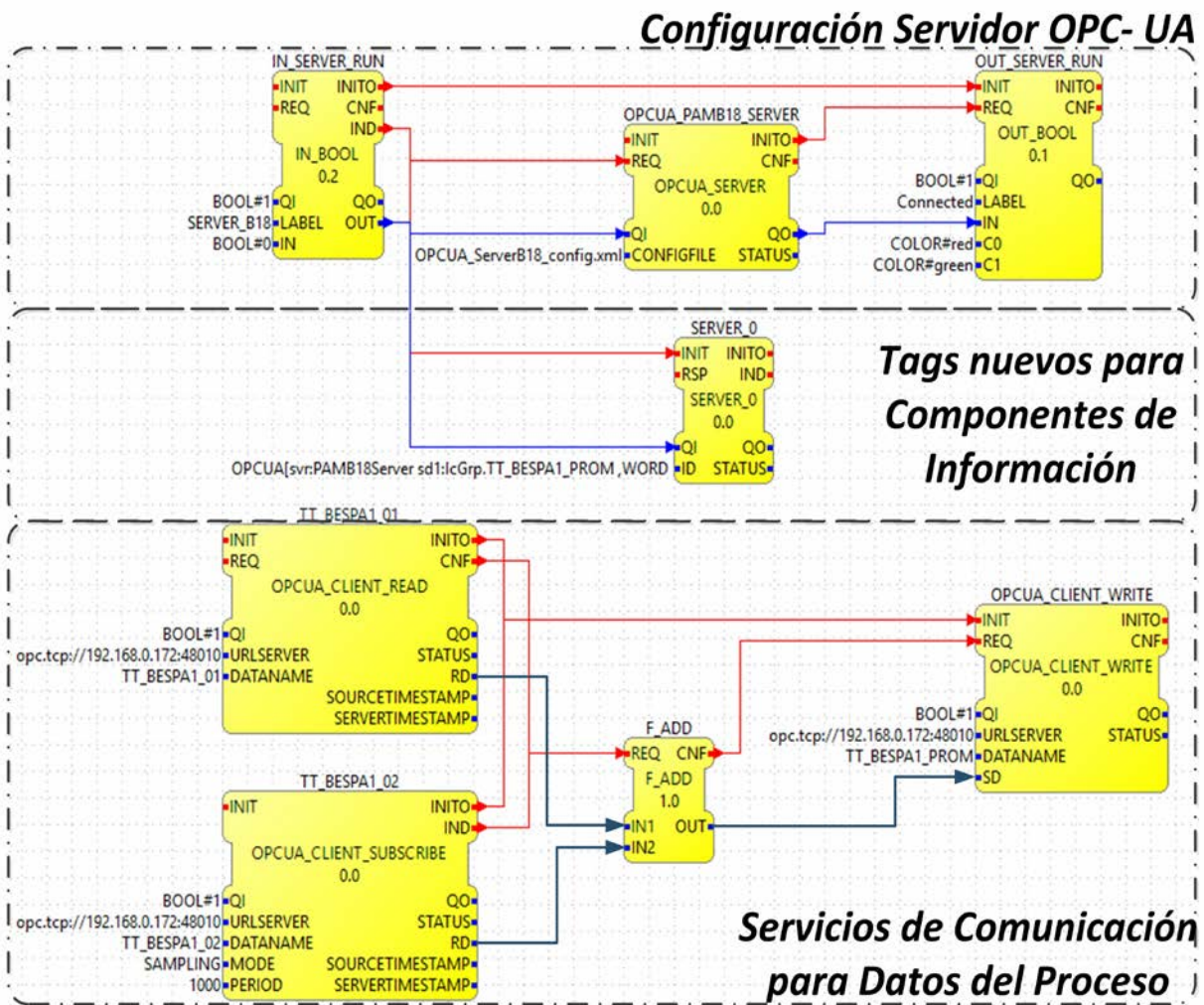


Figura. 13: Componente de Información (ICs) de Pozo PAA001

y la integración en el proceso productivo de dispositivos de niveles superiores.

Se propone el uso de un conjunto de SIFBs para implementar servidores y clientes OPC UA, incluyendo mecanismos de suscripción. Estos bloques de función permiten, de una manera rápida y sencilla, la construcción de nuevas aplicaciones distribuidas basadas en componentes mediante entornos de programación bajo la norma IEC 61499.

La utilización de bloques de función para diseñar componentes de información proporciona beneficios evidentes y potenciales. Quizás el más simple, pero más importante, es que el mismo componente de información, el cual, además de ser reutilizable, es aplicable en diferentes procesos industriales mediante la reconfiguración del software. También es factible añadir, eliminar y reemplazar algunas funciones de un componente de información en producción cuando lo soliciten los requisitos de la aplicación.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el MINECO/FEDER, UE del Gobierno de España bajo el proyecto DPI2015-68602-R y por

el Gobierno Vasco/EJ bajo el reconocimiento de grupo de investigación IT914-16. Así mismo como al Gobierno Ecuatoriano a través de la Beca SENESCYT “Convocatoria abierta 2013”.

### Referencias

- 4DIAC, 2017. IEC 61499 Implementation for Distributed. Available at: <https://eclipse.org/4diac/>
- Claassen, A., Rohjans, S. & Lehnhoff Member, S., 2011. Application of the OPC UA for the Smart Grid. In 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. IEEE, pp. 1–8. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6162627>.
- García, M. V. et al., 2014. Building industrial CPS with the IEC 61499 standard on low-cost hardware platforms. Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), pp.1–4.
- García, M. V. et al., 2015. Developing CPPS within IEC-61499 based on low cost devices. IEEE International Workshop on Factory Communication Systems - Proceedings, WFCS, 2015–July, pp.1–4.
- GmbH, 4DIAC Consortium. PROFACTOR, 2010. Framework for Distributed Industrial Automation and Control (4DIAC). Available at: <http://www.fordiac.org>.
- Hazarika, P. et al., 2015. Mobile cloud integration for industrial data interchange. 2015 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, ICACCI 2015, pp.1118–1122.
- Hussain, T. & Frey, G., 2004. Developing IEC 61499 compliant distributed systems with network enabled controllers. In IEEE Conference on

- Robotics, Automation and Mechatronics, 2004. IEEE, pp. 507–512. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1438972/>.
- International Electrotechnical Commission, 2014. International Electrotechnical Commission Std. (2005) IEC 61499: Function blocks, Part 1-4. Available at: <http://www.iec.ch>.
- Jain, S., Yuan, C. & Ferreira, P., 2002. EMBench: A Rapid Prototyping Environment for Numerical Control Systems. In *Dynamic Systems and Control*. ASME, pp. 7–13. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1580998>.
- Kim, J. et al., 2014. M2M service platforms: Survey, issues, and enabling technologies. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(1), pp.61–76.
- van der Linden, D. et al., 2011. An OPC UA interface for an evolvable ISA88 control module. In *ETFA2011*. IEEE, pp. 1–9. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6058978/>.
- Olsen, S. et al., 2005. Contingencies-based reconfiguration of distributed factory automation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21(4–5), pp.379–390.
- Perez, F. et al., 2015. A CPPS Architecture approach for Industry 4.0. In *2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*. IEEE, pp. 1–4. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7301606/>.
- Querol, E. et al., 2016. Evaluation of closed loop control applications using different event management strategies under IEC 61499. In *2016 Second International Conference on Event-based Control, Communication, and Signal Processing (EBCCSP)*. IEEE, pp. 1–8. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7605263/>.
- Rentschler, M., Trsek, H. & Durkop, L., 2016. OPC UA extension for IP auto-configuration in cyber-physical systems. In *2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. IEEE, pp. 26–31. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7819128/>.
- Sande, O., Fojcik, M. & Cupek, R., 2010. OPC UA Based Solutions for Integrated Operations. *Communications in Computer and Information Science*, 79, pp.76–83.
- Schwab, C., Tangermann, M. & Ferrarini, L., 2005. Web based methodology for engineering and maintenance of distributed control systems: the TORERO approach. In *INDIN '05. 2005 3rd IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2005*. IEEE, pp. 32–37. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1560348/>.
- Stambolov, G. & Batchkova, I., 2011. Reconfiguration processes in manufacturing systems on the base of IEC 61499 standard. In *Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems*. IEEE, pp. 161–166. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6072731/>.
- Stojmenovic, I., 2014. Machine-to-Machine Communications with In-network Data Aggregation, Processing and Actuation for Large Scale Cyber-Physical Systems. *IEEE Internet of Things Journal*, PP(99), pp.1–1. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6766661>.
- Strasser, T. et al., 2011. Design and Execution Issues in IEC 61499 Distributed Automation and Control Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 41(1), pp.41–51. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5571034/>.
- Strasser, T., Auinger, F. & Zoitl, A., 2004. Development, implementation and use of an IEC 61499 function block library for embedded closed loop control. In *2nd IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2004*. INDIN '04. 2004. IEEE, pp. 594–599. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1417415/>.
- Thramboulidis, K. & Tranoris, C., 2001. An architecture for the development of function block oriented engineering support systems. In *Proceedings 2001 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (Cat. No.01EX515)*. IEEE, pp. 536–542. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1013258/>.
- Vicaire, P.A. et al., 2012. Bundle : A Group-Based Programming Abstraction for Cyber-Physical Systems. , 8(2), pp.379–392.
- Vyatkin, V., Cheng Pang & Tripakis, S., 2015. Towards cyber-physical agnosticism by enhancing IEC 61499 with PTIDES model of computations. In *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, pp. 001970–001975. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7392389/>.
- Wang, L. et al., 2001. Realizing Holonic Control with Function Blocks. *Integr. Comput.-Aided Eng.*, 8(1), pp.81–93. Available at: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1275723.1275730>.
- Wang, L., Keshavarzmanesh, S. & Feng, H.Y., 2008. Design of adaptive function blocks for dynamic assembly planning and control. *Journal of Manufacturing Systems*, 27(1), pp.45–51. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2008.06.003>.
- Wang, L., Song, Y. & Gao, Q., 2009. Designing function blocks for distributed process planning and adaptive control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(7), pp.1127–1138. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2008.11.008>.
- Yuan, C. & Ferreira, P., 2004. An Integrated Environment for the Design and Control of Deadlock-Free Flexible Manufacturing Cells. In *Manufacturing Engineering and Materials Handling Engineering*. ASME, pp. 471–481. Available at: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1652663>.
- Zawawi, A. El & El-Sayed, A., 2012. Integration of DCS and ESD through an OPC application for upstream Oil and Gas. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp.1–5.
- Zoitl, A. et al., 2005. Executing real-time constrained control applications modelled in IEC 61499 with respect to dynamic reconfiguration. In *INDIN '05. 2005 3rd IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2005*. IEEE, pp. 62–67. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1560353/>.